

Obnovitelné zdroje elektrické energie

Petr Mastný | Jiří Drápela | Stanislav Mišák | Jan Macháček |
Michal Ptáček | Lukáš Radil | Tomáš Bartošík | Tomáš Pavelka



Obnovitelné zdroje elektrické energie

Petr Mastný

Jiří Drápela

Stanislav Mišák

Jan Macháček

Michal Ptáček

Lukáš Radil

Tomáš Bartošík

Tomáš Pavelka



České vysoké učení technické v Praze

Praha 2011

Publikace byla zpracována za finanční podpory Státního programu na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie pro rok 2011 – část A – Program EFEKT.



MINISTERSTVO
PRŮMYSLU A OBCHODU



© Petr Mastný, Jiří Drápela, Stanislav Mišák, Jan Macháček
Michal Ptáček, Lukáš Radil, Tomáš Bartošík, Tomáš Pavelka, 2011
ISBN 978-80-01-04937-2

Vážení čtenáři,

čas, kdy tato publikace vznikla, je ve znamení pokračujících dynamických změn v energetice. Energetika jako celek, nejen výroba, přenos a distribuce elektřiny, na které se zaměřuje tato edice odborných publikací, je ovlivňována zásadními událostmi. Plně se otevřel trh s elektřinou a plynem, stále narůstá podíl obnovitelných zdrojů na výrobě elektřiny, mění se a vyhraňují postoje k jaderné energetice. V rámci Evropy se stále více diskutuje o využití primárních zdrojů i paliv, rostou nároky na přenosovou soustavu.

Celý rozvoj energetického odvětví by však nebyl možný bez dostatku kvalitních lidských zdrojů. Proto považuji za akutní problém zajištění dostatečného počtu odborníků pro budoucí činnost v této náročné technické oblasti. Předpokladem pro přípravu kvalitních odborníků jsou kvalitní odborné základy a já věřím, že právě tato publikace je dokáže poskytnout.

Celá edice odborných publikací je svým způsobem výjimečná, neboť po delší době opět věnuje pozornost jednotlivým oblastem elektroenergetiky a velmi kvalitně standardizuje poznatky z tohoto náročného oboru. Je jisté, že tato edice může přispět k větší konsolidaci a spolupráci v oboru technického vzdělávání, vědy a výzkumu, aby se opět zvýšila prestiž technických oborů. Ministerstvo průmyslu a obchodu, které významně podpořilo vznik této ediční řady, chce tímto způsobem přispět k zajištění konkurenceschopnosti hospodářství na území České republiky, které bylo vždy založeno na kvalitní technické produkci.

Řada publikací vznikla ve spolupráci kolektivů autorů technických vysokých škol České republiky. Rád bych závěrem poděkoval autorům za jejich profesionální přístup při přípravě publikace a také mým kolegům z ministerstva za zajištění realizace projektu. Všem uživatelům přeji, aby jim publikace napomohla při jejich vzdělávání a práci a stala se nedílnou součástí knihovny, ke které se budou pravidelně vracet.

Ing. Roman Portužák, CSc.

ředitel odboru elektroenergetiky

Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky



Obsah

1.	Úvod.....	13
1.1.	Rozdělení energetických zdrojů	16
1.1.1	Neobnovitelné zdroje energie.....	16
1.1.2	Obnovitelné zdroje energie	20
1.1.3	Druhotné zdroje energie	21
1.1.4	Obnovitelné zdroje energie v ČR	22
1.1.5	Energetický potenciál OZE v ČR.....	24
1.2.	Jednotky v energetice	28
1.3.	Energie	30
1.4.	Exergie a anergie	31
1.4.1	Exergie “E”	31
1.4.2	Anergie “B”	31
1.5.	Transformace energie	32
1.6.	Literatura	34
2.	Větrná energetika	35
2.1.	Vítr jako energetický zdroj	35
2.1.1	Energie a výkon větru.....	37
2.2.	Rozdělení větrných motorů	38
2.2.1	Větrné motory odporové	39
2.2.2	Větrné motory vztlakové	40
2.3.	Elektrická zařízení větrných elektráren	43
2.3.1	Větrné elektrárny malých výkonů	45
2.3.2	Větrné elektrárny středních a velkých výkonů.....	46
2.4.	Regulace výkonu větrných elektráren	48
2.4.1	Regulace výkonu malých větrných elektráren.....	49
2.4.2	Regulace výkonu velkých větrných elektráren	50
2.5.	Vliv větrných elektráren na provoz elektrizační soustavy	53
2.5.1	Lokální vlivy větrných elektráren na provoz elektrizační soustavy.....	54
2.5.2	Systémové vlivy větrných elektráren na provoz elektrizační soustavy ...	55
2.5.3	Požadavky na chování větrných elektráren v elektrizační soustavě.....	56
2.6.	Literatura	58
3.	Fotovoltaika	59
3.1.	Slunce jako zdroj energie	59
3.2.	Základní popis fotovoltaických technologií, rozdělení a vývoj.....	62
3.2.1	Princip funkce fotovoltaického článku	62
3.2.2	Konstrukce fotovoltaických článků	68
3.2.3	Rozdělení fotovoltaických systémů podle zapojení.....	73
3.3.	Návrh FV elektráren, dimenzování jednotlivých komponent.....	77
3.3.1	Příprava a stavba fotovoltaické elektrárny	77
3.3.2	Technické řešení FVE	78
3.3.3	Výběr a návrh konfigurace fotovoltaických panelů.....	79
3.3.4	Invertory.....	82
3.4.	Literatura	86

4.	Biomasa	87
4.1.	Úvod	87
4.2.	Druhy biomasy	88
4.2.1	Biomasa rostlinného původu	90
4.2.2	Biomasa živočišného původu	91
4.2.3	Palivo z komunálního odpadu	92
4.3.	Zpracování biomasy	92
4.3.1	Spalování	93
4.3.2	Zplyňování a pyrolýza	96
4.3.3	Anaerobní fermentace	98
4.3.4	Esterifikace bioolejů	101
4.4.	Literatura	102
5.	Geotermální energie.....	103
5.1.	Úvod	103
5.2.	Využití geotermální energie	103
5.2.1	Systémy založené na využití nízkopotenciální energie.....	105
5.2.2	Systémy založené na využití vysokopotenciální energie	108
5.2.3	HDR – Hot Dry Rock	113
5.3.	Možnosti využití v České republice	114
5.3.1	Technologie	114
5.3.2	Realizace a přínos obyvatelstvu	114
5.4.	Jednotky ve světě	115
5.4.1	Larderello – Itálie	115
5.4.2	Mutnovsky, Kamčatka. Ruská federace	116
5.4.3	Heber Binary Plants. Kalifornie, USA	117
5.4.4	Hatchobaru. Kjúšú. Japonsko	117
5.4.5	Nesjavellir, Island	118
5.5.	Literatura	119
6.	Slapové elektrárny	121
6.1.	Úvod	121
6.1.1	Historie	121
6.2.	Princip slapového jevu	121
6.2.1	Fyzikální princip využití slapového efektu	123
6.2.2	Projevy na Zemi	126
6.3.	Slapové elektrárny – otázky a odpovědi	126
6.3.1	Současný stav, vývoj do budoucna	126
6.3.2	Dopad na životní prostředí	127
6.3.3	Ekonomická efektivita slapových elektráren	127
6.3.4	Technologie	128
6.4.	Literatura	128
7.	Vodní elektrárny	129
7.1.	Význam vodních elektráren pro energetiku v ČR	129
7.2.	Pracovní princip vodních elektráren	130
7.3.	Hydroenergetický potenciál	131
7.4.	Základní typy a rozdělení vodních turbín	133
7.5.	Základní typy a provozní vlastnosti vodních elektráren	137

7.5.1	Průtočné vodní elektrárny.....	138
7.5.2	Regulační vodní elektrárny.....	139
7.6.	Elektrotechnická zařízení vodních elektráren	145
7.6.1	Začlenění MVE do energetického systému.....	146
7.6.2	Elektrická zařízení MVE	146
7.6.3	Silnoproudá zařízení MVE.....	147
7.7.	Literatura	149
8.	Palivové články a jejich hospodářství.....	150
8.1.	Historie a blízká budoucnost	150
8.2.	Základní princip a konstrukce palivového článku.....	152
8.2.1	Požadavky na elektrody a katalyzátor.....	154
8.3.	Základní klasifikace palivových článků.....	155
8.3.1	Rozdělení podle použitého elektrolytu	155
8.3.2	Rozdělení podle využití palivových článků.....	161
8.3.3	Další možnosti rozdělení palivových článků.....	162
8.4.	Základní charakteristiky palivového článku.....	162
8.4.1	Základní vztahy a charakteristiky	162
8.4.2	Ztráty	167
8.5.	Využití palivových článků v průmyslových aplikacích	168
8.5.1	PEMFC	169
8.5.2	MCFC	170
8.5.3	SOFC.....	170
8.5.4	PAFC	171
8.6.	Výroba vodíku.....	171
8.6.1	Parní reformování.....	173
8.6.2	Parciální oxidace	174
8.6.3	Zplyňování	175
8.6.4	Elektrolýza.....	175
8.6.5	Vysokoteplotní elektrolýza.....	176
8.6.6	Termochemické cykly	177
8.6.7	Jiné způsoby výroby	177
8.7.	Skladování vodíku	177
8.7.1	Plynné skupenství	178
8.7.2	Kapalné skupenství	178
8.7.3	Pevné látky	179
8.7.4	Jiné způsoby skladování	179
8.8.	Literatura	180
9.	Zpětné vlivy OZE na distribuční soustavy.....	183
9.1.	Podmínky pro připojení OZE do DS z hlediska jejich chování a zpětných vlivů dle PPDS	185
9.1.1	Chování výroben v síti	185
9.1.2	Podmínky pro připojení	189
9.1.3	Zpětné vlivy na napájecí síť	191
9.2.	Praktická analýza vlivu větrných elektráren na síť.....	195
9.2.1	Analýza systémů řízení VTE s asynchronními generátory ve spolupráci s frekvenčními měniči	195
9.2.2	Vliv provozu větrné elektrárny na parametry napájecí soustavy VN	

	rozvodny	202
9.3.	Spolehlivost dodávky elektrické energie z OZE	205
9.4.	Literatura	209
10.	Akumulace elektrické energie.....	210
10.1.	Úvod	210
10.2.	Rozdělení akumulčních systémů	211
10.3.	Akumulační soustavy a jejich podrobnější popis	214
10.3.1	Požadovaný výkon	214
10.3.2	Akumulační kapacita	214
10.3.3	Počet cyklů	215
10.3.4	Rychlost a reakční rychlost u nabíjení a vybíjení	215
10.3.5	Fáze přeměny	215
10.3.6	Mechanické akumulční systémy	215
10.3.7	Elektrochemická přeměna - akumulace	222
10.3.8	Chemická akumulace	233
10.3.9	Tepelná akumulace	235
10.3.10	Elektrická akumulace	236
10.4.	Závěrečné hodnocení akumulátorových systémů	238
10.5.	Akumulační systémy vhodné pro energetiku	240
10.5.1	Baterie pro primární potřeby	240
10.5.2	Baterie pro sekundární činnosti	241
10.6.	Akumulační systémy vhodné pro OZE	241
10.6.1	Specifikace vhodných akumulčních systémů	241
10.7.	Literatura	245
11.	Dodatek - Přehled základních vztahů termodynamiky	246

Použité zkratky

Zkratka	Význam
AA-CAES	Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage
AFC	Palivový článek alkalickým elektrolytem (Alkaline fuel cell)
BCV	Ball check valve (kulový ventil)
BP	Bipolární deska (Bipolar Plate či Gas Flow Bipolar Plate).
C	Condenser (kondenzátor)
CAES	Compressed air energy storage
CC	Jímač volných elektronů (Current Collector)
CP	Chladicí desky palivového článku (Cooling Plate)
CP	Condensate pump (kondenzační čerpadlo)
CS	Cyclone separator (cyklónový odlučovač)
CSV	Control & stop valves (kontrolní a zavírací ventil)
CW	Cooling water (chladící voda)
DFC	Palivový článek využívající vnitřní reformaci vodíku (Direct Fuel Cell)
DMFC	Palivový článek pracující přímo na metan (Direct Methanol Fuel Cell)
EP	Koncové deska (End Plate)
F	Flasher (zásobník, kotel)
FDR	Fissure dry rock (Štěrbinová suchá skála)
FPS	Systém využívající parní reformování pro výrobu vodíku (Fuel Processing Systém)
FVE	Fotovoltaická elektrárna
G	Generator (generátor)
GDE	Plynová difúzní elektroda (Gas Diffusion Electrode)
GDL	Difúzní vrstva palivového článku (Gas Diffusion Layer)
HDR	Hot dry rock (horká suchá skála)

HPT	High-pressure turbine (vysokotlaká turbína)
HT-PEMFC	Palivový článek s polymerním elektrolytem pracující s vyšší provozní teplotou (High Temperature - Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
CHP	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla (Combined Heat and Power)
IW	Injection well (injektážní vrt)
LPT	Low-pressure turbine (nízkotlaká turbína)
LT-PEMFC	Palivový článek s polymerním elektrolytem pracující s nízkou provozní teplotou (Low Temperature - Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
MAE	Membránové elektrodové uspořádání (Membrane Electrode Assembly)
MCFC	Palivové články s roztavenými uhlíčitany (Molten Carbide Fuel Cell)
MR	Moisture remover (Odlučovač vlhkosti)
MVE	Malá vodní elektrárna
NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku (National Aeronautics and Space Administration)
OZE	Obnovitelné Zdroje Energie
PAFC	Palivové články s elektrolytem s kyselinou fosforečnou (Phosphoric Acid Fuel Cell)
PEMFC	Palivový článek s polymerním elektrolytem (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
PH	Powerhouse (elektrárna)
POX	Parciální oxidace (Partial Oxidation)
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
PSA	Tlakové adsorpční procesy (Pressure Swing Adsorption)
PTFE	Teflon (polytetrafluorethen)
PVE	Přečerpávací vodní elektrárny
PW	Production well (produkční vrt)

REDOX	Redukčně oxidační
SE/C	Steam ejector/condenser (parní ejektor/kondenzátor)
SMR	Parní reformování (Steam Methane Reforming)
SOFC	Palivové články s tuhými oxidy (Solid Oxide Fuel Cell)
SP	Steam piping (parní potrubí)
Stack	Palivový modul složený z jednotlivých článků
T/G	Turbine/generator (turbína/generátor)
TV	Throttle valve (škrťací ventil)
VTE	Větrná elektrárna
WP	Water (brine) piping (vodní potrubí)

Ostatní symboly a zkratky se vyskytují v textu s jejich okamžitým vysvětlením.

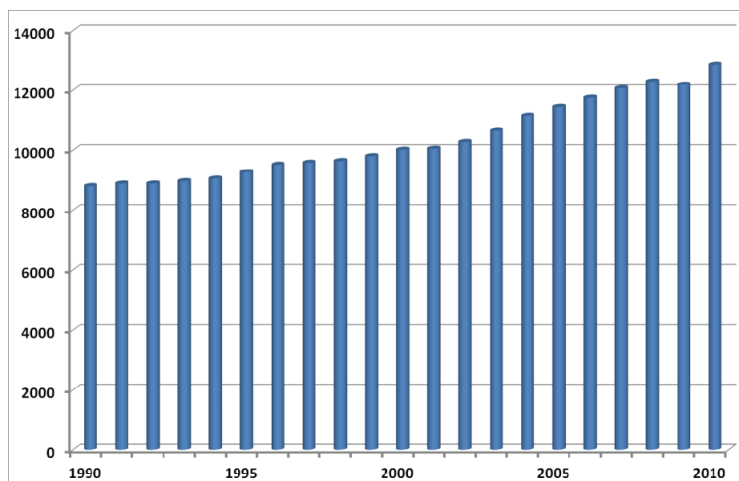
1. Úvod

Snižující se zásoby fosilních paliv, růst světové populace i nároků jednotlivců na celém světě na energii, prohlubující se závislost soudobé civilizace na spolehlivé dodávce energie, ohrožení biosféry, na kterém se energetické hospodářství včetně dopravy výrazně podílí a nerovnoměrnost zdrojů i spotřeba paliv vytvářejí prostředí, které se bude výrazně lišit od poměrně bezproblémové situace, na kterou si při čerpání paliv a využívání energie zvykli obyvatelé průmyslových zemí ve 20. století. Současná situace a směry vývoje ukazují na pravděpodobnost nevratných vlivů na světové hospodářství i na globální klima. Nároky na energii neustále porostou a budou odčerpávat zejména nenahraditelné fosilní zdroje energie, které jsou ale zároveň chemickou surovinou.

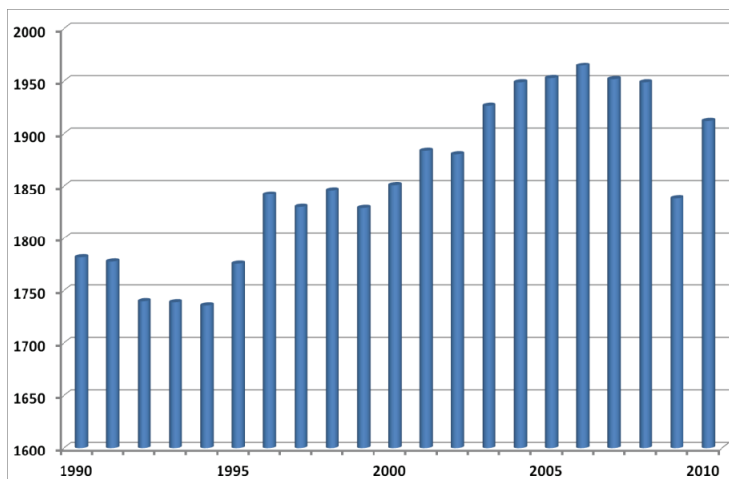
Obecně platí, že spotřeba energie ve všech jejích konečných uživatelských formách stále stoupá. V roce 2010 vzrostla spotřeba energie na celém světě o 5,5% oproti spotřebě před krizí v roce 2009. Tento rostoucí trend by zaznamenán ve všech zemích G20. Tento nárůst spotřeby energie byl zapříčiněn dvěma základními trendy:

- po útlumu v roce 2009 byly oživeny ekonomické aktivity zemí OECD, spotřeba energie se zvýšila o 6,7% v Japonsku, v Evropě o 4% a v USA o 3,7%
- vzrostla poptávka po energii v Číně a Indii (nárůst o více než 6%), Čína posílila svou pozici největšího spotřebitele energie (o 11% více než USA)

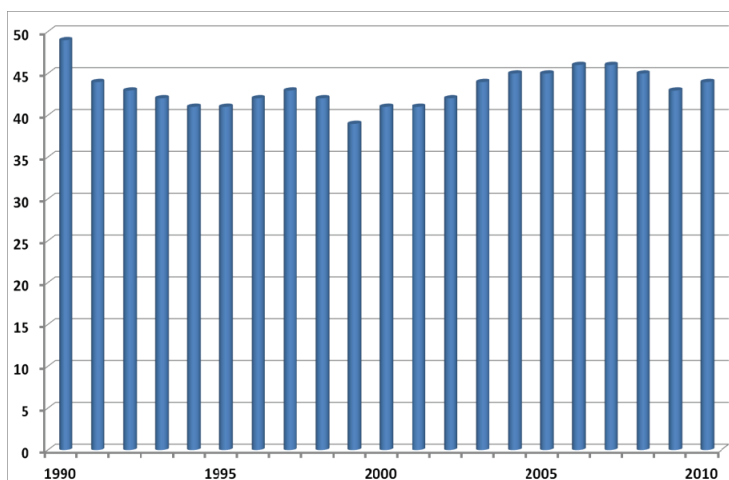
Na následujících obrázcích (1.1 – 1.3) jsou zobrazeny vývojové trendy ve spotřebě energie v letech 1990 – 2010 (údaje jsou v Mtoe - Million Tons of Oil Equivalent).



Obr. 1.1: Vývoj spotřeby energie ve světě [4]



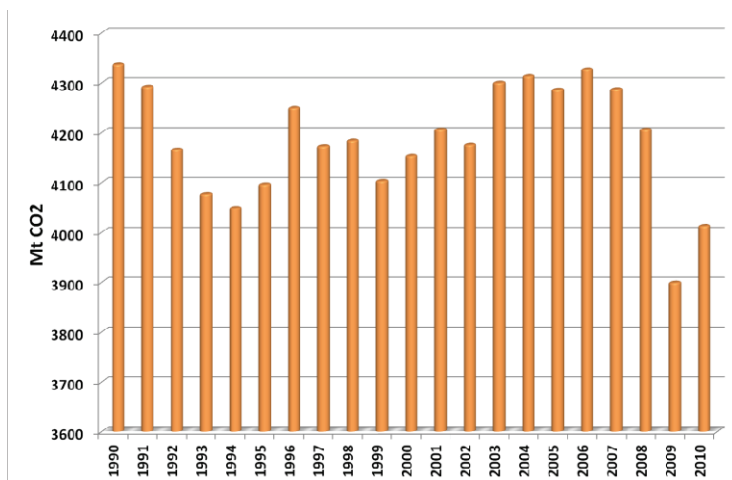
Obr. 1.2: Vývoj spotřeby energie v EU [4]



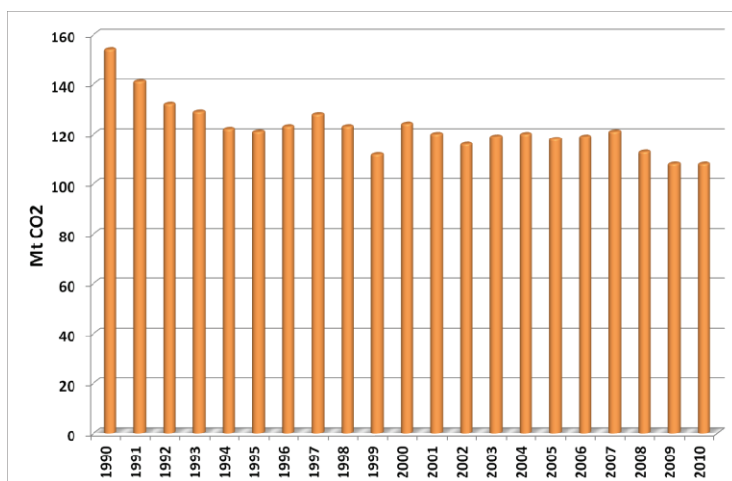
Obr. 1.3: Vývoj spotřeby energie v ČR [4]

Energetická politika Evropské unie (jejíž je Česká republika členem) postavila do popředí otázku snížení závislosti na dovozu energií a environmentální problematiku, z čehož vyplynul, kromě jiného, i požadavek na maximální možné využití obnovitelných zdrojů. Ač všechny členské státy podnikly kroky k podpoře obnovitelných zdrojů, výsledek není všude stejný. Proto vznikly další iniciativy, jejichž závěrem je ambiciózní úkol zdvojnásobení příspěvku obnovitelných zdrojů energie do energetické bilance primárních energetických zdrojů. I když se to zdá nadnesené, byla podpora obnovitelných zdrojů v posledních letech jedním z klíčových bodů energetické politiky Evropské unie. Souhlas s touto politikou potvrzuje průzkum nedávno provedený statistickým úřadem Evropské Unie Eurostat, ve kterém 90 % občanů Evropské unie považuje za jeden z prioritních úkolů svých vlád zvyšování podílu obnovitelných zdrojů energie na bilanci spotřeby energie.

Je nepopíratelnou skutečností, že zásoby fosilních paliv jsou omezené, a že je nutné hledat jiné zdroje. Řešením asi není zemní plyn, který mimo to, že je fosilním zdrojem, je také importovanou komoditou, která v sobě skrývá mimo závislosti na dovozu i problém očekávaného velkého cenového nárůstu. Dalším tématem k možné diskusi je současné používání jaderné energie. Výše uvedenou problematiku analyzuje tzv. Zelená kniha Evropské unie „Evropská strategie pro zajištění bezpečných dodávek energií“, která klade velkou důležitost vyššímu využívání obnovitelných zdrojů. Speciálně tuto záležitost do hloubky rozebírá tzv. Zelená a Bílá kniha Evropské unie „Obnovitelné zdroje energie – energie pro budoucnost“.



Obr. 1.4: Produkce CO₂ v Evropě [4]



Obr. 1.5: Produkce CO₂ v ČR [4]

V souvislosti s nárůstem spotřeby energie, vzrůstají i emise CO₂. V roce 2010 vzrostly emise CO₂ oproti roku 2009 o 6%. Emise ze zemí OECD mají 41% podíl

na celosvětové produkci CO₂. V průběhu roku 2010 měly emise zemí OECD poma-
lejší růst, než byl celosvětový průměr. V USA rostly emise CO₂ rychleji (4%) než
v Evropě (3%), zatímco Japonsko zaznamenalo nárůst o 7,6%. V Asii se velmi
dramaticky zvýšily emise CO₂ a to především díky hospodářskému růstu a většímu
využívání fosilních zdrojů. K největším producentům CO₂ patří Čína, která měla
v roce 2010 25% podíl na celosvětové produkci tohoto plynu.

Česká republika má srovnatelné měrné emise CO₂ s průměrem zemí OECD,
ale její energetická bilance je tradičně založena na vysoké spotřebě domácího uhlí
a omezeném hydropotenciálu. Pro srovnání jsou na obrázku 1.4 a 1.5 zobrazeny
emisní hodnoty CO₂ v Evropě a v ČR v letech 1990- 2010.

1.1. Rozdělení energetických zdrojů

Energetické zdroje využívané na naší planetě můžeme rozdělit podle několika
základních kritérií:

- rozdělení podle obnovitelnosti,
- rozdělení podle místa v procesu přeměny,
- rozdělení podle rozsahu využití.

Nejběžnější je rozdělení podle obnovitelnosti zdrojů na *neobnovitelné a obno-
vitelné*. Dále jsou také zmiňovány energetické zdroje *druhotné* (mají svůj původ
v lidské činnosti).

1.1.1 Neobnovitelné zdroje energie

Za neobnovitelný zdroj energie je obvykle považován takový zdroj energie, je-
hož vyčerpání je očekáváno v horizontu maximálně stovek let, ale jeho případné
obnovení by trvalo mnohonásobně déle. Jak je vidět na obrázku 1.8, mezi neobno-
vitelné zdroje patří fosilní a jaderná paliva.

Uhlí

Nepostradatelným a nejvíce rozšířeným zdrojem energie jsou dnes fosilní pa-
liva. Do skupiny fosilních paliv patří především uhlí, a to jak černé uhlí, které je
kvalitněji prouhelněné, tak i hnědé uhlí, které je méně kvalitní, má vyšší obsah
vody a síry a má přibližně poloviční výhřevnost. Uhlí vznikalo z organického mate-
riálu, především rostlinného původu, který se dostal do hlubších vrstev zemské
kůry, kde se rozkládal velmi dlouhou dobu za nepřítomnosti vzduchu. Černé uhlí
vznikalo v době před 280–350 milióny lety, jeho sloje jsou dnes mnohem mohut-
nější, než sloje hnědé uhlí, a jsou uloženy ve větší hloubce, někdy až 1200 met-
rů. Hnědé uhlí se vytvářelo podstatně kratší dobu a v menší hloubce. Těží se povr-
chově, což má většinou za následek rozsáhlou devastaci krajiny a rušení některých
vesnic.

Těžba uhlí ve větším měřítku začala už v 17. století a odhaduje se, že světové
zásoby uhlí by měly vydržet ještě asi 600 let. Největší nevýhoda uhlí je, že jeho
spalování v uhelných elektrárnách uvolňuje do ovzduší velké množství škodlivých
látek. Uhelná elektrárna o výkonu 1000 MW spotřebuje během jednoho roku svého
provozu přibližně 130 tisíc vagonů uhlí a do ovzduší vypustí 200 tisíc tun oxidu

siřičitého SO₂, 30 tisíc tun oxidu dusíku NO_x, 16 tisíc tun popílku a desítky tun těžkých, toxických a z části i radioaktivních látek. Krajinu v okolí navíc zatěžuje každoročně 1,8 milionu tun popela, který se sice odplavuje na vzdálenější skládky, ale i tak jej vítr rozfoukává po okolí. [2]



Obr. 1.6: Povrchový uhelný důl, Wyoming, USA

Do popředí se dnes dostávají technologie, které umožňují vyrobit z uhlí „čistší“ paliva. Uhlí je zahříváno ve vzduchotěsných komorách na vysokou teplotu a dělí se na jednotlivé složky – takto se získá z jedné tuny uhlí přibližně 630 kg koksu, 54 kg uhelného dehtu, 13,5 kg benzolu, 9 kg dalších chemikálií, 285 krychlových metrů plynu, zbytek tvoří voda a pevný odpad. Další možností je zkapalňování paliv na principu extrahování organických složek z uhlí, za pomoci rozpouštědel a jejich nasycování vodíkem. Podle typu procesu vzniká celá řada produktů, například těžké oleje, benzíny, a také plyny. Z jedné tuny uhlí se takto získá asi 180–350 litrů kapalných produktů. Podíl uhlí na světové energetice je dnes přibližně 25 procent.

Ropa

Další z paliv je ropa. Je to jedno z nejdůležitějších paliv současnosti, jeho podíl na světové energetice je přibližně 30 procent a její současná těžba je kolem 3,5 miliardy tun ročně. Deset procent z tohoto množství se využívá jako důležitá surovina v chemickém průmyslu, zbytek potom v energetice a jako pohonné hmoty do automobilů (benzín, nafta). Ropa je složena z kapalných uhlovodíků, vzniklých rozkladem organických látek usazených na dně moří před 500 miliony let. Usazeniny byly později zakryty anorganickými vrstvami a vystaveny působení vysokých tlaků a teplot. Vznik ropy obvykle doprovází i vznik zemního plynu, který se téměř vždy nachází hned nad ložiskem ropy. Spotřeba ropy od začátků její těžby prudce vzrůstala a už v padesátých letech byla nejvýznamnějším palivem, a to především v dopravě, kde je prakticky nenahraditelná. Nyní její spotřeba sice pomalu klesá, i přesto jsou už dnes světové zásoby ropy z poloviny vyčerpány. Odhaduje se, že při dnešním tempu těžby ropy vystačí světové zásoby už jen na 50 až 70 let. [2], [5]

Těžba ropy může být realizována třemi základními způsoby:

- primární způsob těžby
 - metoda postavená na využití zemních vrtů
 - většinou je v nalezišti společně s ropou přítomen i zemní plyn (zajišťuje potřebný tlak pro vytlačení ropy na povrch)
 - výtěžitelnost naleziště využitím této metody je kolem 20%
- sekundární metoda
 - využívá se při poklesu tlaku v oblasti vrtu
 - využívají se pumpy, nebo zvýšení tlaku pomocí vodní injektáže, zpětné pumpování zemního plynu nebo popřípadě CO₂
 - využitím primární a sekundární metody je možno vyčerpát 25 – 35% celkového množství ropy obsažené ve vrtu
- terciální metoda
 - principem je snížení viskozity zbývající ropy pomocí horké vodní páry
 - produkce ropy z vrtu se může zvýšit o 5 – 15%

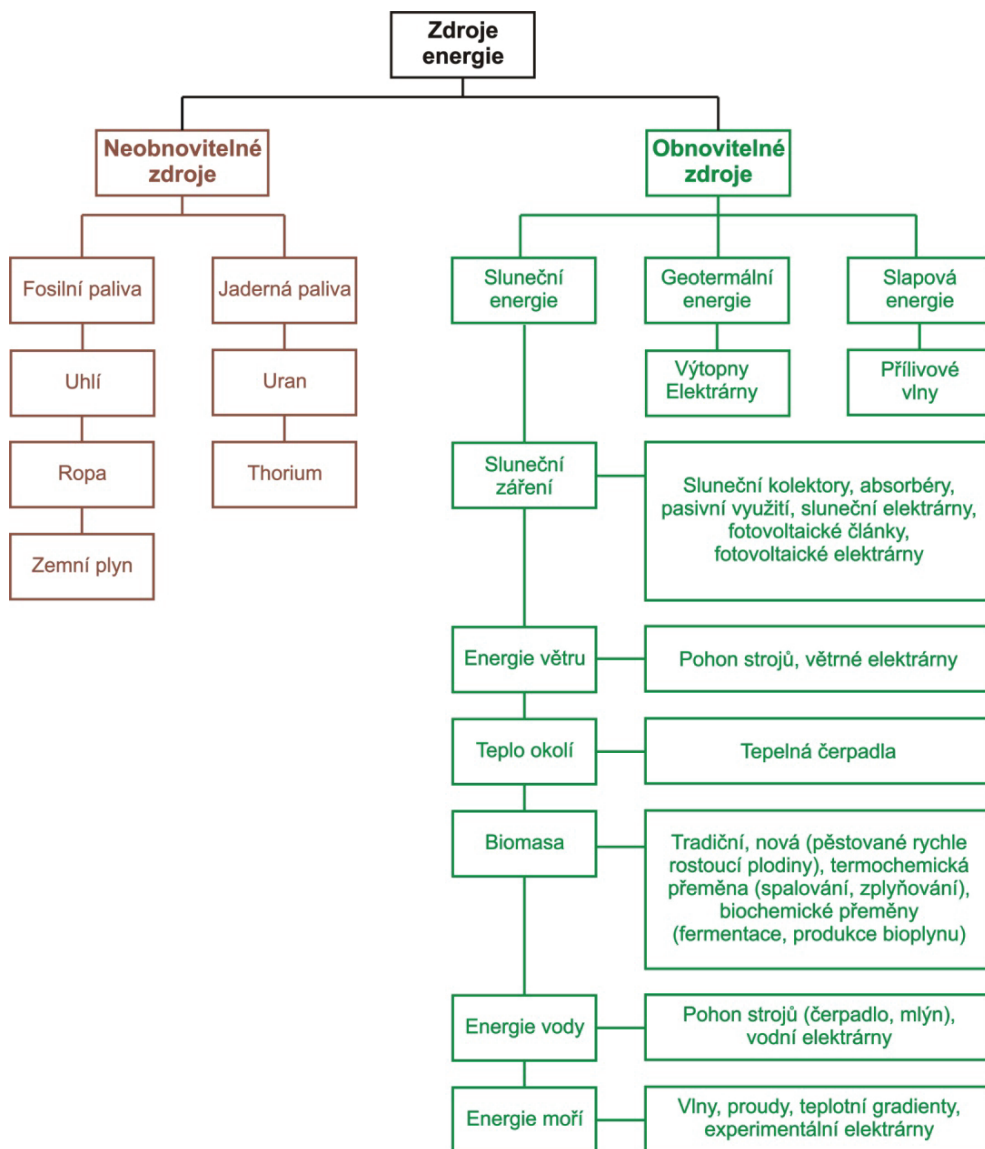


Obr. 1.7: Ropný vrt na jižní Moravě, Hodonín (Moravské naftové doly)

Zemní plyn

Zemní plyn se nachází především nad ložisky ropy. Jeho hlavní složkou je metan (CH₄), který tvoří 60–80 procent obsahu, další složky jsou etan (5–9%), propan (3–18%) a těžší uhlovodíky (2–14%). Zbytek tvoří malé množství dusíku, kyslíčnicku uhličitého a sirovodíku. V prvních obdobích těžby ropy byl zemní plyn spíše na obtíž, a tak byl vypouštěn do vzduchu anebo byl zapalován. Dnes se za-

chycuje a využívá jako palivo. Zemní plyn vyžaduje před svým použitím ze všech paliv nejméně úprav. V místě těžby se čistí, zbavuje vlhkosti a potom se dálkovými plynovody vede do míst spotřeby. Zemní plyn se využívá ve velké míře v domácnostech, především k vytápění. Jeho podíl na světové energetice je přibližně 25%. [5]



Obr. 1.8: Rozdělení energetických zdrojů [1], [2]

Jaderná paliva

Jaderné palivo je palivo, z něhož se energie uvolňuje prostřednictvím jaderných reakcí a to buďto rozpadem (štěpením) nebo fúzí. V současnosti se prakticky

využívá pouze štěpení jaderného paliva (uran, obohacený nebo přírodní a uměle vytvořený plutonium). Do budoucna se počítá i s thoriem, jehož zemská kůra obsahuje výrazně více. Palivo musí být pro využití v jaderných elektrárnách přepracováno do jaderných palivových článků.

Nejběžnějším typem jaderného paliva je obohacený uran ve formě oxidu uranitického. Tato látka je uzavřena do hermetických tablet, které jsou dále skládány do palivových prutů.

Konkrétní typ jaderného paliva závisí na konstrukčním řešení reaktoru. Byly sestaveny reaktory, které jsou schopny zpracovávat i přírodní uran bez obohacení, ale tato technologie se ukázala jako málo spolehlivá. Dnes používají jen málo obohacený uran reaktory typu CANDU, které provozuje Kanada, v Evropě Rumunsko.

Vyhořelé palivo, v němž se rozpadla většina uranu 235 (případně plutonia) se obvykle skladuje v meziskladech. Toto palivo se dá recyklovat na nové palivo, ale recyklace je v současné době dražší než výroba nového paliva. Recyklace spočívá v oddělení štěpných produktů a doplnění uranu 235 nebo plutonia.

Pokud je jaderné palivo použito v reaktoru s vysokým konverzním poměrem, může se v něm množství využitelných izotopů zvýšit. Recyklací se pak získá větší množství jaderného paliva, než bylo původně vloženo.

Jedním z nejdůležitějších problémů souvisejících s používáním jaderných paliv je jejich skladování. Vyhořelé palivo je stále vysoce radioaktivní a nebezpečné, musí proto být skladováno za speciálních podmínek. V první fázi se palivo skladuje zpravidla vedle reaktoru nebo v areálu jaderného zařízení a chladí se několik let ve zvláštním bazénu. Alternativou ke skladování v bazénu je suché skladování v ocelových kontejnerech. V těchto kontejnerech je možné palivo ukládat do meziskladů i na několik desítek let. Pro dlouhodobější skladování a ukládání se používají hlubinná úložiště.[6]

1.1.2 Obnovitelné zdroje energie

Možnost přechodu systémů zajišťujících zásobování lidských aktivit energií k využívání obnovitelných zdrojů vyplývá ze základních přírodních zákonů. Pokud nebude tato cesta nastoupena, může dojít ke snížení kvality života a degradaci životního prostředí. Tento proces přechodu nelze realizovat v krátkém ani středním období, pouze důsledná strategie v dlouhém období může být úspěšná. Mnoho alternativních zdrojů energie lze použít místo fosilních paliv. Rozhodnutí o tom, jaký typ zdroje energie by měl být využit, musí vycházet ze základních ekonomických, environmentálních a bezpečnostních hledisek. [3]

Obnovitelný zdroj energie je označení některých vybraných, na Zemi přístupných forem energie, získané primárně především z jaderných přeměn v nitru Slunce. Dalšími zdroji jsou teplo zemského nitra a setrvačnost soustavy Země-Měsíc. Lidstvo je čerpá ve formách např. slunečního záření, větrné energie, vodní energie, energie přílivu, geotermální energie, biomasy a další. [7]

Obnovitelné zdroje jsou v české legislativě definovány následovně:

- Definice obnovitelného zdroje podle českého zákona o životním prostředí je: „*Obnovitelné přírodní zdroje mají schopnost se při postup-*

ném spotřebovávání částečně nebo úplně obnovovat, a to samy nebo za přispění člověka.“ [8]

- Definice podle zákona č. 180/2005 Sb. o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie a o změně některých zákonů (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů): „Obnovitelnými zdroji se rozumí obnovitelné nefosilní přírodní zdroje energie, jimiž jsou energie větru, energie slunečního záření, geotermální energie, energie vody, energie půdy, energie vzduchu, energie biomasy, energie skládkového plynu, energie kalového plynu a energie bioplynu. [9]

V celosvětovém měřítku představují obnovitelné zdroje energie značný, ekologicky čistý potenciál, který by bylo teoreticky možné využít pro pokrytí současné celosvětové spotřeby energie. Využívání obnovitelných zdrojů je však limitováno několika faktory, jako je malá plošná koncentrace, nestejněměrné územní rozložení, proměnlivá intenzita v průběhu dne i roku a značné investiční náklady.

Obvykle se pro posouzení energetického potenciálu obnovitelných zdrojů využívá jako jediný ukazatel instalovaný výkon (P_i) zařízení určeného k transformaci energie. Avšak s ohledem na výše uvedené limity využití obnovitelných zdrojů energie je nutné toto posouzení rozšířit o další technické parametry. Jako nezbytná se jeví znalost charakteristických vlastností energetických zařízení, jako jsou: [10]

- instalovaný výkon P_i (W)
- špičkový výkon P_p (Wp) – indexem „p“ je označován tzv. Wattpeak
- průměrný celoroční výkon P_{cr} (kW)
- součinitel využití K – popisuje využití zařízení v průběhu celého roku a je určován ze znalosti energie W_R (kWh.r⁻¹) vyprodukované za rok:

$$K = \frac{W_R}{P_i \cdot 8760} \quad (1.1).$$

1.1.3 Druhotné zdroje energie

Druhotné energetické zdroje vznikají jako důsledek spotřeby paliv a energie v technologických procesech, ve kterých se bezezbytku nevyužijí. Mohou být tedy následně využity jako zdroj energie pro jiná technologická zařízení. Tyto “odpadní” produkty bývají nositeli energie: [10]

- chemické
 - různorodé spalitelné odpady jejichž využívání je závislé na množství a místě výskytu
- tlakové
 - zbývající tlaková energie v nositeli po technologickém procesu se vyskytuje omezeně a její využívání je ojedinelé

- tepelné
 - odpadní teplo z technologických procesů se jeví jako velmi perspektivní zdroj energie

Odpadní teplo

Za odpadní teplo lze považovat teplo nevyužité při spalování paliv, tj. tepelnou ztrátu a teplo obsažené v látkách pouštějících technologické zařízení.

Největším zdrojem odpadního tepla je kondenzační teplo páry vystupující z parních turbín do kondenzátoru a ohřívající chladicí vodu. Toto teplo je však nízkopotenciální a jeho využití naráží na značné ekonomické a technické problémy. Odpadní teplo se vyskytuje i v kompresorových stanicích tranzitního plynovodu, ve spalínách silikátových pecí, ve spalínách v hutnických a ohřívacích pecí apod.

Výroba elektrické energie spojená se spalováním jakéhokoli druhu paliva, včetně jaderných elektráren, je vždycky provázána velkým množstvím odpadního tepla, jehož množství závisí na účinnosti elektrárny. Roční objem odpadního tepla se odhaduje asi na 470 000 TJ. Typická 1000 MWe jaderná elektrárna uvolní v relativně malém prostoru (jako bodový zdroj) asi 2000 MW tepla do vody a ovzduší. [15]

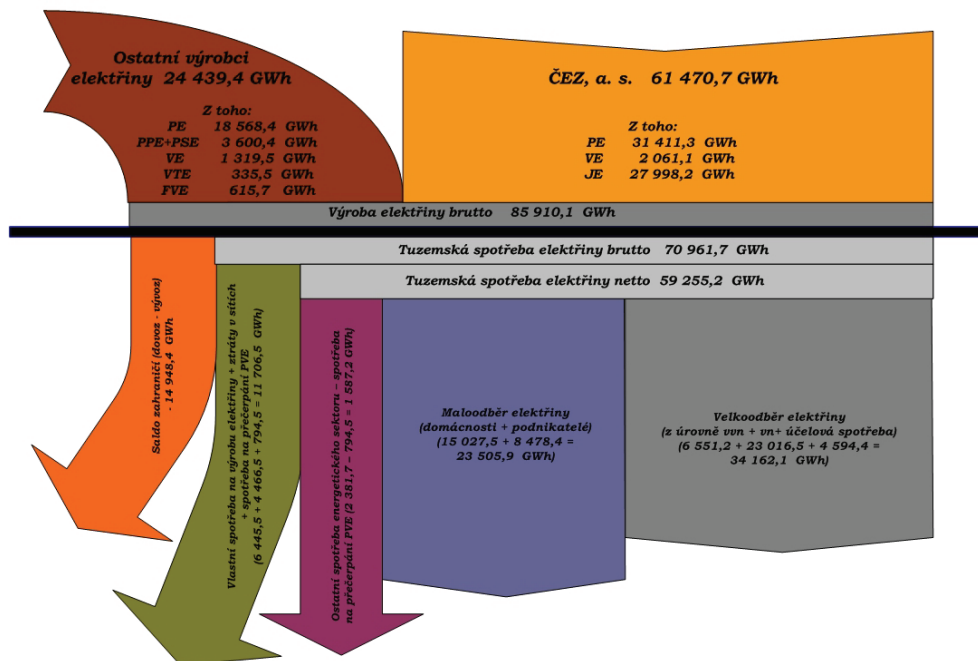
Pro podmínky využití odpadního tepla z chlazení kondenzace parních turbín v ČR bylo rozděleno toto teplo do čtyř kategorií: [15]

- odpadní teplo v chladicí vodě (25 – 43°C) využitelné v zemědělsko potravinářském průmyslu,
- upravené nízkopotenciální teplo (50 – 60°C) využitelné pro ekvitermické regulace tepla ve vytápěných objektech,
- teplo pro centralizované soustavy (120 – 180°C) využitelné pro centralizované zásobování teplem,
- teplo pro parní soustavy centralizovaného zásobování teplem

Stále více se uvažuje o využití nízkopotenciální energie, které je sice co do množství dostatek, ale vzhledem k jejímu nízkému potenciálu je její využití velmi obtížné. Pro ilustraci – odebereme-li například jednomu m³ vody teplo ochlazením o 1°C, představuje to takové množství tepla, které se rovná 1,16 kWh. Podobně lze odebírat teplo venkovnímu vzduchu, kterého je všude dostatek. Značnou tepelnou kapacitu představuje i teplo Země. Naše okolí má tedy dostatečnou zásobárnu tepla, jde pouze o to, převést je na teplotu, kterou potřebujeme. Podrobněji je této problematice věnována kapitola 5 – *Geotermální energie*.

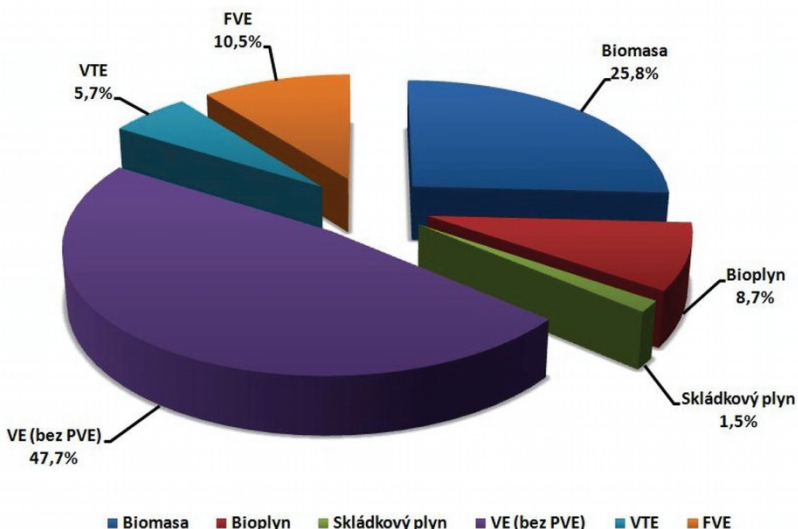
1.1.4 Obnovitelné zdroje energie v ČR

Energetická základna České republiky je založena především na využívání fosilních paliv. Struktura energetických zdrojů a spotřeby elektrické energie v České republice je vidět na obrázku 1.9. Z obrázku vyplývá, že majoritní podíl na výrobě elektrické energie mají tepelné elektrárny (58%), jaderné elektrárny (32%) a vodní elektrárny včetně přečerpávacích (4%). Celková výroba elektrické energie v ČR přesáhla v roce 2010 hodnotu 85 TWh.



Obr. 1.9: Struktura výroby elektrické energie v ČR (2010) [12]

Využití obnovitelných zdrojů energie v České republice představuje velmi malou část z objemu hrubé spotřeby primárních energetických zdrojů. Pro Českou republiku byl při vstupních jednáních do EU odsouhlasen národní indikativní cíl 8% výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů v roce 2010. K datu 31.12. 2010 byl podíl OZE na tuzemské hrubé spotřebě elektrické energie 8,24%. Podíl jednotlivých obnovitelných zdrojů je vidět na obrázku 1.10.



Obr. 1.10: Výroba elektické energie z OZE v ČR (2010) [1]

V tabulce 1.1 jsou uvedeny stavy instalovaného výkonu a výroby elektrické energie v České republice k polovině roku 2011. Předpokládaný podíl obnovitelných zdrojů energie na výrobě v České republice je 13% v roce 2020. Tento odhad vychází především z dostupného energetického potenciálu jednotlivých OZE v ČR.

OZE v ČR - aktuální údaje				
Typ zdroje	Instalovaný výkon (MW)		Výroba (GWh)	
	k 30.6. 2011	k 30.6. 2010	1.-6. 2011	1.-6. 2010
Vodní elektrárna	2 198,4	2 189,4	1 481,3	1 784,8
Větrná elektrárna	1 060,9	963,0	185,2	157,4
Fotovoltaické elektrárny	1 973,7	569,2	1157,1	256,7
Biomasa	-	-	813,10	742,20
Bioplyn	-	-	333,9	241,2
Skládkový plyn			49,2	40,8

Tab. 1.1: Instalovaný výkon a výroba z OZE v ČR [1], [13]

1.1.5 Energetický potenciál OZE v ČR

Vodní energetika

V ČR nejsou přírodní poměry pro budování vodních energetických děl ideální. Naše toky nemají potřebný spád ani dostatečné množství vody. Podíl výroby elektrické energie ve vodních elektrárnách na celkové výrobě v ČR - tj. na produkci uhelných elektráren, JE Dukovany a JE Temelín – je poměrně nízký. V minulých letech k jeho dalšímu snížení přispělo i poškození vodních elektráren vltavské kasádky povodněmi v roce 2002. Určitý potenciál skýtají možnosti výstavby malých

vodních elektráren a rekonstrukce stávajících, již nevyhovujících, zařízení vodních elektráren, čímž můžeme dosáhnout zvýšení účinnosti přeměny energie vody.

Pro využití vodní energetiky jsou na našem území z hlediska průměrných průtoků energeticky nejpříznivější řeky Labe, Vltava a Morava. Ostatní toky poskytují možnosti výstavby vodní děl s menší výrobní kapacitou. Nejvíce je energeticky využita Vltava, na níž byla postavena kaskáda vodních elektráren o celkovém instalovaném výkonu asi 750 MW (obrázek 1.11).

V porovnání s energetickými výrobny využívající fosilní paliva, mají vodní elektrárny několik výhod: [2]

- možnost rychlého a hospodárného spouštění a odstavení,
- jednoduchý technologický proces výroby s možností úplné automatizace provozu a dálkového ovládání,
- vysoká pohotovost k výrobě při nízké poruchovosti,
- vysoká účinnost přeměny mechanické energie vodního toku na energii elektrickou,
- neznečišťují okolí exhalacemi a odpady z výroby.



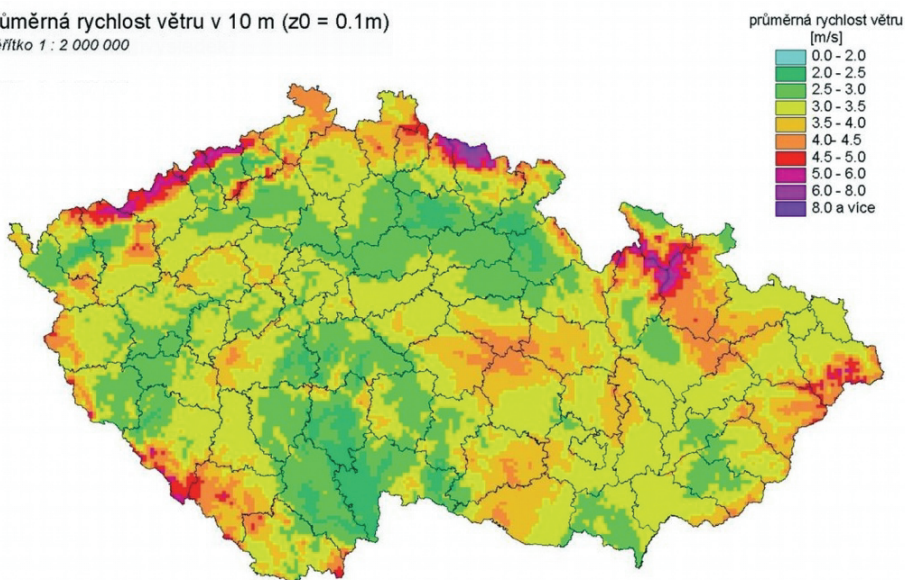
Obr. 1.11: Schéma Vltavské kaskády vodních elektráren [2]

Větrná energetika

V zemích střední Evropy nejsou větrné podmínky příliš příznivé, proto se zde větrné elektrárny používají jen v menším rozsahu. V ČR jsou příznivé větrné podmínky převážně pouze v horských oblastech a na vrchovinách. Podle provedeného posouzení větrné situace u nás by bylo možné vyrobit ročně větrnými elektrárnami 1 až 3 miliony MWh, tedy jen několik málo procent vyráběné elektrické energie.

Jednou z výhod větrné energie je skutečnost, že při výrobě nejsou produkovány žádné škodlivé emise. Tím, že Česká republika není přímořskou zemí, je v našich geografických podmínkách problém s intenzitou větru a výběrem správné lokality pro výstavbu větrné elektrárny. Ve vybrané lokalitě by se průměrná roční rychlost větru měla pohybovat nad hranicí $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Na obrázku 1.12 je zobrazena větrná mapa České republiky, ze které je patrné, že počet větrných lokalit vhodných k instalaci větrných elektráren je značně omezený. Dolní hranice energetického využití větru se pohybuje okolo rychlosti $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a horní hranice se pohybuje okolo hodnoty $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při rychlostech větru nad $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ jsou obvykle větrné elektrárny z bezpečnostních důvodů odstavovány.

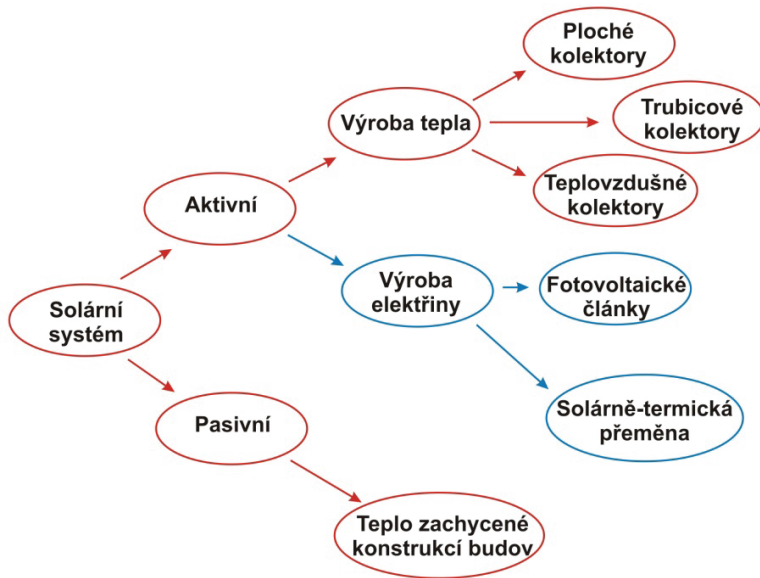
průměrná rychlost větru v 10 m ($z_0 = 0.1\text{m}$)
měřítko 1 : 2 000 000



Obr. 1.12: Větrná mapa ČR [14]

Sluneční energetika

S využitím aktivních nebo pasivních solárních systémů můžeme sluneční energii využít na výrobu tepelné nebo elektrické energie. Základní rozdělení systémů využívajících sluneční energie je zobrazeno na obrázku 1.13.



Obr. 1.13: Rozdělení solárních systémů dle způsobu využití sluneční energie [3]

Tepelné solární systémy

Návrh systémů využívajících sluneční záření je otázkou hlavně ekonomickou, při jejímž řešení se vychází z ceny solárního systému, zejména kolektorů nebo absorbérů. U nízkoteplotních systémů, pracujících s teplotami do 50 až 60°C se nejčastěji používají ploché kolektory, méně často koncentrující nebo vakuované. Konstrukce kolektoru je vždy určitým kompromisem mezi teoretickými poznatky a výrobními možnostmi. Pro tyto systémy jsou obecně výhodnější kolektory jednoduché, jež mají sice nižší účinnost, ale jsou levnější, v provozu spolehlivé při dostatečné životnosti.

V pasivních solárních systémech je získané teplo transportováno konvekcí, tedy *pohybem vzduchu*. Pasivní využívání solární energie předpokládá především vhodné stavební řešení objektu. Jelikož pasivní využívání solární energie, podobně jako aktivní, zajistí krytí jen určité části nároků na vytápění, je třeba hledat řešení, které zajistí i krytí zbývajících, respektive rozhodujících částí nároků. Předpokladem pro provoz konvektivního systému je dostatečně intenzivní přímé záření.

V poslední době se věnuje zvýšená pozornost solárním absorbérům. Uplatňují se jako tzv. absorpční střechy, popř. absorpční fasády. V těchto případech plní absorbéry dvojí funkci:

- přeměňují sluneční záření na tepelnou energii sice s menší účinností, zejména při vyšších teplotách ohřívání látky, ale na druhou stranu s velkým povrchem a při nízké ceně,

- chrání budovu před povětrnostními vlivy a tím přebírají funkci normální střechy či fasády.

Přechod mezi pasivními systémy a aktivními systémy s kolektory představují hybridní systémy. Jejich konstrukce může být provedena například tak, že se na osluněné jižní straně budovy zavěsí transparentní skleněná deska, a tak se vytvoří jednoduchý vzduchový kolektor. Vzduch proudící za sklem je ohříván slunečním zářením a následně je využit pro vytápění místnosti. Výhodou takového systému je, že v letním období může takto vytvořená energetická fasáda sloužit k odvedení nadměrného tepla, tzn., že může být využita pro chlazení.

Aktivní sluneční soustava se skládá z aktivního sběrače (kolektoru), akumulátoru tepla, potrubí slunečního okruhu, armatur, čerpadla, popř. ventilátoru a otopné soustavy. Sluneční energie se zachycuje ve sběrači, přeměňuje se v teplo, které se vhodnou látkou přepravuje do akumulátoru tepla, kde se skladuje. Takovou látkou je zpravidla nemrznoucí kapalina, ale může být použit i vzduch. Při aplikaci kapaliny se z hygienických důvodů (nemrznoucí směsi jsou jedovaté) odděluje sluneční a vytápěcí okruh.

Při ohřevu teplé užitkové vody se požaduje vyšší bezpečnost, která se zabezpečuje dvojitým oddělením, tj. umístěním výměníku slunečního okruhu a výměníku teplé užitkové vody do společného vodního akumulátoru. Základním článkem soustavy jsou kolektory, které mohou být několika typů a prakticky jsou výrobcem chráněným vzorem a nedílnou součástí kompletního systému.

Fotovoltaické solární systémy

Výroba elektrické energie využitím přímé přeměny slunečního záření je známa již z 19. století. Samotný rozvoj fotovoltaických aplikací je závislý na technické úrovni a znalostech z oblasti fyziky polovodičů.

V průběhu poslední dekády minulého století se výstavba fotovoltaických elektráren omezila na ostrovní systémy pro nezávislé napájení objektů a zařízení v lokalitách bez připojení na rozvodnou síť. První sluneční elektrárna o výkonu 10 kWp byla v ČR uvedena do provozu až v roce 1998 na vrcholu hory Mravenečník v Jeseníkách. Celosvětový meziroční nárůst výroby solárních panelů se po roce 2000 pohybuje okolo 35 %. Celkový instalovaný výkon slunečních elektráren byl v roce 2010 přibližně 30 GWp. I tak podíl fotovoltaiky na celkové produkci elektrické energie ve světě stále představuje pouze asi 0,01 %. ČR je v současné době třetím největším provozovatelem slunečních elektráren na světě (1,9 GWp – 31.12.2010).

Podrobněji jsou fotovoltaické systémy popsány v kapitole 3. – *Fotovoltaika*.

1.2. Jednotky v energetice

Mezinárodními dohodami byla zavedena Mezinárodní měrová soustava SI umožňující celosvětovou spolupráci techniků a vědeckých pracovníků. Hlavní jednotky soustavy SI nezbytné pro technická řešení jsou doplňovány jednotkami vedlejšími. Pro laika je orientace v mnoha využívaných vedlejších jednotkách obtížná.

Nejmenší jednotkou výkonu je jeden Watt (W), jehož rozměr je $(Nm.s^{-1})$. Působením výkonu jednoho Wattu po dobu jedné sekundy získáme energii jednoho Joule (J), tj. jedné Wattsekundy

$$1J = 1Ws \quad (1.2).$$

Tato nejmenší jednotka energie se v oboru energetických zdrojů jako informativní používá minimálně. Využívanou časovou jednotkou je hodina (h), popřípadě rok (r).

$$1Wh = 3600 Ws = 3600 J \quad (1.3),$$

$$8760 Wh = 1 Wr \quad (1.4).$$

Nyní je nutno upozornit na vazbu mezi vyprodukovanou energií a výkonem. Pokud známe hodnotu vyprodukované energie za hodinu uvedenou v kWh, souhlasí její číselná hodnota s výkonem zařízení v kW, což lze demonstrovat nejlépe na příkladech:

- 1) Energii 1000 kWh vyprodukuje generátor (např. větrný motor), pracuje-li s výkonem 1000 kW po dobu jedné hodiny.
- 2) Energii 400 GWh můžeme popsat jako práci 200 MW turbíny po dobu 2000 hodin.
- 3) Stejným způsobem můžeme převést elektrickou energii vyprodukovanou v ČR za rok ($WR = 80000$ GWh) – podělením počtem hodin (8760 h) dostaneme 9,1 GWr, což znamená, že celoroční průměrný výkon P_{CR} všech elektráren je 9,1 GW.
- 4) Energii 500 MWr (megawattroků) dodá vodní turbína, je-li s výkonem 500 MW v činnosti po dobu jednoho roku, tj. 8760 h.

Mezinárodní SI soustavou jsou zavedeny tyto násobky jednotek:

Kilo (k) = 10^3	$1 kWh = 3,6 \cdot 10^6 J = 3,6 MJ$
Mega (M) = 10^6	$1 MJ = 0,2777 kWh$
Giga (G) = 10^9	$1 GJ = 277,7 kWh$
Tera (T) = 10^{12}	$1 TJ = 277,7 MWh$
Peta (P) = 10^{15}	$1 PJ = 277,7 GWh = 31,7 MWr$
Exa (E) = 10^{18}	$1 EJ = 277,7 TWh = 277,7 \cdot 10^9 kWh = 31,7 GWr$

Tab. 1.2: Násobky jednotek SI [1], [10]

Vzhledem k tomu, že vztahy mezi výkonem a energií se popisují nejlépe s využitím jednotek odvozených z (Wh) a u velkých kvant energie z (Wr), jsou jednotky odvozené z (J) používány jen výjimečně.

1.3. Energie

Energie je schopnost hmoty konat práci (působit silou po dráze). Těleso nebo pole, které nemá energii, nemůže konat práci. Konáním práce se energie mění z jednoho druhu na jiný, celkové množství energie zůstává stejné (platí Zákon zachování energie).

Zákon zachování energie říká, že energii nelze vyrobit ani zničit, ale pouze přeměnit na jiný druh energie.

Zákon zachování energie je fyzikální zákon, který zní:

Celková energie izolované soustavy zůstává konstantní při všech dějích, které v ní probíhají. Nebo jinak Jestliže těleso nebo hmotný systém nepodléhá účinkům okolí, pak součet kinetické a potenciální energie částic, z nichž se skládá, zůstává stálý – to znamená, že v soustavě se může měnit jeden druh energie v druhý.

Druhá formulace zákona: *Není možné sestrojít perpetuum mobile prvního druhu, tj. stroj který by z ničeho konal práci.*

Energie jako fyzikální veličina vyjadřuje množství energie. Velikost práce, které těleso nebo pole vykoná, se rovná úbytku jeho energie.

Práce ve fyzikálním smyslu je působení síly na těleso, při kterém dochází k posouvání tohoto tělesa. Velikost práce lze vypočítat jako součin složky síly ve směru pohybu a dráhy, po kterou se těleso posunulo.

Druhy energie se rozlišují např. podle druhu síly, která působí, podle zdroje, který energii vydává, ap.:

- Mechanická energie
- Kinetická energie (Pohybová energie)
- Potenciální energie (Polohová energie)
 - Gravitační potenciální energie
 - Potenciální energie pružnosti
 - Tlaková potenciální energie
- Elektrická energie
- Magnetická energie
- Energie záření
- Energie vln
- Vnitřní energie
 - Tepelná energie je spojena s chaotickým pohybem (vibrací a rotací) molekul.
 - Jaderná energie

- Chemická energie (Chemická potenciální energie, Energie chemické vazby, Vazebná energie)
- Sluneční energie
- Vodní energie
- Větrná energie
- Geotermální energie
- Energie mořských vln
- Parní energie
- Svalová energie
- Energie ohně

1.4. Exergie a anergie

Pojem energie u energetika se nekryje s pojmem energie u fyzika. Běžné výrazy z energetiky jako „spotřeba energie“, „ztráta energie“ se nehodí k fyzikálním pojmům energie, neboť energii nelze spotřebovat a také se nemůže ztratit.

Pojmy uvedené výše nabývají smyslu, spojíme-li je s pojmem exergie.

1.4.1 Exergie “E”

Exergii lze definovat jako transformovatelnou část energie – část energie, kterou lze přeměnit na mechanickou práci. V ideálních vratných procesech se exergie libovolně mění (transformuje) na jiný druh energie. U skutečných procesů dochází ke ztrátám exergie a v konečném stavu k úplné spotřebě exergie, která se mění na *anergi*.

1.4.2 Anergie “B”

Anergie je definována jako transformovatelná část energie, která se již v procesech dále nemění a nemůže konat práci. Je však podstatným činitelem u některých procesů, jako je např. spalování, chemické procesy, izotermická komprese, vytápění a některých dalších.

Exergie a anergie jsou veličiny komplementární. Díl energie, který není exergií je anergie. Všechny neomezeně transformovatelné energie jsou čistou exergií, omezeně transformovatelné formy obsahují exergii a anergii, energie okolí se skládá jen z anergie.

Omezenou transformovatelnost energie vyjadřuje druhá věta termodynamiky, podle níž ne všechny procesy jsou možné. Obecně se to projevuje rozlišením mezi procesy vratnými a nevratnými. V přírodě jsou všechny procesy nevratné. Vratné procesy jsou mezní případy nevratných procesů. Obrácení nevratných procesů je nemožné.

Formulace první a druhé věty pomocí exergie a anergie:

1. Věta (zákon o zachování energie $dq = du + pdv$):

- při všech procesech zůstává součet exergie a anergie konstantní

2. Věta:

- je nemožné přeměnit energii na exergii

Používání druhé věty pro transformaci má následující důsledek – tlak a teplota okolí, v němž probíhají pozemské procesy, ovlivňují transformace energií. Okolím je myšlena atmosféra nebo voda řek a moří. Okolí tedy slouží jako zásobník energie velkých rozměrů, jehož stavové veličiny zůstávají přes přijímání či odnímání prakticky nezměněné a jsou dány energetickou rovnováhou na zemské kouli. Takže pro každého inženýra je běžnou skutečností, že výše teploty okolí ovlivňuje výrobu elektrické energie v tepelné elektrárně (teplota chladící vody) nebo, že se plynová turbína prosadila mnohem dříve jako hnací letecká jednotka než jako stacionární zařízení (výtlačná práce proti tlaku atmosféry ve výškách je menší).

Energie nashromážděná v okolí pozbyla své transformovatelnosti a je tedy energií v tomto pohledu nejpodařenější. To platí i pro všechny systémy, které jsou z okolím v rovnováze.

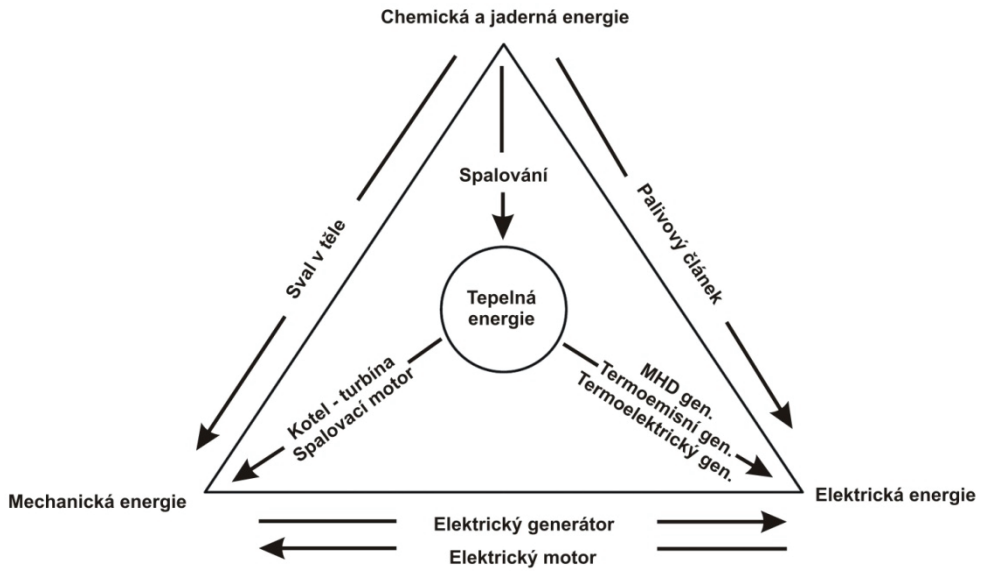
1.5. Transformace energie

Přímé využití primárních zdrojů je možné jen zřídka. Obvykle se zušlechťují podle požadavku jejich využití, dopravy, akumulací atd. Pojem *ušlechtilá energie* je pojem technicko-ekonomický. Základní energetické přeměny jsou znázorněny na obrázku 1.14. Otázky spojené s trvalou přeměnou tepelné energie na mechanickou práci jsou řešeny od počátku technického vývoje. S touto přeměnou je svázána přeměna energie chemické, jaderné i sluneční.

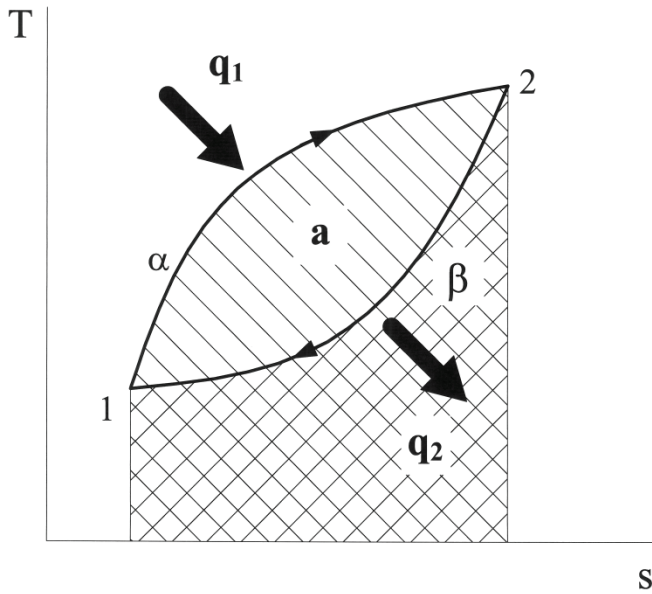
Druhou větu termodynamiky můžeme popsat mnohazpůsoby. Pro popis transformace energie ji můžeme popsat ve smyslu, že teplo nemůže samovolně přecházet z chladnějšího tělesa na teplejší a přeměna tepla v mechanickou práci může proběhnout jen v omezené míře. V praxi to znamená, že ačkoliv některé druhy energie lze přeměnit na tepelnou energii téměř beze ztrát, při opačném pochodu je její značná část, kterou již transformovat nelze (anergie), odváděna do okolí.

K trvalému získávání práce slouží termodynamické oběhy, kde obhájící pracovní látka přenáší tepelnou energii mezi dvěma tepelnými zásobníky. Tepelný oběh se skládá z několika na sebe navazujících stavových změn obíhající pracovní látky, po jejichž vykonání je dosaženo původního stavu, takže oběh se může opakovat.

Obecný oběh je znázorněn v entropickém T-s diagramu na obrázku 1.15. V průběhu stavových změn po křivce α z bodu 1 – 2 přijímá pracovní látka teplo Q_1 z tepelného zásobníku. K dosažení periodicity se opakujícího oběhu je potřeba pracovní látku přivést znovu do výchozího stavu 1. Toto je dosaženo stavovými změnami probíhajícími po křivce β , při kterých je odváděno teplo Q_2 do nízkoteplotního zásobníku. Změny, při nichž se teplo látky přivádí nebo odvádí, nemusí být obecně shodné se změnami, při nichž se získává nebo spotřebovává práce. Obecně však platí, že práce oběhu je dána rozdílem přivedeného a odvedeného tepla. Z takového oběhu lze získávat práci trvale. Získaná práce je na obrázku znázorněna plochou mezi křivkami α a β .



Obr. 1.14: Diagram transformací energie [10], [1]



Obr. 1.15: Obecný termodynamický oběh v T-s diagramu [10], [1]

1.6. Literatura

- [1] Mastný, P., Studijní podklady předmětu Malé zdroje elektrické energie, 2011, Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně
- [2] Matoušek, A., Výroba elektrické energie, skriptum, UEEN FEKT VUT v Brně, Vutium 2007, Brno, ISBN: 978-80-214-3317-5
- [3] Mastný, P., *Využití znalostních technologií pro podporu návrhu energetických systémů v budovách*, Habilitační práce, Brno 2010, Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 123 stran
- [4] Webové stránky Energydata – <http://www.enerdata.net/enerdatauk/>, cit. 17.11.2011
- [5] Webová stránka WIKIKNIHY – Energetické zdroje naší planety a jejich využití, dostupné z WWW:
http://cs.wikibooks.org/wiki/Energetick%C3%A9_zdroje_na%C5%A1%C3%AD_planety_a_jejich_vyu%C5%BEit%C3%AD, cit. 1.10.2010
- [6] Webová stránka Wikipedie – http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_energetika, cit. 15.9.2011
- [7] Webová stránka Wikipedie – http://cs.wikipedia.org/wiki/Obnoviteln%C3%A9_zdroje_energie, cit. 16.12.2011
- [8] Zákon o životním prostředí – <http://aplikace.mvcr.cz/archiv2008/sbirka/1992/sb004-92.pdf>, cit. 25.11.2010
- [9] Zákon o odpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie a o změně některých zákonů (zákon o podpoře obnovitelných zdrojů) – <http://aplikace.mvcr.cz/archiv2008/sbirka/2005/sb066-05.pdf>
- [10] Kaminský, J., Vrtek, M., *Obnovitelné a alternativní zdroje energie*, Interní učební texty – skriptum, 2002, VŠB Ostrava
- [11] Kadmožka, J., Energie a globální oteplování – Země v proměnách při opatřování energie, Vutium 2006, VUT v Brně, ISBN: 80-214-2919-4
- [12] Webové stránky společnosti ČEZ, a.s. – <http://www.cez.cz/cs/uvod.html>
- [13] Webové stránky Energetického regulačního úřadu – <http://www.eru.cz>
- [14] Webové stránky Czech RE Agency – <http://www.czrea.org>
- [15] Mastný, P., Využití odpadního tepla v EDU, diplomová práce, Brno 2000, Ústav elektroenergetiky FEI VUT v Brně

2. Větrná energetika

Energie větru je člověkem využívána již několik století. První zmínky o větrném motoru s vodorovnou osou jsou ze 3. století před Krystem z Egypta. Na evropském kontinentu se začaly větrné mlýny využívat od 13. století. V této době byl v této oblasti zaznamenán velký rozmach především v Holandsku, které se ve 14. století dostalo na první pozici ve využívání větrné energie. Větrná energie byla v této době využívána především pro mletí obilí, čerpání vody a zpracování dřeva (obrázek 2.1). Pro Holandsko bylo velmi typické spojení větrného rotoru s Archimédovým šroubem, které se využívalo k odvodňování nebo zavlažování zemědělských pozemků (obrázek 2.2).

Začátkem 19. století dochází k dynamickému rozvoji využívání větrné energie v USA, kde bylo v této době postaveno více než 6 milionů malých mnoholopatkových větrných motorů, které byly využívány především pro čerpání vody.



Obr. 2.1: Větrný mlýn – pila



Obr. 2.2: Archimédův šroub

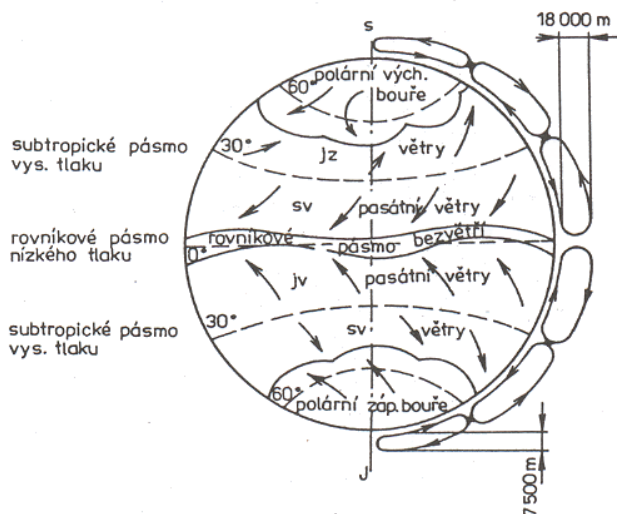
Na začátku 19. století byla realizována první aplikace využívající větrnou energii pro výrobu energie elektrické (Poul la Cour 1891). Avšak vzhledem k objevení a vývoji parního stroje došlo v závěru 19. století k útlumu rozvoje využívání větrné energie.

V současné době došlo k obnově zájmu o využívání větrné energie a to především pro výrobu elektrické energie. Tento „boom“ větrné energetiky souvisí se snahou omezení nepříznivých vlivů při využívání fosilních paliv pro výrobu energie a s tím související snaha o snížení emisí skleníkových plynů v atmosféře.

2.1. Vítr jako energetický zdroj

Vítr vzniká vlivem nerovnoměrného ohřevu zemského povrchu slunečním zářením. Od ohřátého povrchu se ohřívá přilehlá vrstva vzduchu a teplý vzduch má tendenci stoupat vzhůru. Celý děj je silně ovlivněn rotací Země a střídáním dne a noci, což má za důsledek vznik tlakových rozdílů v zemské atmosféře. Vyrovnaním tlakových rozdílů vzniká vítr, který vane vždy od tlakové výše k tlakové níži. Kolem

tlakové níže na severní polokouli jde spinální pohyb proti směru hodinových ručiček, u tlakové výše ve směru hodinových ručiček. Na jižní polokouli je smysl rotace u tlakové výše a níže opačný (viz. obrázek 2.3). [1], [9]



Obr. 2.3: Princip vzniku větru [9]

Z hlediska využívání větrné energie je nejdůležitějším faktorem rychlost větru, která má majoritní vliv na celkový i využitelný výkon větru. Rychlost větru je ovlivňována členitostí zemského povrchu a platí, že směrem k němu klesá. V rovinném terénu pro rychlost větru platí

$$\frac{v^*}{v_0^*} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^n \quad (2.1),$$

kde

v^* průměrná rychlost větru ve výšce h nad zemským povrchem

v_0^* průměrná rychlost větru ve výšce h_0

n drsnost povrchu (viz. tabulka 2.1)

Typ povrchu	n
<i>a – hlaký povrch (vodní hladina, písek)</i>	0,14
<i>b – louka s nízkým travnatým porostem, ornice</i>	0,16
<i>c – vysoká tráva, nízké obilné porosity</i>	0,18
<i>d – porosity vysokých kulturních plodin</i>	0,21
<i>e – lesy</i>	0,28
<i>f – vesnice a malá města</i>	0,48

Tab. 2.1: Typy povrchů [9]

Pro snadnější výpočet rychlosti větru jsou výše uvedené exponenty poměrné hodnoty rychlosti větru vyjádřeny korekčním součinitelem k_h při odchylce údaje v referenční výšce 10 m nad povrchem, jak je uvedeno v tabulce 2.2. Pro rychlost větru pak můžeme napsat rovnici ve tvaru

$$v_h^* = k_h \cdot v_{10}^* \quad (2.2),$$

Druh povrchu	Výška h (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
a	0,91	1,00	1,06	1,10	1,14	1,17	1,19	1,21	1,23	1,25
b	0,90	1,00	1,07	1,12	1,16	1,19	1,22	1,25	1,27	1,29
c	0,88	1,00	1,08	1,13	1,18	1,22	1,25	1,28	1,31	1,34
d	0,86	1,00	1,09	1,16	1,21	1,26	1,30	1,34	1,37	1,40
e	0,82	1,00	1,12	1,21	1,29	1,36	1,42	1,47	1,52	1,57
f	0,72	1,00	1,21	1,39	1,55	1,69	1,82	1,95	2,06	2,17

Tab. 2.2: Hodnoty korekčního součinitele k_h [3]

Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím rychlost větru jsou různé uměle vytvořené překážky (budovy), za kterými rychlost větru klesá, mění se jeho směr a vytvářejí se větrné víry. Tyto turbulentní změny značně zvyšují namáhání větrných rotorů instalovaných v blízkosti těchto překážek. Platí, že prostor zasažený turbulentním prouděním se za překážkou zvedá až do její trojnásobné výšky. [3]

2.1.1 Energie a výkon větru

Energie pohybující se hmoty vzduchu je možno vyjádřit následující rovnicí (2.3), kde v představuje rychlost vzduchu a m hmotu.

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2.3)$$

Pro hmotu m platí vztah

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s \quad (2.4),$$

kde

A plocha, kterou daný objem vzduchu protéká

s dráha, kterou urazí pohybující se vzduch

Z výše uvedených vztahů je možno velmi jednoduše odvodit rovnici pro výkon větru protékajícího jednotkovou plochou. Z výsledné rovnice (2.7) vyplývá, že výkon větru protékající jednotkovou plochou je přímo úměrný hustotě vzduchu a třetí mocnině rychlosti větru. Závislost výkonu větru P_v protékajícího jednotkovou plochou 1 m² na rychlosti větru je vidět na obrázku 2.4.

$$P_v = \frac{E}{A \cdot t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot t} \cdot v^2 \quad (2.5),$$

kde

$$\frac{s}{t} = v \quad (2.6)$$

Dosazením rovnice 2.6 do rovnice 2.5 získáme výslednou rovnici pro výkon větru.

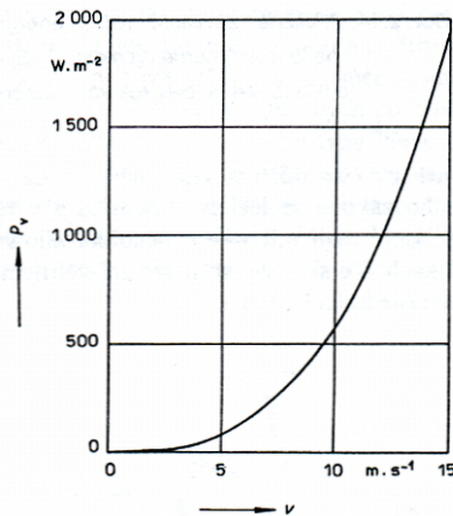
$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (2.7),$$

Rychlost větru i výkon větru jsou časově proměnné veličiny. S ohledem na tuto skutečnost můžeme pro energii větru protékajícího jednotkovou plochou za dané období napsat rovnici

$$E_v = \int_{t_0}^t P_v \cdot dt \quad (2.8)$$

V případě, že v daném časovém intervalu je teplota a hustota vzduchu konstantní, můžeme rovnici upravit do následujícího tvaru:

$$E_v = \frac{\rho}{2} \cdot \int_{t_0}^t v^3 \cdot dt \quad (2.9).$$



Obr. 2.4: Závislost výkonu větru protékajícího plochou 1 m^2 na jeho rychlosti [9]

2.2. Rozdělení větrných motorů

Větrné motory jsou zařízení, které se používají k přeměně kinetické energie větru na mechanickou energii. Ve větrných elektrárnách se nejprve kinetická energie větru přeměňuje v mechanickou energii, která je následně transformována v elektrickou energii. Rozdělení větrných elektráren může být provedeno podle mno-

ha různých hledisek, ale základní dělení je provedeno podle aerodynamického principu funkce větrného motoru, a to na:

- motory odporové
- motory vztlkové

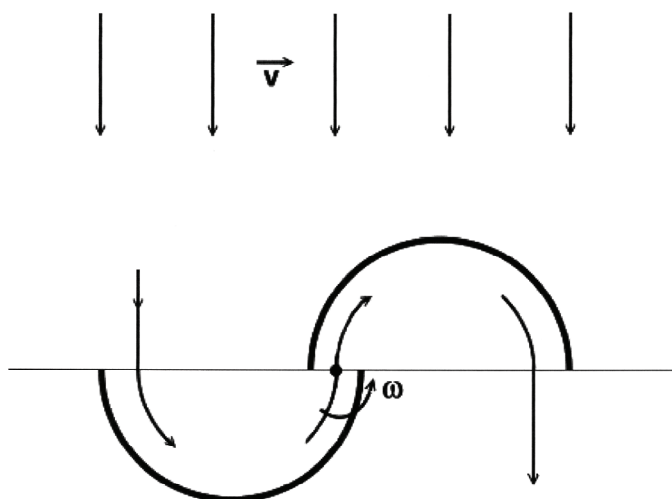
Další rozdělení větrných motorů může být provedeno podle uložení osy rotace (horizontální a vertikální), podle instalovaného výkonu a podle rychlostního součinitele (λ) na pomaluběžné a rychloběžné.

2.2.1 Větrné motory odporové

Z hlediska využití patří odporové větrné motory mezi nejstarší. Podstatou těchto motorů je skutečnost, že plocha nastavená proti větru mu vytváří aerodynamický odpor. Tím se na této ploše vytváří síla, která se mechanicky přeměňuje na rotační pohyb. Aby mohl u tohoto typu větrného motoru vzniknout hnací kroutící moment, musí být obvodová rychlost vždy menší než rychlost větru. Bez odběru energie z hřídele jsou otáčky úměrné rychlosti větru a při zdvojnásobení rychlosti větru se i otáčky zvýší dvojnásobně.

Větrné motory pracující na odporovém principu pracují s účinnostmi v rozmezí 15 – 23%, což je důvodem jejich nízkého výskytu v moderní energetické koncepci. Mezi klasické představitele tohoto typu větrného motoru patří například Savoniův motor (obrázek 2.5).

Savoniův motor je v základním provedení sestaven ze dvou svislých lopatek, které jsou uprostřed přibližně o 20% průměru rotoru předsazeny do protisměru. V této konfiguraci je část energie větru ze zadní strany „pasivní“ lopatky směřována na přední stranu „aktivní“ lopatky.



Obr. 2.5: Savoniův větrný motor [3]

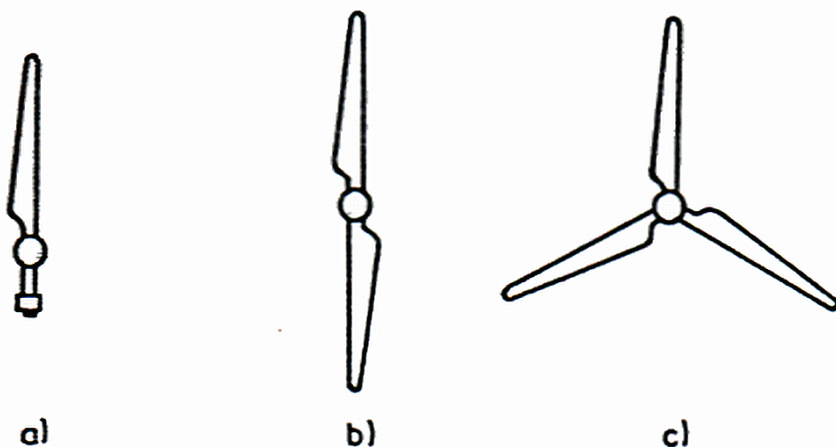
Výhody Savoniova motoru (a odporových motorů obecně) můžeme shrnout do několika bodů:

- jednoduchá konstrukce
- nezávislost na směru větru – není potřeba otáčení rotoru do směru větru
- přímý přenos krouticího momentu na hřídel
- využití širokého pásma síly větru – využitelná rychlost větru již od $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Za hlavní nevýhody při využití větrných motorů na odporovém principu lze považovat malou rychloběžnost, nízké otáčky, vysoké hodnoty točivého momentu a nízký součinitel využití energie větru (malý dosažitelný elektrický výkon).

2.2.2 Větrné motory vztlakové

Mezi větrné motory pracující na vztlakovém principu patří rotory a větrná kola s vodorovnou osou otáčení, které jsou orientovány rovinou otáčení kolmo ke směru větru. Nejčastěji jsou vztlakové rychloběžné motory konstruovány jako dvou nebo třílísté, ale můžeme se setkat i s jednolístým nebo čtyřlístým provedením (obrázek 2.6). Příklady jednotlivých typů vztlakových motorů jsou znázorněny na obrázku 2.7a a 2.7b. Na vztlakovém principu pracují také větrné motory s vertikální osou. Příkladem takového motoru je motor Darrieus (obrázek 2.8), který může být v provedení dvoulístém, třílístém i čtyřlístém.

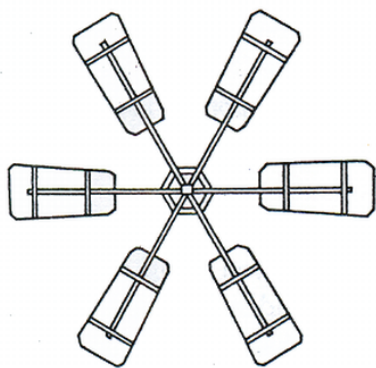


Obr. 2.6: Vztlakové motory a) jednolísté provedení s protizávažím b) dvoulísté provedení c) třílísté provedení [9]

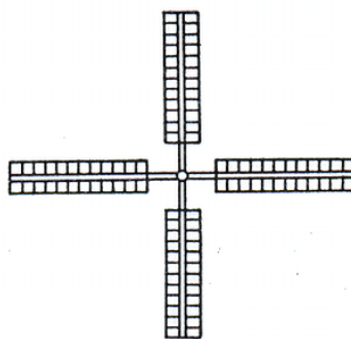
Rychloběžné axiální motory byly v posledních letech neustále zdokonalovány a jejich současná technická úroveň umožňuje dosažení vysokého součinitele využití (účinnost) a to přes 40%. Obvodová rychlost konců lopatek může u tohoto typu motoru dosahovat dvou až desetinásobku rychlosti větru.

Výhodou rychloběžných větrných motorů je jejich relativně nízká hmotnost. Naopak za určitou nevýhodu lze u tohoto typu provedení považovat zhoršený rozběh při nízkých rychlostech větru. Obvyklá rozběhová rychlost větru je u těchto

motorů kolem 5 m.s^{-1} . Tyto motory jsou velmi vhodné pro výrobu elektrické energie.

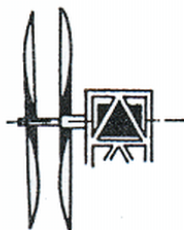


Rotor moderního větrného čerpadla se šesti plechovými lopatkami

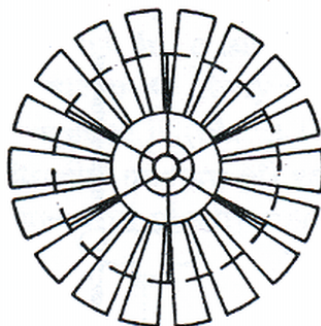


Jeden z typických rotorů větrného mlýna

Obr. 2.7a: Příklad provedení vztlakových rotorů [9]

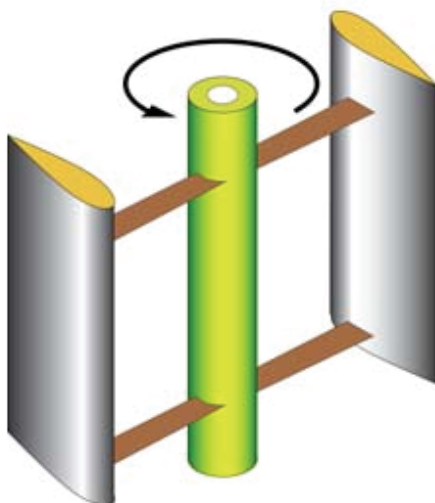


Uspořádání protiběžných rotorů větrné elektrárny



Větrné kolo tzv. amerického větrného motoru s větším počtem lopatek

Obr. 2.7b: Příklad provedení vztlakových rotorů [9]

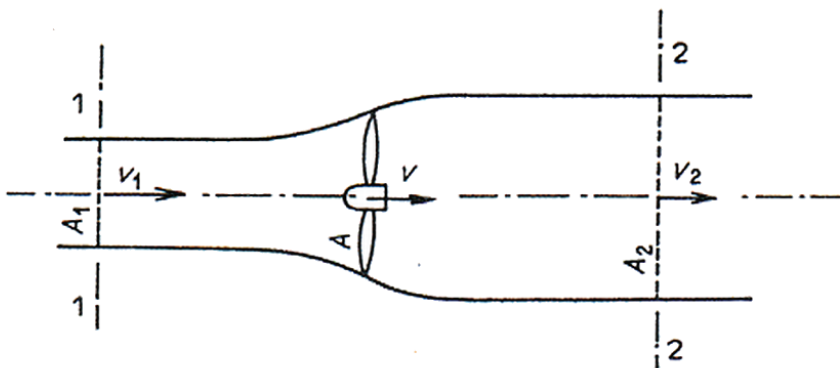


Obr. 2.8: Větrný motor typu Darrieus [12]

Princip funkce vztlkových motorů

Princip funkce vztlkových motorů vychází z rovnice kontinuity. Jak již bylo uvedeno výše, větrné motory jsou využívány k přeměně kinetické energie větru na mechanickou práci – zpomalují proud vzduchu, který protéká jejich pracovní plochou a tím odnímají větru část jeho energie. Obecné schéma přeměny kinetické energie na výkon je na obrázku 2.9. V prostoru omezeném proudovými plochami, jak je naznačeno na obr. 2.9, se nepřenáší hmota ani energie a proto můžeme tento stav popsat rovnicí kontinuity:

$$v_1 \cdot A_1 = v \cdot A = v_2 \cdot A_2 \quad (2.10).$$



Obr. 2.9: Princip funkce vztlkového rotoru – rovnice kontinuity [9]

Ze zákona zachování hybnosti můžeme dále odvodit axiální sílu (F_a) působící na listy větrného motoru. Pro axiální sílu platí rovnice:

$$F_a = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (2.11).$$

Výkon větru je následně definován rovnicí 2.12 a výkon určený ze změny kinetické energie (ΔE_k) proudu protékajícího vzduchu za jednu sekundu kontrolní plochou je definován rovnicí 2.13.

$$P = F_a \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (2.12)$$

$$P = \frac{\Delta E_k}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.13)$$

Srovnáním rovnic 2.12 a 2.13 můžeme definovat vztah pro rychlost v ve tvaru:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2.14).$$

Po úpravách pak můžeme pro axiální sílu F_a působící na listy větrného motoru a pro výkon větru P napsat rovnice v následujících tvarech:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.15).$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2) \quad (2.16).$$

Ideální účinnost přeměny kinetické energie na mechanickou můžeme definovat jako poměr výkonu motoru k výkonu větru. Při uvažování ideálního větrného motoru s nekonečným počtem lopatek pracujících bez aerodynamického odporu můžeme pro účinnost napsat vztah

$$\eta_i = \frac{(v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)}{2 \cdot v_1^3} \quad (2.17).$$

Výše uvedené rovnice popisují ideální stav – definují pouze výkon vzduchové hmoty. Pokud bychom chtěli definovat výkon větrného motoru protékajícího touto hmotou, je potřeba rovnici výkonu větru vynásobit součinitelem výkonnosti c_p . Součinitel výkonnosti udává, kolik energie z proudícího vzduchu se využívá na turbíně. Jeho maximální hodnota může teoreticky podle Netzova pravidla dosahovat $c_p = 0,59$. Hodnota součinitele výkonnosti není konstantní a je funkcí rychlosti větru. Obecně lze říci, že hodnota součinitele výkonnosti je při nízkých rychlostech větru nízká, při středních rychlostech dosahuje maximálních hodnot a při vyšších rychlostech opět klesá. [4]

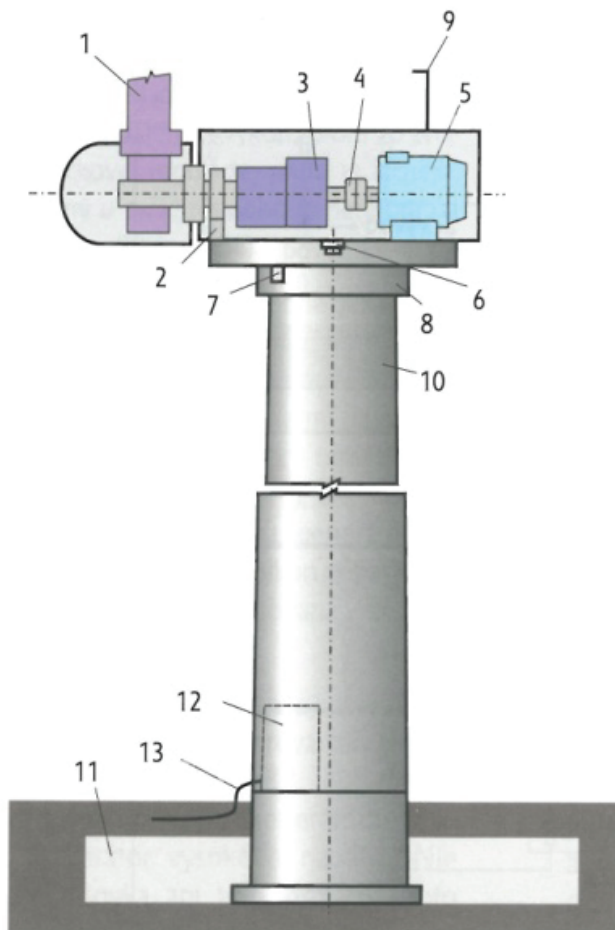
2.3. Elektrická zařízení větrných elektráren

Pro výrobu elektrické energie se ve větrných elektrárnách používají asynchronní a synchronní generátory.

Asynchronní generátor je v porovnání se synchronním jednodušší a finančně méně náročný a z hlediska provozu je spolehlivější. Nevýhodou asynchronního generátoru je malé rozpětí otáček. Naopak výhodou asynchronního generátoru je jeho jednoduchý rozběh, připojení na síť a regulace výkonu.

Synchronní generátor může být provozován pouze při synchronních otáčkách větrné turbíny. Aby bylo možné synchronní generátor provozovat v širším rozmezí otáček, je potřeba vyrobenou elektrickou energii usměrnit a následně opět s využitím třídače převést na frekvenci sítě.

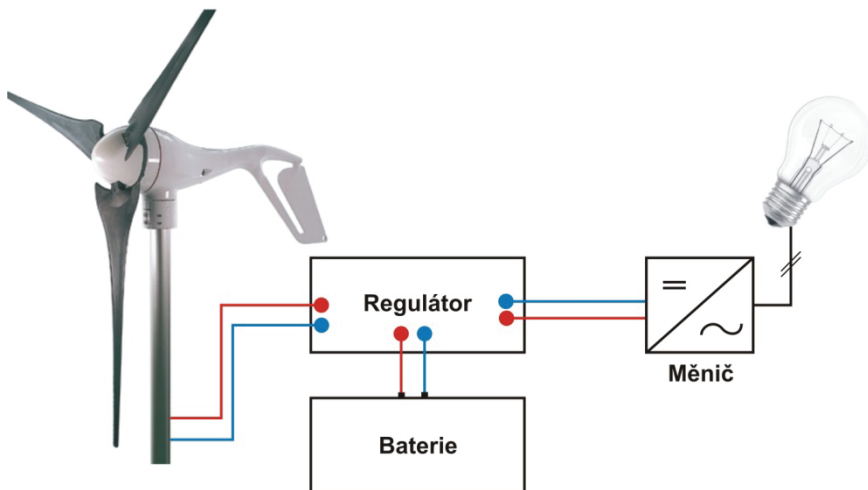
Typická konstrukce větrné elektrárny je zobrazena na obrázku 2.10. Větrná elektrárna se skládá z následujících základních částí: 1 – větrný motor s rotorovou hlavou, 2 – brzda rotoru, 3 – převodovka, 4 – spojka, 5 – generátor, 6 – servopohon pro natáčení strojovny, 7 – brzda strojovny, 8 – ložiska, 9 – senzor pro snímání rychlosti a směru větru, 10 – tubus elektrárny (stožár), 11 – betonový základ elektrárny, 12 – elektrorozvaděče silnoproudého zařízení a řídicího obvodu, 13 - elektrická přípojka.



Obr. 2.10: Větrná elektrárna – konstrukce [5]

2.3.1 Větrné elektrárny malých výkonů

U malých větrných elektráren s výkonem do 10 kW se pro výrobu elektrické energie využívají vícepólové synchronní generátory s permanentními magnety. Běžnou součástí těchto malých větrných elektráren je usměrňovač pro napájení akumulátorové baterie nebo autonomní stejnosměrné sítě. Elektrárny mohou být doplněny střídačem, umožňujícím napájení malých jednofázových spotřebičů. Příklad energetického systému s malou větrnou elektrárnou je zobrazen na obrázku 2.11.



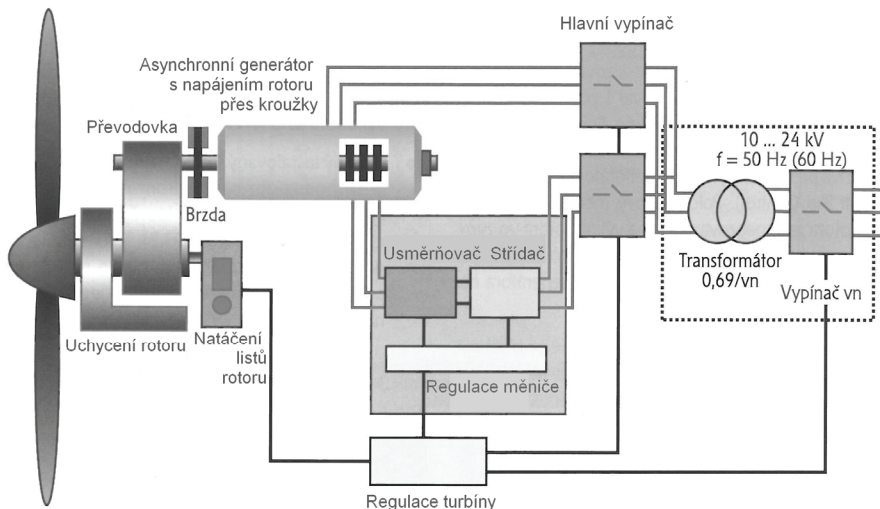
Obr. 2.11: Možnost zapojení malé větrné elektrárny

2.3.2 Větrné elektrárny středních a velkých výkonů

Ve větrných elektrárnách středních a velkých výkonů se pro výrobu elektrické energie využívají asynchronní motory s kotvou nakrátko pracující v generátorickém chodu. Jak již bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, výhodou asynchronních generátorů je jejich vysoká provozní spolehlivost, nenáročná údržba a nízké pořizovací náklady.

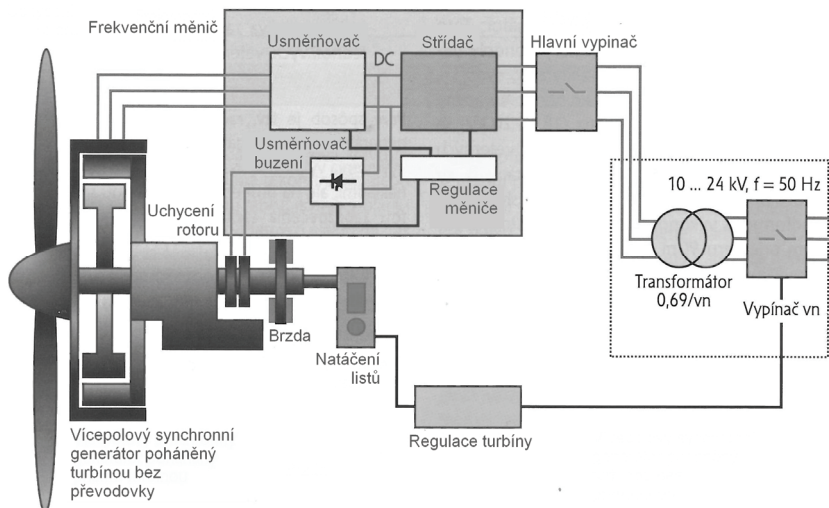
Nevýhodou při využití asynchronního generátoru, která plyne z malého regulačního rozpětí otáček generátoru, můžeme potlačit využitím asynchronního generátoru s napájeným rotorem (podsynchronní kaskáda), tzv. *double-fed induction generator*.

Toto zapojení se používá při vyšších instalovaných výkonech generátorů a umožňuje provoz generátorů i při nižších otáčkách turbíny – nízkých rychlostech větru. Příklad zapojení je na obrázku 2.12. Toto zapojení umožňuje provoz bez napájení rotoru v případě spojení rotorového vinutí nakrátko nebo v případě, že se do rotoru zapojí přídavné odpory, které umožní zvýšení rozsahu skluzu v generátorickém provozu sklonem momentové charakteristiky generátoru. [5]



Obr. 2.12: Asynchronní generátor s napájeným rotorem [5]

Synchronní generátory se využívají u větrných elektráren s velkým instalovaným výkonem nebo speciálního provedení. V současné době jsou poměrně velmi využívány synchronní generátory poháněné přímo turbínou bez převodovky. Konstrukčně jsou provedeny jako synchronní generátory s budícím vinutím na rotoru. Výhodou tohoto řešení je snížení hmotnosti gondoly větrné elektrárny, ale na druhou stranu se zvětší rozměry generátoru, ke kterému je dále připojen měnič frekvence s možností regulace celého jeho výkonu. Elektrárny v tomto provedení mohou pracovat v širokém rozpětí otáček turbíny. Příklad zapojení je na obrázku 2.13.

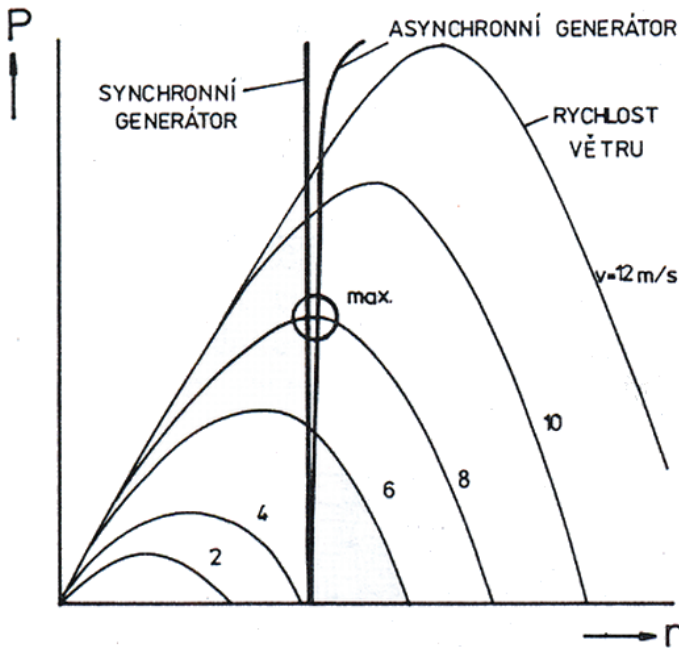


Obr. 2.13: Synchronní generátor poháněný přímo turbínou [5]

2.4. Regulace výkonu větrných elektráren

Větrné elektrárny jsou konstruovány tak, aby bylo možné při rychlostech větru kolem $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($54 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) docílit maximálního energetického výnosu. Stavět zařízení s maximem produkce při vyšších rychlostech se nevyplácí, protože tak vysoké rychlosti větru se vyskytují jen zřídka. V případě velmi silného větru se musí výkon větrných elektráren snížit, aby se zabránilo škodám na zařízení. [6]

Můžeme tedy konstatovat, že větrné elektrárny pracující při konstantních nebo téměř konstantních otáčkách využívají maximálního výkonu větru pouze při jeho jedné rychlosti (viz. obrázek 2.14). Minimální rychlost větru pro výrobu elektrické energie ve větrných elektrárnách je v rozmezí $3 - 5,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jmenovitý výkon je obvykle dosahován při rychlostech větru $13 - 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a při rychlostech převyšujících $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ jsou větrné elektrárny odstavovány.



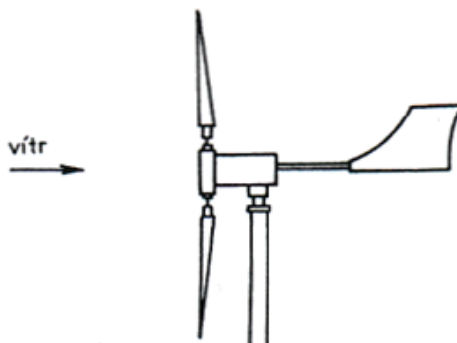
Obr. 2.14: Výkon a pracovní otáčky generátorů pro různé rychlosti větru [9]

Jak již bylo uvedeno, regulace výkonu je důležitá z hlediska ochrany proti překročení maximálních bezpečných otáček – omezují se otáčky i výkon pracovního stroje. Podle provedení větrných motorů existují dvě základní skupiny regulačních principů:

- pro větrné motory s pevnými lopatkami nebo listy
- pro větrné motory s natáčivými listy

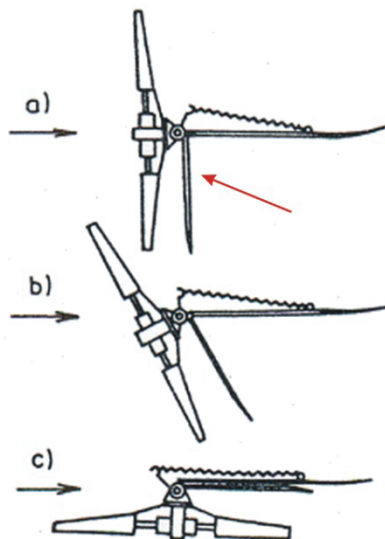
2.4.1 Regulace výkonu malých větrných elektráren

U malých větrných elektráren je maximální účinnosti transformace větrné energie dosahováno orientací rotoru do směru větru. Při nedodržení této podmínky dochází ke ztrátám výkonu. Jako natáčecí zařízení se u těchto elektráren používá směrové kormidlo (obrázek 2.15).



Obr. 2.15: Větrná elektrárna se směrovým kormidlem [9]

Pro regulaci otáček můžeme u malých větrných elektráren použít regulační kormidlo (obrázek 2.16a), které při určité rychlosti větru rotor natáčí. V případě mezních rychlostí větru dochází k úplnému odstavení a osa rotoru je kolmá ke směru větru (obrázek 2.16c). Tento způsob regulace je běžný u starších typů větrných elektráren, v dnešní době se i tyto malé jednotky konstruují jako rychloběžné, obvykle s výkonem do 1,5 kW. Jsou brzděny pomaluběžnými generátory s usměrňovačem a obvykle nejsou osazeny převodovkou.



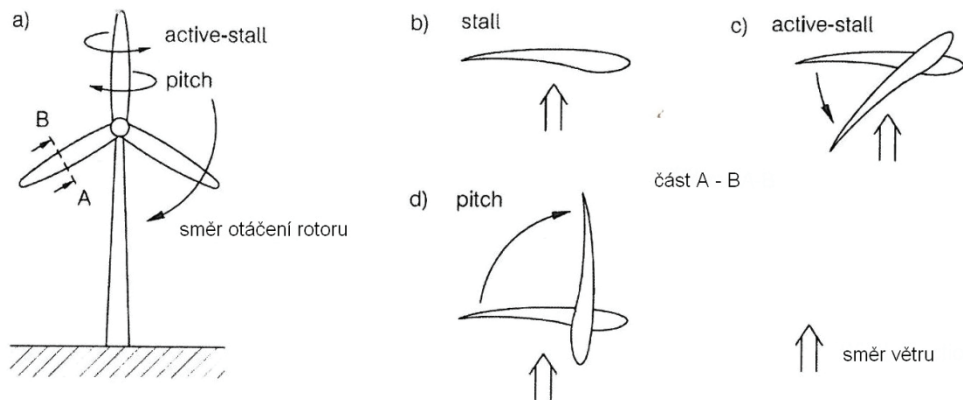
Obr. 2.16: Příklad regulace výkonu u malých větrných elektráren [9]

2.4.2 Regulace výkonu velkých větrných elektráren

Pro regulaci výkonu u velkých větrných elektráren se používají následující způsoby regulací:

- regulace STALL
- regulace PITCH
- regulace ACTIVE STALL
- regulace STALL-PITCH a PITCH-STALL

Obecně můžeme říci, že větrné elektrárny využívající regulaci STALL jsou konstrukčně jednodušší než elektrárny s regulací PITCH, protože nemají technický systém měnící nastavení listů rotoru. Princip jednotlivých regulací je naznačen na obrázku 2.17.



Obr. 2.17: Princip regulace STALL, PITCH a ACTIVE-STALL [7]

Regulace STALL

U tohoto způsobu regulace jsou lopatky pevně kotveny k rotoru a regulace je dána proměnným tvarem lopatek. Při nárůstu rychlosti větru dochází k elastické změně geometrie konce lopatky. To způsobí zvyšování úhlu náběhu na konec lopatky a postupné odtržení proudu vzduchu od lopatky. Laminární proudění se postupně mění na turbulentní, což má za následek snížení vztlaku a pokles momentu na hřídeli.

Nevýhodou tohoto způsobu regulace je skutečnost, že výkon rotoru při vysokých rychlostech větru klesá a tím klesá i jeho účinnost. Další nevýhodou je neschopnost rotoru samostatného rozběhu, což je v praxi realizováno elektrickým motorem. Běžně se systém STALL využívá u elektráren s výkonem do 1000 kW.

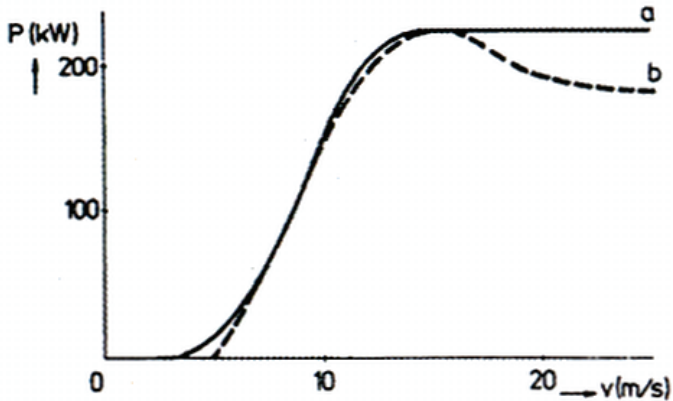
Regulace PITCH

Jedná se o aktivní regulaci, která pracuje se vstupním signálem výkonu generátoru. V případě, že výkon překračuje bezpečné meze, elektrický signál uvede v činnost hydraulický systém, který provede vychýlení lopatek rotoru. Vychýlení lopatek způsobí snížení vztlaku, větší radiální odpor lopatek a tedy snížení momentu na hřídeli. Poté, co se rychlost větru sníží, regulace způsobí opačným směrem a dojde k navýšení výkonu dle potřeby. Pro pohon hydraulického systému natáčení se používá zpravidla krokových motorů. Na obrázku 2.18 je vidět průběh výkonu při využití regulace PITCH (a) a STALL (b).

Konstrukce větrných turbín s touto regulací je náročnější což má za následek i menší provozní spolehlivost. Regulaci PITCH lze využít pro regulaci rozběhu elektrárny, ale především k omezení výkonu při vyšších rychlostech větru, aniž by došlo k výraznému snížení výkonu. Rychlost regulace je poměrně pomalá a proto regulace na moment, při velkých výkyvech rychlostí větru v blízkosti maximálního výkonu není dostatečně rychlá, aby zabránila přetěžování generátoru. V současnosti se proto začíná využívat už kombinované regulace PITCH-STALL.

Výhody regulace PITCH můžeme shrnout do několika bodů:

- aktivní kontrola výkonu v celém rozsahu rychlosti větru
- vyšší produkce energie oproti regulaci STALL
- jednoduchý start elektrárny změnou nastavení úhlu náběhu
- nejsou potřeba silné brzdy pro okamžité zastavení rotoru
- snižuje zatížení listů rotoru
- nižší hmotnost rotorových listů



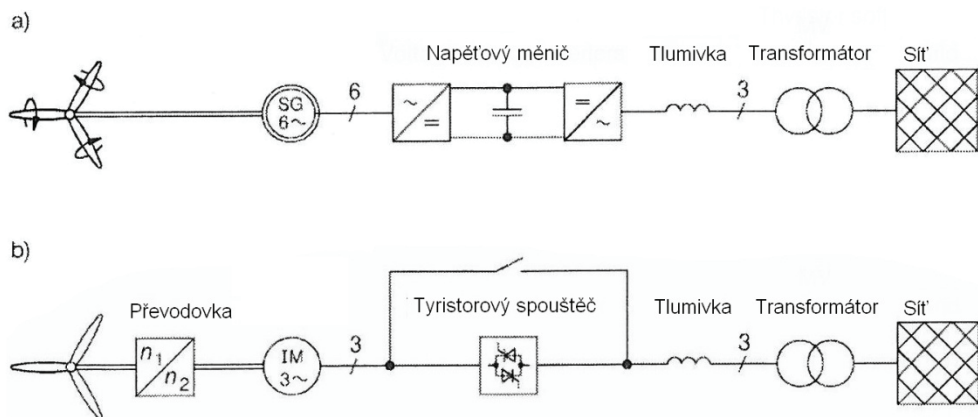
Obr. 2.18: Výkonová charakteristika regulace PITCH (a) a STALL (b) [9]

Blokové zapojení větrných elektráren využívajících regulaci PITCH a STALL je vidět na obrázku 2.19. Schéma a) představuje větrnou elektrárnu se synchronním generátorem využívající pro regulaci výkonu PITCH regulaci. Druhé blokové schéma představuje větrnou elektrárnu s asynchronním generátorem s výkonovou regulací STALL.

Regulace ACTIVE-STALL

Při využití tohoto způsobu regulace je rozběh elektrárny a provoz při malých rychlostech větru stejný jako u regulace PITCH. Při dosažení limitních hodnot výkonu dojde k natočení lopatek v opačném směru než je tomu právě u regulace PITCH. To způsobí zvýšení úhlu náběhu větru, odtržení proudu vzduchu a pokles vzlaku. Úhel natočení nemusí být tak vysoký jak by tomu bylo při regulaci PITCH a proto je možné reagovat na náhlé nárůsty rychlosti větru rychleji a předcházet přetěžování generátoru.

Výhodou této regulace oproti regulaci PITCH je menší citlivost na znečištění povrchu na náběžných hranách listů (např. hmyz).



Obr. 2.19: Zapojení větrných elektráren s různými typy regulací [7]

Kombinovaná regulace STALL-PITCH

Kombinovaná regulace STALL-PITCH vyžaduje vybavení turbíny jak natáče-nými listy, tak konstrukcí listů na regulaci STALL. Rozběh turbíny a pohyb při nízkých rychlostech probíhá v systému regulace PITCH. Při dosažení vysokých rychlostí způsobí regulace PITCH zhoršení situace přetížení listů, které zafungují jak je tomu u regulace STALL a změnou geometrie lopatek omezí moment. Při vysokých rychlostech se natáčením lopatek plynule udržuje výkon v maximálních hodnotách. Snazší a stabilnější udržování výkonového maxima je hlavní výhodou této regula-ce. Negativním jevem je vyšší hlučnost a větší ohyb lopatek než u regulace PITCH-STALL.

Kombinovaná regulace PITCH-STALL

Stejně jako u regulace STALL-PITCH je při nižších otáčkách využíváno PITCH regulace. Při dosažení vysokých otáček je dále omezován výkon natáčením lopatek a udržován požadovaný výkon. Při ještě vyšších rychlostech větru je pak postupně zapojována regulace STALL. Výhodou je pak nižší hlučnost a menší deformace lopatek. Požadavky na rychlost regulace jsou u této metody mnohem vyšší než u metody STALL-PITCH.

2.5. Vliv větrných elektráren na provoz elektrizační soustavy

Využívání energie větru sebou přináší celou řadu problémů, souvisejících s jeho fyzikální podstatou. Nepravidelnost, nahodilost a špatná predikovatelnost síly a směru větru způsobují, že zařízení, určená k využívání jeho energie, jsou schopna pracovat pouze nevelkou část roku (v našich podmínkách cca 10 – 20%). Nedokonalé využívání vybudovaných kapacit vede jednak k ekonomickým ztrátám v samotné výrobě a jednak k problémům s regulací v elektrizační soustavě.

Zatímco ekonomické problémy (vysoké náklady na výrobu jednotky elektřiny z důvodů nízkého využití instalovaných zařízení) se řeší formou státní podpory obnovitelných zdrojů (provozovatelé distribučních soustav povinně vykupují takto

vyrobenou elektřinu za stanovenou minimální cenu, ale tyto vícenáklady si započítávají do regulovaných nákladů za použití sítí), technické problémy s regulací soustavy v přítomnosti rychle fluktuujících větrných zdrojů musí řešit provozovatel přenosové soustavy systémem točivých rezerv, záložních a rychle startujících zdrojů. Jak distribuční soustavy, ke kterým jsou větrné elektrárny nejčastěji připojeny, tak i přenosová soustava musí řešit dopady, které sebou rozvoj větrné energetiky přináší. [8]

Jak bylo uvedeno v úvodu kapitoly 2.4, při rychlosti větru kolem 3 m.s^{-1} nejsou větrné elektrárny schopny vyrábět elektrickou energii a při rychlostech kolem 25 m.s^{-1} jsou větrné elektrárny odpojovány od sítě. Je tedy zřejmé, že je velmi obtížné zajistit konstantní dodávku elektrické energie do místa spotřeby a větrné elektrárny mohou mít, v případě chybné regulace výkonu, nepříznivý vliv na elektrizační soustavu. Vlivy větrných elektráren na elektrizační soustavu můžeme rozdělit do dvou kategorií:

- lokální,
- systémové.

2.5.1 Lokální vlivy větrných elektráren na provoz elektrizační soustavy

Prioritou pro provozovatele distribuční soustavy je maximální eliminace nežádoucích vlivů provozu větrných elektráren na distribuční soustavu. Tyto vlivy jsou dány především způsobem připojení generátoru větrné elektrárny k distribuční soustavě, parametry přípojného bodu distribuční soustavy (zkratový výkon) a volbou měřicího a řídicího zařízení. Způsob připojení k distribuční síti stanoví příslušný provozovatel distribuční soustavy na základě daných síťových poměrů, výkonu a způsobu provozu vlastní výroby. Každý zdroj, který je připojován do sítě ji v mnoha ohledech ovlivňuje. Tyto změny nesmí překročit dovolené meze, které jsou popsány v *Příloze 4 PPDS*. V případě připojení větrných elektráren velkých výkonů (nebo celých větrných parků) jsou lokální vlivy těchto výroben na elektrizační soustavu značné. Mezi základní sledované lokální vlivy patří:

- přetěžování sítí
 - prvním kritériem pro vyvedení výkonu větrných elektráren do sítě je dostatečně dimenzované místo připojení a související síť až k transformační stanici
- kolísání napětí
- zvýšení zkratových poměrů
 - větrná elektrárna se chová jako jakákoliv jiná elektrárna vyvedená do jednoho bodu sítě, takže je potřeba počítat se změnou zkratových poměrů v síti
- kvalita dodávky elektrické energie
 - výkonová elektronika, která je součástí větrných elektráren, může být rušivým zdrojem v síti

- je nutno sledovat vyšší harmonické, dlouhodobý flicker a případné rušení HDO

U větrných elektráren s asynchronním generátorem s kotvou nakrátko a tyristorovým měničem může v případě vzniku náhlé změny momentu na hřídeli (změna rychlosti proudění větru) v okamžiku připojení elektrárny k distribuční soustavě dojít k deformaci průběhu proudu a napětí v místě připojení. V případě vyvedení výkonu větrné elektrárny do přípojného bodu distribuční soustavy kabelovým vedením, je deformace napětí i proudu ještě výraznější.

V případě využití asynchronního generátoru s kroužkovou kotvou a měničem frekvence odpovídá proudový ráz maximálně třetině jmenovitého proudu generátoru. U moderních větrných elektráren se pro omezení proudového rázu využívá přepínač Y/D. Rotorové vinutí je napájeno přes kroužky z rekuperačního měniče frekvence. Mezi měničem a rotorovým vinutím bývají umístěny tlumivka a sinusový filtr pro vyhlazení průběhu napětí a proudu.

Pro připojování větrných elektráren je definován tzv. *činitel proudového rázu*, který je definován jako poměr zapínacího rázu ku jmenovitému proudu generátoru. Obvykle nabývá hodnoty 4 pro asynchronní generátory připojované v rozmezí 95% - 105% synchronních otáček. Podrobnější informace k této problematice jsou uvedeny v kapitole 8.

2.5.2 Systémové vlivy větrných elektráren na provoz elektrizační soustavy

Systémové vlivy větrných elektráren se v elektrizační soustavě projevují při větším výskytu větrných elektráren v síti. Může docházet ke snížení přenosové schopnosti vedení na mezinárodních profilech. V tomto ohledu se v elektrizační soustavě České republiky v současné době projevuje především vliv větrných elektráren instalovaných v severní oblasti Německé republiky. Z hlediska systémových vlivů jsou sledovány především následující vlastnosti:

- začlenění větrných elektráren do pokrývání diagramu zatížení
 - dodávka z větrných elektráren je nestabilní a závislá na povětrnostních podmínkách
 - při vyšší počtu větrných elektráren v síti se nezvyšuje požadavek na velikost regulačního výkonu
- chování větrných elektráren při blízkých zkratech v přenosové soustavě a při velkých poruchách
 - hrozí nebezpečí plošných výpadků větrných elektráren připojených do přenosové soustavy
- dopad na stabilitu elektrizační soustavy
 - větrné parky mohou mít výrazný dopad na stabilitu chodu sítě v případě poruch a nárazových větrů

2.5.3 Požadavky na chování větrných elektráren v elektrizační soustavě

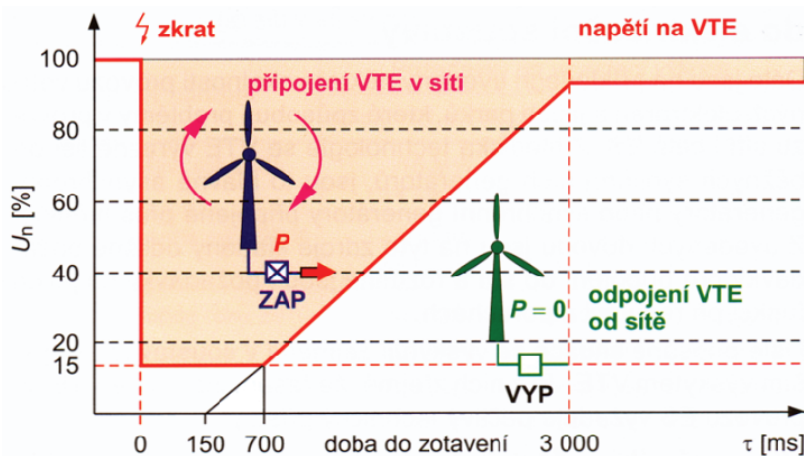
Základní pravidla pro provoz elektrických sítí jsou dány tzv. kodexem sítí. V současné době jsou kodexy rozšiřovány o požadavky na provoz větrných elektráren v elektrizační soustavě. Jsou definovány především požadavky na:

- chování větrných elektráren při zkratech
- chování větrných elektráren při změnách frekvence
- chování větrných elektráren při změnách účinníku

Požadavky na chování větrných elektráren při zkratech

Při připojování větrných elektráren do sítí vysokého napětí je požadavek na co jejich nejrychlejší odpojení v případě zkratu. Cílem je omezit zkratové poměry a tím zabránit poškození zařízení. Okamžité odpojení však není vhodné v případech vyššího zastoupení větrných elektráren v síti 100 kV a v přenosové síti z důvodu velkého odpadlého výkonu.

Na větrné elektrárny připojované do přenosové sítě je kladen požadavek odolnosti proti odpojení při vzdálených zkratech. Při poklesu napětí po zkratu v místě připojení větrné elektrárny do 15% jmenovitého napětí U_n a pro čas zotavení napětí $t \leq 0,7$ s, nesmí být další větrné elektrárny odpojeny (viz. obrázek 2.20).

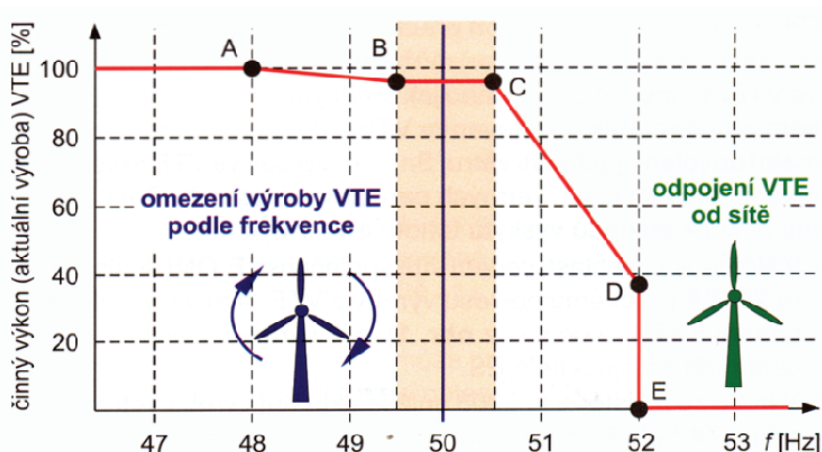


Obr. 2.20: Provoz větrných elektráren při zkratech [9]

Požadavky na chování větrných elektráren při změnách frekvence

Z hlediska změny frekvence v síti je důležité, aby i při kolísající frekvenci zůstaly větrné elektrárny připojeny do soustavy a pomáhaly vyrovnávat bilanci výkonů. Při rozsahu frekvence 49,5 – 50,5 Hz se nepředpokládá změna výroby větrných elektráren. Při frekvencích vyšších než 52 Hz je definován požadavek na okamžité odpojení větrných elektráren. Při frekvenci nižší než 49,5 Hz je definován

požadavek na zachování zapojení větrných elektráren do sítě při maximální možné okamžité výrobě. Vyše uvedené požadavky jsou znázorněny na obrázku 2.21.



Obr. 2.21: Provoz větrných elektráren při změnách frekvence [9]

Pro integraci větrných elektráren do elektrizačních soustav byly organizací UCTE (Union for the Coordination of the Transmission of Electricity) definována následující doporučení:

- urychlení autorizačních procesů pro výstavbu nových síťových prvků v souvislosti s rozšiřováním obnovitelných zdrojů
- zabezpečení aktivních příspěvků výkonu větrných elektráren pro udržení stability provozu
- stanovení pravidel pro současné využívání klasických a obnovitelných zdrojů v elektrizační soustavě
- zabezpečení dostatečné výkonové bilance a rezerv zdrojů v elektrizační soustavě s vysokým využitím větrných elektráren
- analýza budoucích scénářů rozvoje větrných elektráren v Evropě a jejich vlivů
- podpora výzkumu a rozvoje nových technologií pro integraci větrných elektráren
- dosažení vyšší spolehlivosti provozu elektrizační soustavy s využitím řízení kapacit větrných elektráren

2.6. Literatura

- [1] Cenka, M., *Obnovitelné zdroje energie*, FCC Public, 2001, Praha, Česká republika, ISBN: 80-901985-8-9
- [2] Crome, H., *Technika využití energie větru*, vydalo nakladatelství HEL, 2002, ISBN 80-86167-19-4
- [3] Kaminský, J., Vrtek, M., *Obnovitelné a alternativní zdroje energie*, Interní učební texty – skriptum, 2002, VŠB Ostrava
- [4] Bartošík, T., *Metody simulace dodávky výkonu z větrných elektráren*, Diplomová práce, 2008, Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně
- [5] Janíček, F. a kolektiv autorů, *Obnovitelné zdroje energie 1 – Technologické pre udržateľnú budúcnosť*, STU FEI Bratislava, 2007, ISBN: 978-80-969777-0-3
- [6] Webové stránky společnosti W.E.B Větrná energie, s.r.o. - http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie_9/systemy-regulace_27, cit. 20.12.2011
- [7] Strzelecki, R., Benysek, G., *Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks*, Springer – Verlag London Limited, 2008, ISBN: 978-1-84800-317-0
- [8] Kolektiv autorů, *Vliv větrných elektráren na elektrizační soustavu ČR*, Struční studie VtE zpracovává EuroEnergy, s.r.o., 2004, www.euroenergy.cz
- [9] Mastný, P., Studijní podklady předmětu Malé zdroje elektrické energie, 2011, Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně
- [10] Andrews, J., Jolley, N., *Energy Science – principles, technologies, and impacts*, Oxford 2007, ISBN: 978-0-19-928112-1
- [11] Collective authors, *Renewable Energy Focus Handbook*, Elsevier 2009, ISBN: 978-0-12-374705-1
- [12] Webové stránky Wikipedia - http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine, cit. 18.12.2011

3. Fotovoltaika

Prvními experimenty, při kterých byl pozorován fotoelektrický jev, se zabýval francouzský fyzik Becquerel od roku 1839. Jeho FV článek byl založen na kovových elektrodách ponořených v elektrolytu. Vývoj prvního pevného článku je připisován Adamsovi a Daymu, kteří jej vyrobili ze selenu v roce 1877. Frittsův článek z roku 1883 měl již účinnost kolem 1 %. Na další vývoj FV technologie mělo zásadní vliv teoretické objasnění fotoelektrického jevu Albertem Einsteinem, za které byl oceněn Nobelovou cenou v roce 1921. Pro technologii moderních křemíkových článků byla významným objevem metoda výroby čistého monokrystalu křemíku, kterou vyvinul Jan Czochralski.

První aplikací FV panelů jako zdroje energie byla kosmonautika – FV panely byly a stále jsou ideálním zdrojem napájení satelitů. Komerčně se FV články začaly poprvé používat jako zdroje energie pro miniaturní elektroniku (kalkulačky, hodinky). Silným impulsem pro rozvoj FV energetiky byla ropná krize v roce 1973, která nastartovala proces efektivnější výroby a využití energetických zdrojů. Téměř lavičovitě se FV systémy rozvíjejí v posledních letech, a to díky dotačním programům, které způsobily nebývalý zájem investorů o tuto oblast výroby elektrické energie. Vše napovídá tomu, že pro udržení stávajícího rozvoje lidské civilizace budou obnovitelné zdroje energie (a tedy i FV systémy) v budoucnosti zcela zásadní. [1]

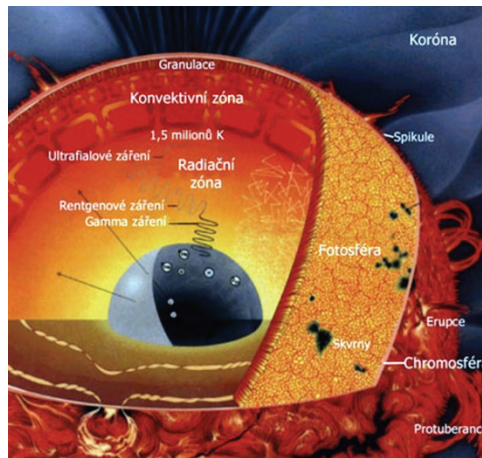
3.1. Slunce jako zdroj energie

Sluneční záření patří mezi nejčistší a nejdostupnější zdroje energie na Zemi. Slunce je zdrojem zářivé energie v celém rozsahu spektra od nejmenších vlnových délek rentgenového a ultrafialového záření, až po metrové délky záření rádiového. Světelné a infračervené záření o vlnové délce 0,2 μm až 3 μm je však nejčtenější (lidské oko vnímá záření v rozsahu 0,38 až 0,76 μm). Hmotnost Slunce je asi 330 000 krát větší než hmotnost Země a představuje 99,8% hmotnosti sluneční soustavy.

Stáří Slunce se odhaduje na 4,6 miliard let, což je řadí mezi hvězdy středního věku. Předpokládá se, že bude svítit ještě asi 5 až 7 miliard let. Teplota na povrchu Slunce je přibližně 5800 K, proto je lidé vnímají jako žluté (i když maximum jeho vyzařování je v zelené části viditelného spektra). Průměr Slunce je zhruba 1 400 000 km, což je asi 109 průměrů Země. Jeho objem je tedy asi 1,3 milionkrát větší než objem Země. Hustota Slunce je průměrně 1400 kg m^{-3} . Slunce je koule žhavého plazmatu, která neustále produkuje ohromné množství energie. Jeho výkon je zhruba 4×10^{26} W, z čehož na Zemi dopadá asi 45 miliardtin. Přibližně polovina zářivého toku Slunce je pohlcena zemským povrchem a následně je vyzářena ve formě IR záření do vesmíru. Velká část energie je spotřebována k odpaření vody v oceánech.

Ke vzniku energie Slunce dochází v jeho nitru, které se skládá ze tří částí (obrázek 3.1):

- jádro
 - probíhá termonukleární reakce (teplota $13 \cdot 10^6$ K)
- oblast atmosféry
 - vzniká elektromagnetické záření (fotosféra, chromosféra => koróna)
- sluneční vítr
 - dochází k emisi protonů, α částic a elektronů



Obr. 3.1: Složení Slunce [15]

Slunce nemá homogenní složení, ale jeho chemické složení je závislé na hloubce. V jádře vlivem jaderných reakcí je větší obsah helia, než na jeho povrchu. Předpokládá se, že v jádře je vodík zastoupen již 34 % a hélium 64 %. Spektrum současně ukazuje, že se ve Slunci nachází ve stopovém množství většina prvků, které jsou známé na Zemi. Pokud bychom chtěli složení Slunce vyjádřit v hmotnostních poměrech, můžeme říci, že je složeno přibližně ze 75% vodíku a 25% helia.

Sluneční záření můžeme rozdělit do dvou složek:

- přímé sluneční záření (I_P)
- difúzní sluneční záření (I_D)
 - jde o rozptýlené světlo o odrazu o molekuly plynů, prachu a mraky
 - intenzita difúzního záření vzrůstá se součinitelem znečištění (Z)

Teoretické množství energie dopadající za jednotku času na jednotkovou plochu mimo zemskou atmosféru se nazývá *sluneční konstanta* a její hodnota je při-

bližně $I_0 = 1360 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Mírou zmenšení intenzity tohoto záření je tzv. *součinitel znečištění Z*, který závisí na obsahu příměsí a atmosférickém tlaku vzduchu. Charakteristické hodnoty součinitele znečištění jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Intenzitu přímého slunečního záření dopadající na plochu kolmou k paprskům (I_{PN}) můžeme popsat rovnicí (3.1).

$$I_{PN} = I_0 \cdot A^{-Z} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (3.1)$$

Pro obecně položenou plochu pak platí:

$$I_P = I_{PN} \cdot \cos \gamma \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (3.2)$$

kde γ - úhel dopadu slunečních paprsků

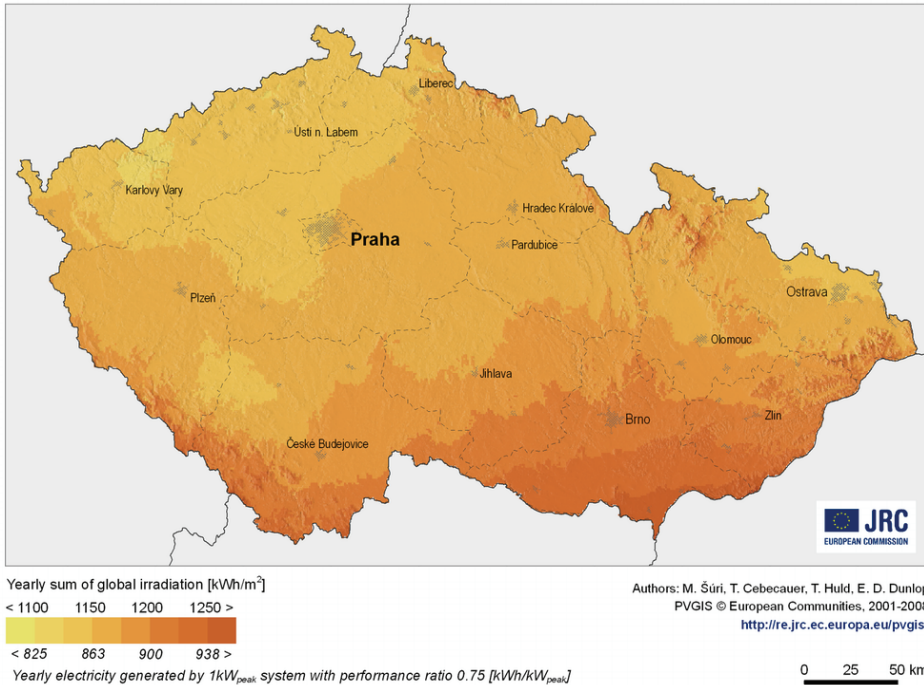
Teoretické množství energie dopadající na osluněnou plochu za den je závislé na sklonu kolektoru α a součiniteli znečištění Z. Optimální úhel pro maximální využití slunečního záření se v průběhu roku mění následovně:

- letní období 30° - 45°
- zimní období 60° - 90°

typ oblasti	součinitel znečištění Z
místa na 2000 m.n.m.	2,0
místa nad 1000 m.n.m.	2,5
venkov bez průmyslových exhalací	3,0
města a průmyslová střediska	4,0
silně znečištěné prostředí	≥ 5,0

Tab. 3.1: Typické hodnoty součinitele znečištění

Pro ilustraci je na následujícím obrázku (Obr. 3.2) zobrazena sluneční mapa pro oblast České republiky. Z uvedené mapy je zřejmé, že nevhodnější oblasti pro aplikaci fotovoltaických elektráren jsou na Jižní moravě a v jižních čechách.



Obr. 3.2: Sluneční mapa ČR [13]

3.2. Základní popis fotovoltaických technologií, rozdělení a vývoj

Elektrická energie získaná přímou přeměnou slunečního záření je známa již z 19. století. Rozvoj fotovoltaických aplikací byl a stále ještě je závislý na technické úrovni a znalostech především z oblasti fyziky polovodičů. Vlastní fotovoltaické systémy pak představují spojení fotovoltaických součástek do řetězce, na jehož konci jsou elektrické spotřebiče. [18]

3.2.1 Princip funkce fotovoltaického článku

Základním principem FV článku je fotoelektrický jev, při němž jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou. Absorpce je způsobena interakcí světla (fotony) s částicemi hmoty (elektrony a jádry) a mohou nastat tyto případy:

- interakce částice s mřížkou
 - využití nízkenergetických fotonů
- interakce s volnými elektrony
 - dochází pouze ke zvýšení teploty (fototermální systémy)
- interakce s vázanými elektrony
 - vznikají volné nosiče náboje

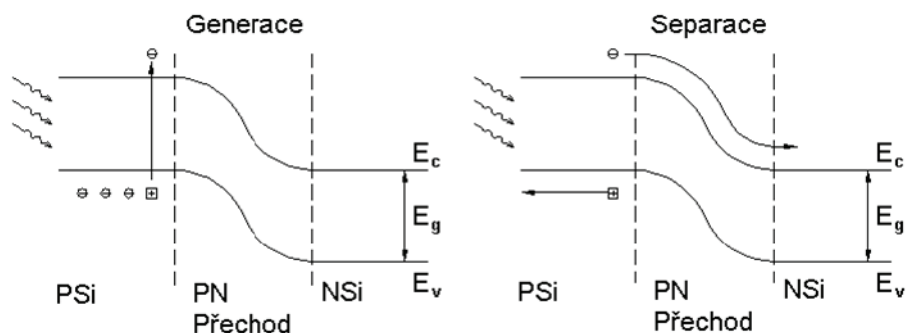
- může dojít k uvolnění elektronu z vazby

Pro funkci FV článku je zásadní, aby foton ze slunečního záření uvolnil v látce elektron a vznikl pár elektron – díra. V kovech ovšem dojde k jejich okamžité re-kombinaci, které je potřeba zabránit a vzniklý náboj tedy odvézt z článku. Pro tento účel se využívá polovodičů, ve kterých jsou elektrony a díry separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu.

Nejjednodušší fotovoltaický článek můžeme tedy popsat jako velkoplošnou diodu s jedním PN přechodem. Aby mohla fotovoltaická přeměna probíhat, musí být splněny následující podmínky:

- foton musí být pohlcen,
- foton musí excitovat elektron do vyššího vodivostního pásu,
- vzniklá dvojice elektron (-) – díra (+) musí být separována, aby se znovu nespojila,
- oddělené náboje jsou následně odvedeny ke spotřebiči.

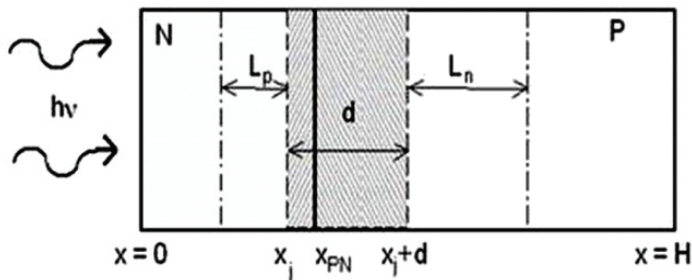
Na obrázku obrázku 3.3 a 3.4 je zobrazen základní princip funkce fotoelektrického jevu.



Psi – polovodičový křemík typu P, NSi – polovodičový křemík typu N, E_c – energie vodivostního pásu, E_v – energie valenčního pásu

Obr. 3.3: Princip přímé přeměny energie slunečního záření na elektrickou s využitím fotoelektrického jevu [2]

V ozářené oblasti PN přechodu jsou generovány nosiče, které následně difundují směrem k PN přechodu. Hustota proudu (J_{PV}) je tvořena nosiči, které byly zachyceny oblastí prostorového náboje (rovnice 3.3). Hustota proudu pro jednotlivé oblasti PN přechodu je definována v rovnicích 3.4 – 3.6. Nosiče, generované mimo místa přechodu PN musí k oblasti se silným elektrickým polem difundovat. Pokud zrekombinují dříve, než dosáhnou oblasti přechodu PN, neuplatní se při generaci fotovoltaického napětí.



Obr. 3.4: Princip fotoelektrického jevu [15], [2]

$$J_{PV}(\lambda) = J_{PVN}(\lambda) + J_{PVP}(\lambda) + J_{OPN}(\lambda) \quad (3.3)$$

Pro oblast typu N platí rovnice:

$$J_{PVN}(\lambda) = q \int_0^{x_j} G(\lambda) dx - q \int_0^{x_j} \frac{\Delta p}{\tau_p} dx - J_{sr}(0), \quad (3.4)$$

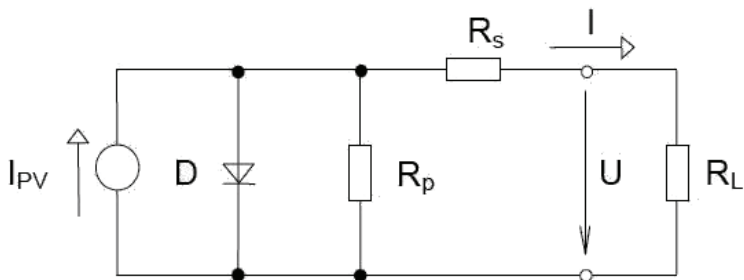
pro oblast typu P platí:

$$J_{PVP}(\lambda) = q \int_{x_j+d}^H G(\lambda) dx - q \int_{x_j+d}^H \frac{\Delta n}{\tau_n} dx - J_{sr}(H) \quad (3.5)$$

a pro oblast prostorového náboje přechodu PN platí:

$$J_{OPN}(\lambda) \approx q \int_{x_j}^{x_j+d_j} G(\lambda) dx \quad (3.6)$$

Fotovoltaický (FV) článek je možno modelovat pomocí náhradního obvodu, znázorněného na obrázku (3.5). Ozářená oblast (plocha A_{ill}) přechodu PN generuje proud o hustotě J_{PV} , přičemž se oblast typu P nabíjí kladně a oblast typu N záporně. Tím je přechod propustně polarizován a část generovaného proudu teče zpět diodou D. Technologické nedokonalosti (mikrosvody) přechodu PN jsou modelovány svodovým odporem R_p , vliv odporu materiálu a proudových sběrnic je modelován sériovým odporem R_s . Výstupní napětí U na FV článku je o úbytek napětí na sériovém odporu nižší, než napětí U_j na diodě.



Obr. 3.5: Náhradní schéma fotovoltaického článku [15], [2]

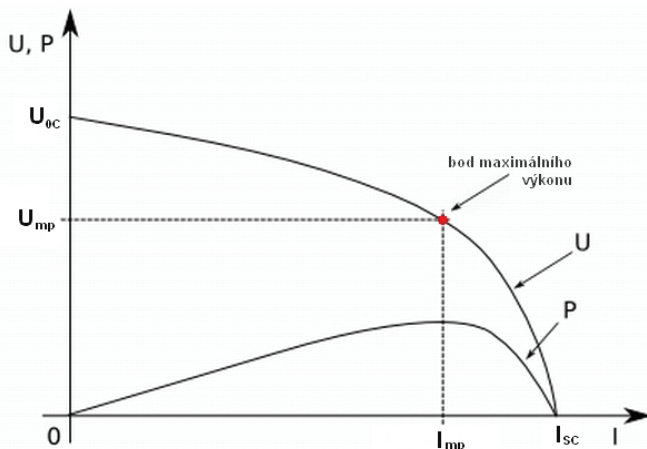
Na základě výše popsaného náhradního schématu lze výstupní proud fotovoltaického článku (I) vyjádřit následující rovnicí

$$I = \underbrace{A_{ill} \cdot J_{PV}}_I - \underbrace{I_{01} \left[\exp\left(e \cdot \frac{U + R_s I}{kT} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(e \cdot \frac{U + R_s I}{2kT} \right) - 1 \right]}_{II} - \underbrace{\frac{U + R_s I}{R_p}}_{III} \quad (3.7)$$

Jednotlivé části rovnice označené jako I, II a III představují generovaný proud (I), proud diodou (II) a svodový proud (III). Z uvedené rovnice (3.7) je patrný značný vliv sériového odporu R_s na voltampérovou charakteristiku fotovoltaického článku (obr. 3.6). Sériový odpor snižuje výstupní proud a tím i celkovou účinnost článku.

Voltampérová charakteristika FV článku

Voltampérová charakteristika (obr. 3.6) je základní informací o činnosti fotovoltaických článků. Hraniční veličiny na voltampérové charakteristice jsou napětí naprázdno (U_{oc}) a proud nakrátko (I_{sc}). Napětí naprázdno představuje maximální napětí na článku, kterého je možno dosáhnout v případě, že ke článku není připojen žádný spotřebič. Proud nakrátko představuje maximální proud (zkratový proud), který může solární článek při dané intenzitě slunečního záření dodávat.



Obr. 3.6: Zatěžovací a výkonová charakteristika FV článku [15]

Výkon solárního článku se určuje jako součin proudu a napětí. Pro každý článek existuje pracovní bod na charakteristice, ve kterém je výkon největší. Tento bod je označován jako *bod maximálního výkonu* (MPP) o napětí U_{mp} a proudu I_{mp} . Výkon určitého fotovoltaického článku (P) závisí na ozáření, na spektru světla a na teplotě článku. Pro výkon fotovoltaického článku můžeme tedy napsat rovnici

$$P = U_{mp} \cdot I_{mp} \quad (3.8)$$

Dalšími charakteristickými provozními hodnotami fotovoltaického článku jsou činitel plnění (FF – *Fill Factor*) a účinnost (η).

Činitel plnění je charakterizován jako podíl maximálního výkonu v bodu MPP a maximálního výkonu definovaného pomocí maximálního napětí a maximálního proudu. Můžeme tedy napsat rovnici

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{0C} \cdot I_{SC}} \quad (3.9)$$

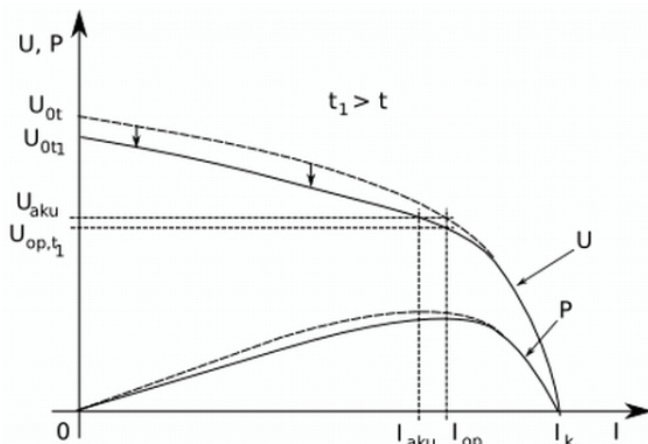
Pro účinnost FV článku můžeme napsat rovnici (3.10). Z rovnice je patrné, že účinnost je definována jako podíl maximálního výkonu článku v bodu MPP a výkonu dopadajícího slunečního záření (P_{in}).

$$\eta = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} \quad (3.10)$$

Tyto výše uvedené charakteristické ukazatele jsou vždy určovány za standardních testovacích podmínek, tj. při standardní testovací teplotě $STC = 25^\circ C$, intenzitě slunečního záření $I = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a definované vzduchové hmotě (Air Mass) $AM = 1.5$. Na průběh voltampérové charakteristiky má vliv především hodnota intenzity slunečního záření a teplota.

Vlivem zvýšené teploty se zvýší difúzní hodnota minoritních nosičů náboje a zmenší se energetická mezera polovodiče, což vede ke zvýšení fotoproudu. Tento nárůst je však zanedbatelný. Významnější je v tomto případě pokles napětí na prázdno U_{0C} . Při déle trvající sluneční intenzitě nebo zhoršených podmínkách chla-

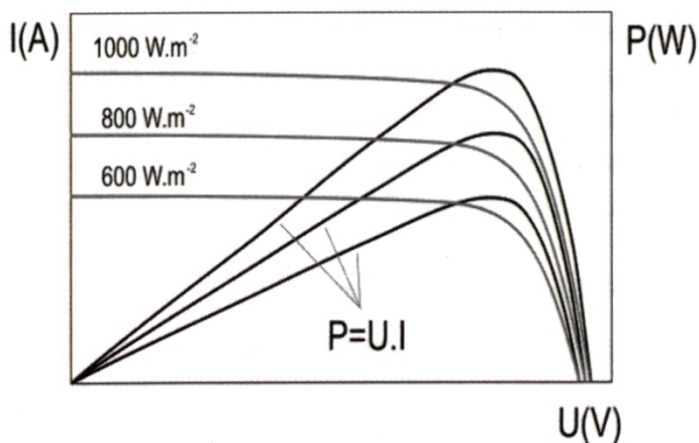
zení článku (bezvětrí), kdy teplota vzduchu dosahuje 40°C dochází ke zvýšení povrchové teploty až na 80°C . Při takto vysokých teplotách dochází ke změně elektrických vlastností článku, které vedou ke snížení zatěžovací charakteristiky směrem k nižšímu napětí (viz Obr. 3.7). Pokles optimálního napětí způsobí snížení dodávaného výkonu.



Obr. 3.7: Vliv teploty na výkon FV článku [19]

Pro FV články z krystalického křemíku (c-Si) je pokles U_{OC} okolo $0.4\%/K$ a pokles účinnosti článků je přibližně $0,5\%/K$.

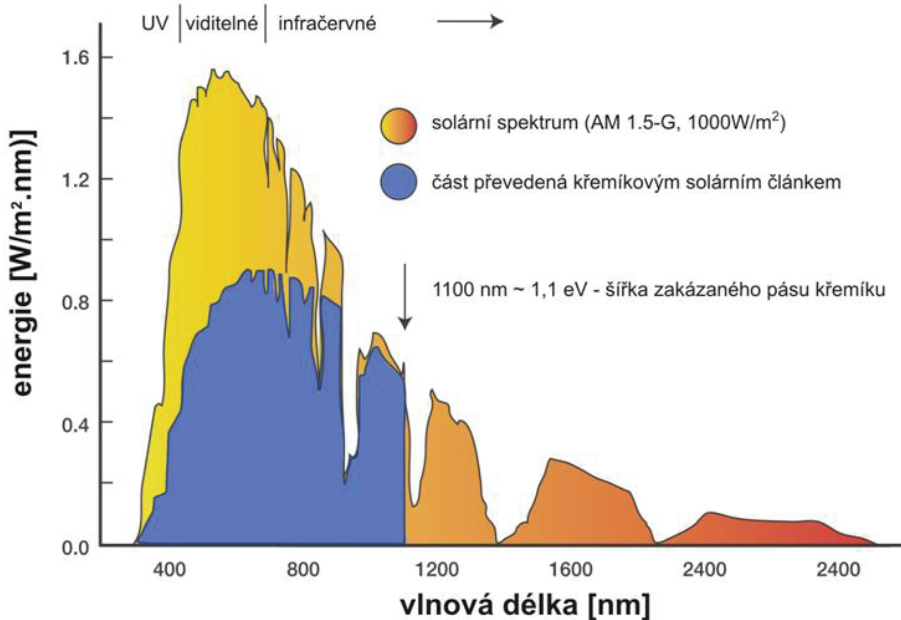
Účinnost fotovoltaických článků dále závisí na na intenzitě dopadajícího záření a na velikosti sériového a paralelního odporu. V případě malého sériového odporu R_s účinnost článků s rostoucí intenzitou záření roste, dosahuje maxima a až při velkých intenzitách záření začíná klesat. V případě velkého sériového odporu účinnost článků s rostoucí intenzitou záření klesá (tento efekt se projevuje zejména u tenkovrstvých FV článků). Možné průběhy závislosti účinnosti fotovoltaických článků na intenzitě slunečního záření jsou vidět na obrázku 3.8.



Obr. 3.8: Vliv intenzity slunečního záření na výkon FV článku [3]

3.2.2 Konstrukce fotovoltaických článků

Nejvyužívanějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků je křemík (Si). Vzhledem k šířce zakázaného pásu je u křemíku možno dosáhnout velmi vysoké účinnosti generace volných nosičů dopadajícím slunečním zářením. Zároveň u křemíku, jako základního materiálu pro mikroelektroniku, se podařilo velmi dobře zvládnout všechny technologické operace potřebné k vytváření struktur. Využitelné spektrum slunečního záření křemíkovým článkem je na obrázku 3.9.



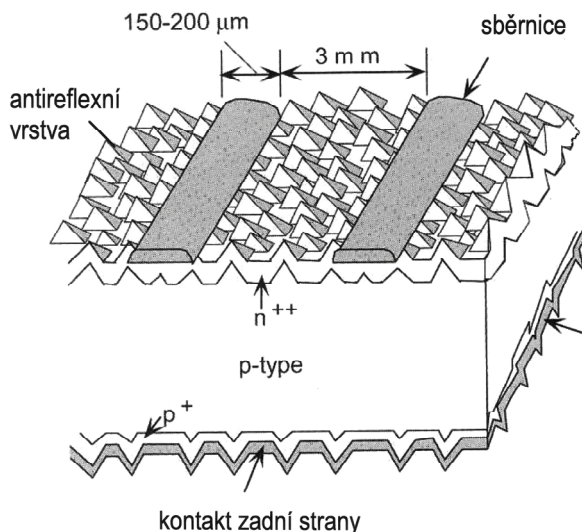
Obr. 3.9: Využitelné spektrum záření pro články Si [4]

Výchozím materiálem pro výrobu fotovoltaických článků z krystalického křemíku jsou křemíkové destičky (obvykle typu P) čtvercového tvaru o rozměrech až 200x200 mm a rezistivitě řádově jednotky Ωcm . Počátek výroby FV článků byl spojen pouze s monokrystalickým křemíkem. Potřeba snížení ceny vstupního materiálu vedla v sedmdesátých letech k vývoji multikrystalického křemíku. Tato technologie přispěla k úsporám materiálu a snížení investičních nákladů, na druhé straně náhodná orientace krystalických zrn neumožňuje texturaci povrchu alkalickým leptáním a hranice zrn zvyšují ztráty rekombinací. Vývojem technologie se podařilo značně přiblížit účinnost článků z multikrystalického křemíku účinnosti článků z křemíku monokrystalického (účinnosti jednotlivých typů fotovoltaických článků jsou v tabulce 3.2). [4], [15]

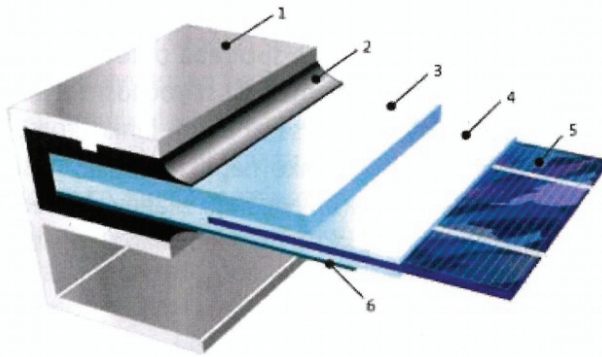
Typ solárního článku	Typická efektivita článku za běžných podmínek	Maximální naměřená efektivita článku za běžných podmínek	Maximální naměřená hodnota článku v laboratoři
	(%)	(%)	(%)
Monokrystalický křemík	12 – 16	22	25
Multikrystalický křemík	11 – 14	16	20
Amorfní křemík	5 – 7	10	13
Telurid kademnatý	10	12	16

Tab. 3.2: Účinnosti jednotlivých typů fotovoltaických článků [15]

Z jedné křemíkové destičky je vyroben jeden fotovoltaický článek. Struktura běžného článku je schématicky znázorněna na obrázku 3.10. Aby byla dosažena vysoká životnost, musí se články chránit před vlivy okolního prostředí. Příklad konstrukce fotovoltaického článku z krystalického křemíku je na obrázku 3.11. Fotovoltaické články se vkládají do etylvinylacetátové fólie (EVA). Přední stranu článku tvoří vysoce průhledné, speciálně tvrzené sklo, aby byly články chráněny před vlhkostí, větrem, krupobitím (krupy do průměru 25 mm) a dalšími povětrnostními vlivy. Současně má sklo propouštět na článek co největší množství slunečního záření. Zadní strana je uzavřena vícevrstvou plastovou fólií s vysokou pevností nebo další skleněnou vrstvou. Moduly jsou opatřeny hliníkovým rámem pro uchycení k nosným konstrukcím a na zadní stěně jsou opatřeny svorkovnicí s kabelovými vývody a překlenovacími diodami. Fotovoltaický modul je kompaktní celek s předepsanými mechanickými, optickými a elektrickými vlastnostmi.



Obr. 3.10: Struktura fotovoltaického článku [5]



1. hliníkový rám, 2. těsnění, 3. tvrzené sklo, 4. EVA, 5. fotovoltaický článek, 6. krycí fólie (tedlar)

Obr. 3.11: Struktura fotovoltaického modulu z Si [17]

Vývojové trendy v oblasti fotovoltaických článků a modulů

Současný vývoj technologie naznačuje, že krystalický křemík zůstane nejdůležitějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků minimálně v následujících pěti letech, a to vzhledem k pokračujícímu snižování cen vstupního materiálu, snižování energetické náročnosti a dalšímu zdokonalování technologie a s ohledem na vysokou spolehlivost a životnost modulů s články z krystalického křemíku. Zároveň bude pokračovat rozvoj tenkovrstvých technologií, a to jak na bázi amorfního křemíku (případně Si-Ge), tak na bázi CdTe, nebo CIS. Podíl tenkovrstvých modulů na celkové produkci může dosáhnout v následujících pěti letech až 25%.

Zároveň probíhá intenzivní vývoj a výzkum dalších technologií fotovoltaických článků a modulů, jako jsou

- články s vícenásobnými pásy
- články využívající kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách
- organické články
- Grätzlovy články (články na bázi nanočástic TiO_2).

Všechny tyto technologie jsou vysoce perspektivní z hlediska budoucích možností realizace velmi levných fotovoltaických článků a modulů, jsou však v současné době stále ještě ve stádiu výzkumu, nebo vývoje. Nelze proto v následujících pěti letech očekávat výraznější rozšíření těchto technologií.

Z hlediska dlouhodobého vývoje můžeme fotovoltaické články rozdělit následovně: [6]

- články první generace
 - FV články se vyskytují nejčastěji z desek monokrystalického křemíku, které společně tvoří PN přechod. FV články se prodávají již od sedmdesátých let a to až do dnes, kde tvoří převážnou část trhu a to asi 90%. Jsou charakterizovány velmi dobrou životností při zachování účinnosti, ta se v sériové vý-

robě pohybuje od 14% do 17%. Při výrobě speciální, pro laboratorní účely, může účinnost dosahovat až 25 %. Nevýhodou je to, že pro výrobu se musí používat velké množství velmi čistého křemíku.

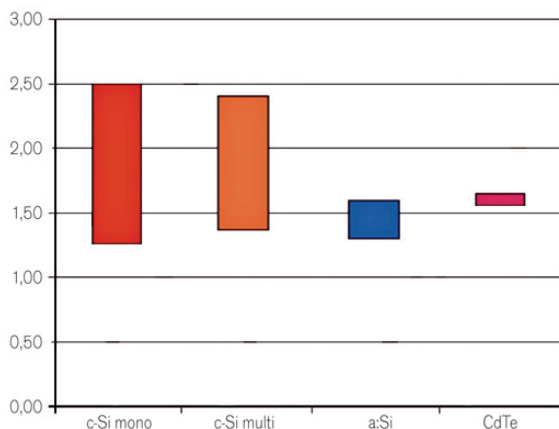
- články druhé generace
 - Zde dochází k výraznému snížení množství čistého křemíku. Zároveň se začínají používat jiné prvky než křemík. Nejčastěji jde o nahrazování polykrystalickým a amorfním křemíkem s podstatně tenčí vrstvou oproti předchozí generaci a to až 1000 krát. Snížení množství křemíku negativně ovlivňuje účinnost panelu (okolo 10%), na stranu druhou nám tenký profil přináší úsporu hmotnosti a zlepšení mechanických vlastností, zejména pružnosti. Dnes již lze i v komerčním sektoru zakoupit futuristické studie batohů a dalšího vybavení s integrovanými FV panely. Zajímavé řešení víceúčelovosti můžeme najít na tzv. FV foliích splňujících izolační požadavky pro ploché střechy se současnou výrobou elektrické energie.
- články třetí generace
 - Oblast, na které stále intenzivně probíhají výzkumné práce. Snaha o maximální využití energie dopadajících fotonů slunečního záření, nejčastěji ve formě několikanásobných přechodů tenkých vrstev. Sledovat lze také snahu o použití jiné metody oddělování nábojů, než PN přechody. Foelektrochemické (fotogalvanické) články nebo použití nanostruktur ve formě uhlíkových tyček a trubiček, nebo kvantových teček nanesených na vhodné podložky. Cíleně je zde pak možno ovlivňovat elektrické a optické vlastnosti pro neefektivnější využití.
- články čtvrté generace
 - Posledním vývojovým stupněm rozumíme vícevrstvé profily plně využívající širokého slunečního spektra. Vrstvení profilů je založeno na principu naladění vrstev na různé vlnové délky. Vlnová délka záření se často mění. Při dopadu slunečního záření na vrstvu, která ho nedokáže využít, pak dochází k propuštění záření k vrstvě, jejíž vlnová délka odpovídá vhodnému využití.

Články z krystalického křemíku

Při porovnávání jednotlivých technologií se obvykle vychází z vysoké energetické náročnosti výroby krystalického křemíku potřebné čistoty.

Jedním ze základních trendů ve vývoji fotovoltaických článků je snižování tloušťky destiček na 200 – 150 μm , což vede spolu se zvyšováním účinnosti článků k výraznému zvyšování výkonu produkovaného stejným množstvím křemíku. Kromě toho bylo dosaženo snížení spotřeby energie při přípravě výchozího materiálu. V letech 2000 až 2007 došlo ke snížení spotřeby energie potřebné pro výrobu 1kg

polykrystalického křemíku s dostatečnou čistotou pro solární články (SOG) o 46% a došlo k výraznému poklesu ceny křemíku (z 500 USD/kg v roce 2008 na současných 55 USD/kg). Postupné zdokonalování výrobní technologie (spolu s efektem hromadné výroby) vede k výraznému snižování výrobní ceny modulů, která v současné době klesla na úroveň okolo 1,5 €/Wp. Zároveň probíhá vývoj v oblasti zkvalitňování technologických procesů tak, aby se účinnost zvyšovala ze současných 12 – 17% na úroveň 18 – 22%. Porovnání cen jednotlivých typů modulů na začátku roku 2010 je vidět na obrázku 3.12.



Obr. 3.12: Porovnání cen různých typů FV článků [5]

Na druhé straně pokles ceny SOG křemíku vede k tomu, že ceny modulů (vyjádřených cenou za 1 Wp) vyráběných různými technologiemi se liší relativně velmi málo. [16] Nízká cena modulů z krystalického křemíku může zpomalit růst produkce tenkovrstvých modulů.

V současné době probíhá intenzivní vývoj a výzkum dalších technologií fotovoltaických článků a modulů, jako jsou například články s vícenásobnými pásy, články využívající kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách, organické články a Grätzlovy články (články na bázi nanočástic TiO_2). Všechny tyto technologie jsou vysoce perspektivní z hlediska budoucích možností realizace velmi levných fotovoltaických článků a modulů, jsou však v současné době stále ještě ve stádiu výzkumu nebo vývoje. Jejich výraznější rozšíření nelze proto v následujících několika letech očekávat.

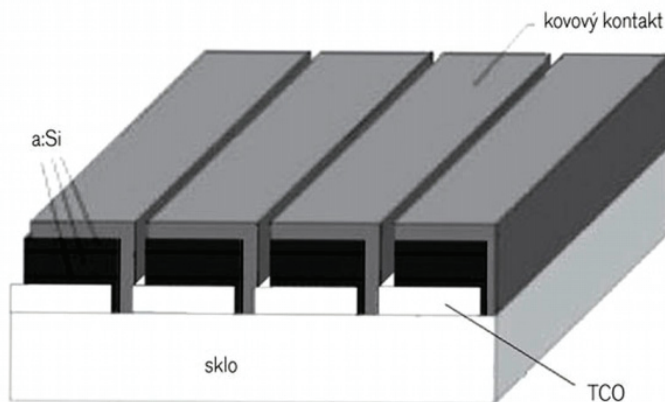
Tenkovrstvé moduly

V oblasti tenkovrstvých modulů probíhá vývoj především směrem ke zlevnění technologie (např. zvýšení depoziční rychlosti jednotlivých vrstev), zvýšení účinnosti a stability článků a modulů ze současných 6 – 10% na úroveň 10 – 15%. To klade velké nároky na technologická zařízení, která představují hlavní část nákladových položek. V oblasti tenkovrstvých technologií je velký potenciál ke snížení ceny modulů, vzhledem k nižší účinnosti je však výsledná cena fotovoltaických systémů prakticky stejná v porovnání s FV systémy realizovanými z krystalického

křemíku. Nicméně, v současné době jsou budovány relativně velké výrobní kapacity a podíl produkce tenkovrstvých článků má rostoucí tendenci.

V tenkovrstvé technologii nejsou realizovány jednotlivé FV články, ale celý modul v sekvenci technologických operací. Na nosnou podložku (obvykle sklo) je nejprve deponována vrstva TCO (transparentní vodivý oxid) a laserem jsou odděleny oblasti jednotlivých článků ve tvaru proužků (odstranění TCO). Následuje plasmatická depozice tenkovrstvého článku a odstranění struktury článku laserem v proužku těsně přiléhajícím k hranici vymezené prvním laserovým řezem. Poté je deponován kovový kontakt (obvykle naprašování). Následuje třetí řez laserem, který odstraní proužek kovového kontaktu tak, aby vznikla struktura modulu se sériově zapojenými články (obrázek 3.13). Na zadní stranu modulu je přilaminována krycí vrstva (sklo nebo polymer) a vývody svedeny do svorkovnice. Účinnost tenkovrstvých modulů je v rozmezí 6 až 10%.

Tenkovrstvé články a moduly mohou být realizovány rovněž na ohebných fóliích, což zjednodušuje některé střešní aplikace. Problémy se stabilitou deponovaných vrstev a vysoká cena potřebných technologických zařízení vedly k tomu, že ke zvyšování podílu tenkovrstvých FV modulů na celkové produkci došlo až po roce 2006, kdy se projevil nedostatek křemíku způsobený prudkým nárůstem fotovoltaických aplikací. Nicméně v současné době je depozice stabilních tenkých vrstev technologicky zvládnuta na ploše modulu až 5 m² a dochází k postupnému nárůstu jejich produkce.



Obr. 3.13: Struktura tenkovrstvého fotovoltaického modulu [15]

3.2.3 Rozdělení fotovoltaických systémů podle zapojení

Fotovoltaické systémy můžeme z hlediska aplikace rozdělit na tři základní typy:

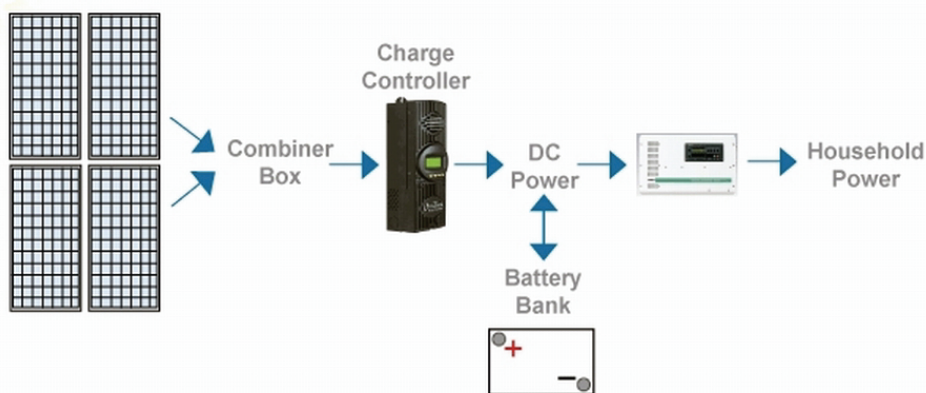
- autonomní systémy,
- hybridní systémy s akumulací,
- systémy přímo spojené se sítí bez akumulace.

Autonomní a hybridní systémy

Autonomní systémy (nebo také systémy Grid-off) se používají převážně v místech, kde není dostupná veřejná elektrorozvodná síť.

Tyto systémy se skládají z fotovoltaických modulů, akumulátorové baterie a ochranného obvodu, který chrání akumulátorovou baterii před nadměrným vybitím nebo přebitím. Větší systémy mohou obsahovat i měnič napětí. Blokové schéma autonomního fotovoltaického systému je na obrázku 3.14.

Autonomní systémy využívají speciální akumulátorové baterie, konstruované pro pomalé nabíjení i vybití. Optimální nabíjení a vybití akumulátorů je zajištěno regulátorem dobíjení. K ostrovnímu systému lze připojit spotřebiče napájené stejnosměrným proudem (napětí systému bývá zpravidla 12 nebo 24 V), případně běžné síťové spotřebiče 230 V/~50 Hz napájené přes napěťový střídač. Tyto systémy mají uplatnění například jako zdroj elektrické energie pro chaty a další objekty, napájení dopravní signalizace, telekomunikačních zařízení nebo monitorovacích přístrojů v terénu, u zahradního osvětlení a světelné reklamy.



Obr. 3.14: Blokové schéma systému Grid-off [10]

Hybridní fotovoltaický systém je v podstatě kombinací klasické síťové elektrárny (Grid-on) a ostrovního systému (Grid-off). Oproti systémům Grid-on (viz. následující kapitola) mají hybridní fotovoltaické systémy výhodu v maximálním využití vyrobené energie v místě výroby, ať už ve formě elektrické energie či pro přitápění, ohřev TUV, klimatizace, zavlažování, provoz bazénu nebo jiných předem určených spotřebičů, aniž by bylo zbytečně dodáno příliš mnoho energie do distribuční sítě.

Další nespornou výhodou hybridního fotovoltaického systému je již integrovaná funkce pro využití přebytečné energie ve výkonových špičkách, kdy inteligentní hybridní měnič již dnes dokáže přesměrovat přebytečnou energii v reálném čase či s řízeným zpožděním do Vámi předem určených, energeticky náročných spotřebičů. Příklad hybridního fotovoltaického systému je na obrázku 3.15.



Obr. 3.15: Hybridní fotovoltaický systém [11]

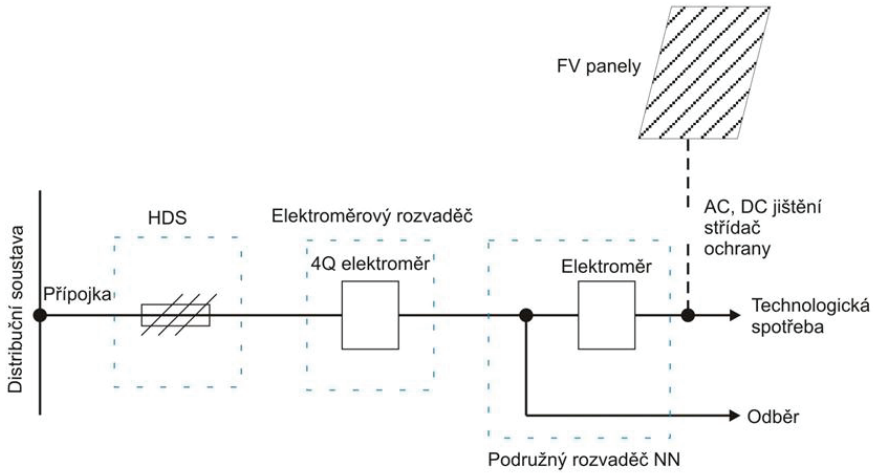
Systémy připojené k elektrické síti (Grid-on)

Výhodou systémů Grid-on je skutečnost, že veškerá vyrobená elektrická energie se na rozdíl od systémů Grid-off zpracuje. Tyto systémy se obvykle skládají z většího množství fotovoltaických modulů, měniče napětí (invertor), zařízení pro měření a regulaci a síťové ochrany. Připojení fotovoltaických systémů do elektrizační soustavy může být provedeno ve dvou základních variantách, jak je zobrazeno na obrázku 3.16 a 3.17.

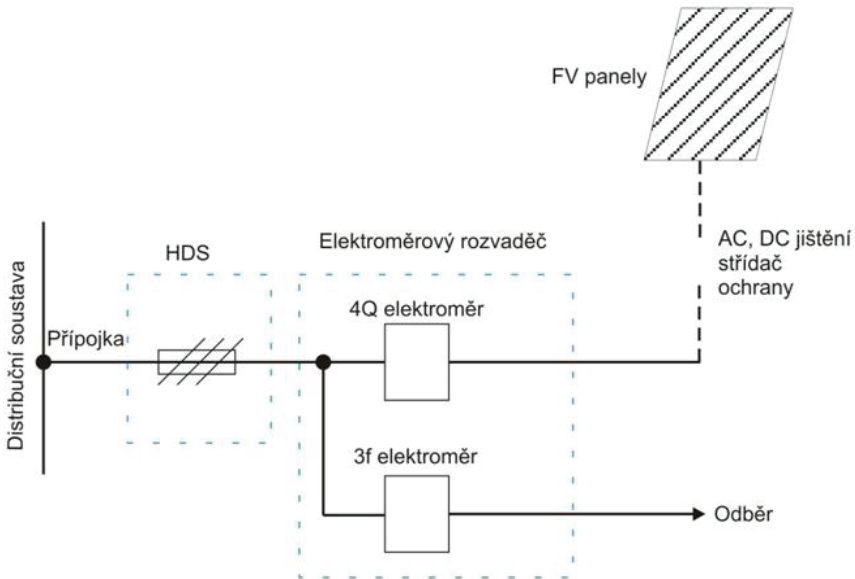
Obrázek 3.16 představuje systém zapojení v tzv. Zeleném bonusu. Za hlavní domovní skříní (HDS) je osazen čtyřkvadrantový elektroměr (4Q) a za ním je napojený domovní rozvod a elektrárna pomocí dalšího elektroměru. Toto zapojení se využívá v případech, kdy je převážná část vyrobené elektrické energie využita pro vlastní spotřebu objektu s instalovaným fotovoltaickým systémem.

Obrázek 3.17 představuje systém zapojení v tzv. Výkupním tarifu. Fotovoltaická elektrárna je v tomto případě připojena mezi stávající elektroměr a hlavní domovní skřín (HDS) pomocí čtyřkvadrantového elektroměru. Tento systém zapojení se využívá v případech, kdy je veškerá vyrobená elektrická energie dodána výrobcem do elektrizační soustavy.

Na obytné domy se obvykle instalují systémy s výkonem v rozmezí 1 – 10 kWp. Pro investory jsou však mnohem zajímavější systémy instalované na střechy větších bytových nebo nebytových komplexů, popřípadě instalace na volném prostranství (20kWp až jednotky MWp).



Obr. 3.16: Zapojení systému pro vlastní spotřebu [15]



Obr. 3.17: Zapojení systému pro dodávku do sítě [15]

Měření dodané a spotřebované elektrické energie je rozdílné pro systémy do 20 kWp a nad 20 kWp. U systémů do 20 kWp se pro určení dodávky a spotřeby využívá přímý čtyřkvadrantový elektroměr. Pro systémy nad 20 kWp je měření spotřeby a dodávky zajištěno následovně:

- nepřímé měření dodávky 4Q elektroměrem na NN straně transformátoru (do 600 kVA),
- nepřímé měření dodávky 4Q elektroměrem na VN straně transformátoru,
- samostatné měření spotřeby.

3.3. Návrh FV elektráren, dimenzování jednotlivých komponent

Při návrhu fotovoltaických systémů je potřeba dbát především na bezpečnost a bezporuchovost provozu, minimální požadavky na údržbu, maximalizaci energetického zisku a minimalizaci ztrát energie. Základním kontrolním kritériem pro hodnocení provozu fotovoltaické elektrárny je její provozní výkonnost (PR), kterou můžeme definovat následující rovnicí:

$$PR = \frac{E}{((G_E - U_O) \cdot A \cdot E_{ffm})} \quad (\%) \quad (3.11)$$

kde

E celková vyprodukovaná elektrická energie (Wh)

G_E celková dopadající energie slunečního záření ($\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$)

A celková plocha FV panelů (m^2)

E_{ffm} účinnost FV panelů dle výrobce (%)

U_O celkové množství energie slunečního záření, kterou není možno invertovat na elektrickou energii ($\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$)

Každá fotovoltaická elektrárna umístěná ve venkovním prostředí by měla být vybavena ochranou proti přepětí a zásahu bleskem, a to jak na straně DC, tak na straně AC. Z hlediska minimalizace ztrát ve vedení nemusí být vždy výhodné minimalizovat úseky stejnosměrného vedení. Především u systémů s vysokým instalovaným výkonem se můžeme setkat s rozsáhlými rozvody na DC straně s napětím až 1000 V.

3.3.1 Příprava a stavba fotovoltaické elektrárny

Prostup výstavby fotovoltaické elektrárny lze rozdělit do několika následujících kroků: [12]

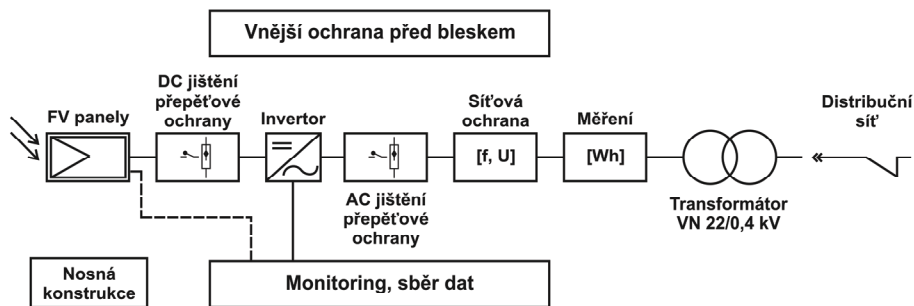
- odborná prohlídka technika na místě instalace
 - zjištění využitelné plochy, ověření, zda místo není stíněné, kontrola možnosti uchycení a kotvení konstrukcí, nosnost střechy, možnosti provedení kabelových tras a místo připojení výrobní
- předběžný náčrt technického provedení na základě prohlídky a stavebních výkresů a určení instalovaného výkonu podle technických možností a finančních představ investora

- podání žádosti o řípojení lokálnímu distributorovi elektrické energie
- vyžádání souhlasu všech majitelů objektu, instaluje-li se FVE na budovu nebo všech majitelů sousedních pozemků a obce při instalaci FVE na volnou plochu
- vyhotovení studie připojitelnosti
- vypracování projektové dokumentace a vyřízení stavebního povolení

3.3.2 Technické řešení FVE

Obecně lze říci, že téměř 80% celkových pořizovacích nákladů na fotovoltaický systém tvoří fotovoltaické panely, invertory a nosná konstrukce. Je tedy vždy velmi důležité najít takové technické řešení, které bude pro dané místo a typ instalace poskytovat maximální využitelnost pro investora. Jednotlivé komponenty fotovoltaické elektrárny jsou vidět na obrázku 3.18. Jednotlivé instalace můžeme rozdělit podle tří základních ukazatelů:

- instalovaného výkonu
 - systémy do 100 kWp
 - invertory malých výkonů (1,5 – 8 kW)
 - systémy nad 100 kWp
 - centrální invertory s výkonem 40 – 1000 kW
- nosné konstrukce
 - pevné (statické) systémy
 - natáčecí systémy
 - jednoosé
 - dvouosé
- umístění
 - střechy budov – pevné systémy
 - integrace do plášťů budov
 - instalace na volných plochách



Obr. 3.18: Komponenty fotovoltaického systému [15]

Výchozím bodem při návrhu fotovoltaické elektrárny je definice jejího využití. Při stanovení optimální velikosti instalovaného výkonu elektrárny velmi záleží, jaké jsou primární požadavky investora - jestli je hlavní požadavek "dostat na střechu co nejvíc" nebo například "optimalizovat elektrárnu tak, aby co nejvíc vyráběla pro vlastní spotřebu objektu". V prvním případě je maximální velikost elektrárny dána velikostí střechy a od roku 2011 také faktickým legislativním omezením, které dovoluje instalaci elektráren do velikosti 30 kWp. [11]

V případě optimalizace elektrárny na efektivitu spotřeby v místě výroby (a tedy i na nejlepší návratnost investice) je potřeba počítat s tím, že čím větší bude výroba (a tedy velikost) elektrárny v poměru ke spotřebě objektu, tím menší procento z elektřiny vyrobené elektrárnou bude v místě využito (přebytek pak bude dodán do distribuční sítě). V reálné situaci závisí také na typu spotřeby objektu - optimální je stav, kdy hlavní spotřeba v objektu je vyžadována v průběhu dne (např. školy, výrobní haly, administrativní budovy apod.). V případě rodinných domů, kdy je spotřeba směřována spíše do brzkých ranních a pozdních odpoledních a večerních hodin, je situace vyvážené výroby a spotřeby trochu komplikovanější. Tuto bilanci vylepšují víkendy, topení (např. tepelné čerpadlo, přímotopy), které pracují i přes den a další "denní" spotřebiče (např. klimatizace, ohřev bazény a pod.). Také je možno část spotřeby přesměrovat (posunutí startu myčky, pračky, apod.) a tak výsledný poměr zlepšit.

3.3.3 Výběr a návrh konfigurace fotovoltaických panelů

Z hlediska technického řešení neexistuje jediné univerzální ideální provedení. Optimální návrh fotovoltaické elektrárny vždy vychází ze zkušeností jednotlivých projektantů. Obvykle jsou využívány fotovoltaické panely s výkonem 160 – 240 Wp. V ideálních podmínkách mají panely obvykle hodnotu výstupního stejnosměrného napětí 40 V a proud 5 A.

Návrh orientace a rozložení panelů

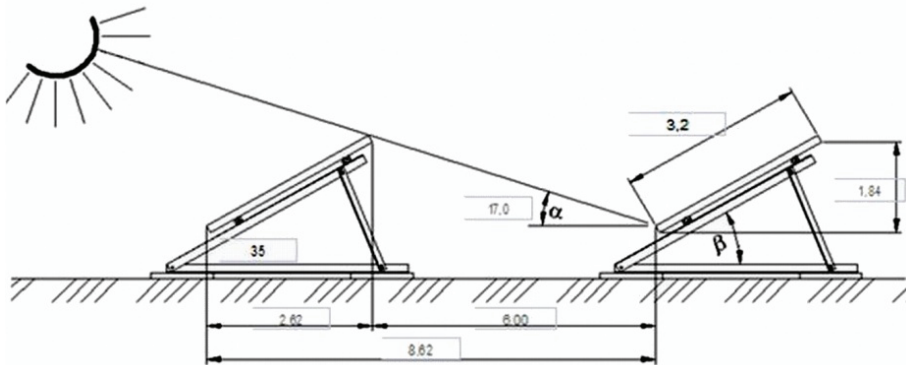
Při návrhu fotovoltaické elektrárny je důležitá správná orientace fotovoltaických panelů. Pro maximální využití energie slunečního záření je ideální orientace panelů směrem k jihu. Odklon panelů o několik stupňů směrem na jihozápad nebo na jihovýchod má pouze minimální vliv na celkovou vyrobenou energii. Obecně se uvádí, že při změně orientace do 20° od jižního směru, je snížení výkonu elektrár-

ny do 5%. V případě orientace panelů směrem na západ nebo východ je pokles výroby výraznější, a to až 25%. [11]

Ideální sklon pevně instalovaných panelů v našich zeměpisných šířkách je okolo 33°. Jde o kompromis mezi výtěžností elektrárny při Slunci nízko nad horizontem (zimní období) a vysoko na obloze (letní období). I zde platí, že rozdíl v instalaci mírně odlišné od optimální polohy má pouze malý negativní vliv na celkovou energetickou výtěžnost. Při instalaci v rozmezí 10°- 60° je pokles výkonu do 10%.

Vyšší pokles výkonu bude při osazení panelů svisle (např. na fasádu), a to cca 25-30%. Uvedené parametry platí pro panely vyrobené z krystalického křemíku.

Panely amorfnní mají obecně nižší účinnost, na druhé straně nejsou tak citlivé na potřebu přímého slunečního záření a např. při instalaci na svislou stěnu mohou při stejné ploše dodávat obdobný výkon jako polykrystalické nebo monokrystalické panely.



Obr. 3.19: Dimenzování rozstupů mezi panely [15], [2]

Z uvedených informací vyplývá, že při optimalizaci fotovoltaického systému pro zimní podmínky (např. Grid-off systémy využívané pro akumulaci energie) je optimální umístění panelů v poloze téměř svisle (=> kolmo na paprsky ze slunce nacházejícího se nízko nad horizontem).

Při stavbě fotovoltaické elektrárny na volném prostranství nebo na ploché střeše je velmi důležité stanovit optimální rozestupy mezi jednotlivými řadami panelů. Tyto rozestupy se obvykle určují pro nejhorší možný případ, což je situace, kdy je Slunce nejnižší nad obzorem. Na našem území dopadají sluneční paprsky v zimním období na zemský povrch pod úhlem cca $\alpha = 17^\circ$. Na obrázku 3.19 je vidět potřebné rozmístění panelů právě při uvedených podmínkách.

Další důležitou věcí při návrhu fotovoltaické elektrárny je eliminace případného částečného zastínění způsobeného stromy, okolními budovami, sloupy elektrického vedení apod. I částečné zastínění panelů může mít za následek citelné snížení energetických zisků, zvláště v případě, že by se jednalo o zastínění pravidelně se opakující, se kterým nebylo v průběhu návrhu FVE kalkulováno.

Nosné a konstrukční prvky

Nezanedbatelnou částí FVE je bezesporu nosná konstrukce pro panely. Konstrukční systémy se dají rozdělit podle typu instalace na:

- Konstrukce pro sedlové střechy
 - Vhodná pro malé instalace na rodinné domy se sedlovou střechou se sklonem přibližně 35° a orientací k jihu nebo jihozápadu. Nosným prvkem zde jsou hliníkové profily přichycené speciálními háky ke konstrukci střechy (obrázek 3.20). K profilům jsou připevněny FV panely. Tato konstrukce je snad vůbec nepoužívanější zejména pro její jednoduchost, snadnou montáž a nízkou cenu.
- Konstrukce pro ploché střechy
 - Tyto konstrukce jsou většinou tvořeny ocelovými pozinkovanými profily trojúhelníkového tvaru, které jsou vzájemně „zavětřované“ a podélně spojené hliníkovým profilem pro uchycení FV panelů. Konstrukce se ke střeše připevňuje buď napravo chemickými kotvami, nebo se zatíží betonovými bloky či dlaždicemi (obrázek 3.21).
- Konstrukce pro volná prostranství
 - Stejně řešení jako u plochých střech se používá u větších elektráren postavených na volných prostranstvích s tím rozdílem, že konstrukce se spojuje pevně se zemí a to buď závrtnými šrouby, pozinkovanými profily zatlačenými do země, nebo betonovými základy (obrázek 3.21).
- Polohovatelné systémy
 - Dalším možným, a co do výtěžnosti, nejlepším způsobem pro uchycení FV panelů jsou polohovatelné systémy tzv. trackery (obrázek 3.22). Tracker automaticky otáčí a naklání panely ke Slunci dle jeho astronomické dráhy a umožňuje tedy maximální výtěžnost z FVE. Zkušenosti hovoří o 30-35% nárůstu výtěžnosti oproti běžným pevným instalacím. Nevýhodou ovšem zůstávají zvýšené počáteční investiční náklady, vlastní spotřeba systému a nutná údržba.



Obr. 3.20: Možné varianty uchycení panelů na sedlové střeše [15], [2]



Obr. 3.21: Uchycení panelů na ploché střeše a volném prostranství [15], [2]



Obr. 3.22: Polohovatelný systém pro uložení panelů [15]

3.3.4 Invertory

Fotovoltaické panely vyrábí pouze stejnosměrný proud, který je nutno změnit na proud střídavý, aby bylo možno připojit elektrárnu do elektrické rozvodné sítě. Zařízení umožňující tuto přeměnu se nazývá měnič nebo tzv. invertor. Používané invertory jsou také schopny poskytovat informace o vlastní výrobě elektrické energie.

Invertor musí dodávat co nejvyšší výkon s minimem ztrát. To může být zajištěno odstraněním transformátoru s následným snížením tepelných ztrát a užitím zařízení pro sledování bodu maximálního výkonu (MPP), které změnou vstupního odporu zajišťuje optimální chod invertoru. Přifázování střídače (připojení energie z panelů do sítě) bývá plně automatizováno. Na životnost invertorů má mimo jiné vliv i konstrukční řešení - chlazení přirozenou cirkulací vzduchu bez použití ventilátoru. Pro konkrétní použití se vyrábějí invertory ostrovní a síťové.

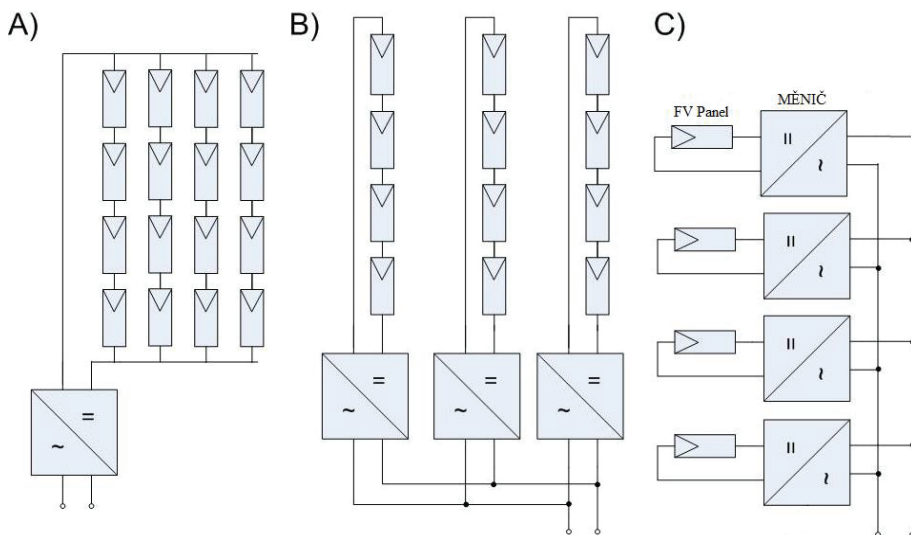
Ostrovní generují svůj vlastní kmitočet, který odpovídá kmitočtu v rozvodné síti ($f = 50 \text{ Hz}$). Tak je možno použít v této síti běžné elektrické spotřebiče střídavého proudu.

Síťové měniče synchronizují svůj kmitočet a napětí s aktuálními parametry rozvodné sítě.

Z hlediska zapojení v systému FVE se invertory dělí na:

- modulové invertory (invertor je připojen pouze k jednomu FV modulu),
- řetězcové nebo stringové (každý invertor je připojen k několika FV panelům vzájemně propojeným do série, případně i paralelně)
- centrální invertory (připojené na stovky až tisíce FV panelů).

Příklady zapojení jednotlivých typů invertorů jsou na obrázku 3.23. S modulovými střídači (A) se setkáme velmi zřídka, výlučně u malých systémů. Středně velké elektrárny využívají řetězcových střídačů (B). V případě velkých elektráren se používá koncept jak velkých centrálních střídačů (C), tak i velkého množství řetězcových střídačů.



Obr. 3.23: Příklady zapojení invertorů [2], [14]

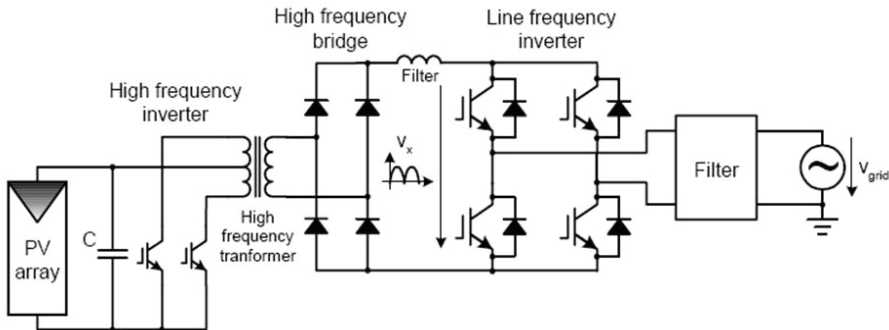
Základní parametry invertorů

Při výběru vhodného invertoru je potřeba správně definovat jeho parametry.

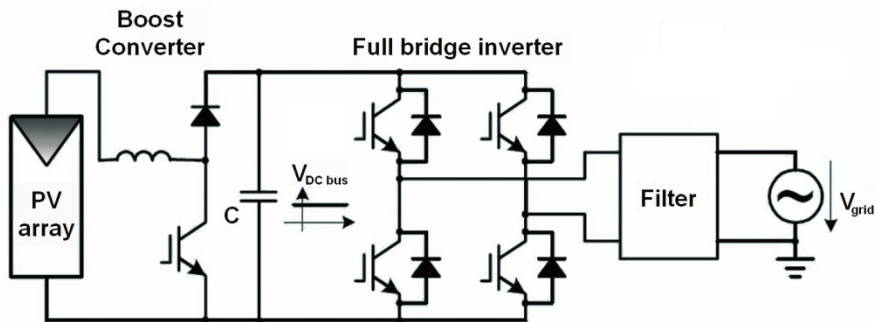
Mezi základní parametry inverterů patří:

- nominální výkon AC a DC strany,
- maximální vstupní napětí,
- rozsah napětí MPP trackeru,
- účinnost invertoru,
- vnitřní konfigurace
 - počet nezávislých MPP trackerů
 - počet výkonových stupňů
 - možnosti komunikace apod.
- maximální vstupní proud
- krytí IP

Příklady vnitřního zapojení inverterů jsou znázorněny na obrázku 3.24 a 3.25. Výhodou inverterů s transformátorem je galvanické oddělení a tím i vyšší bezpečnost a možnost použití fotovoltaické panely založené na tenkovrstvé technologii. Určitou nevýhodou jsou však vyšší ztráty a velká hmotnost. V porovnání provozní účinnosti dosahují inverytory s transformátorem účinnosti o 1 – 2% nižší než inverytory bez transformátoru.



Obr. 3.24: Vnitřní zapojení invertoru s transformátorem [2], [15]



Obr. 3.25: Vnitřní zapojení invertoru bez transformátoru [2], [15]

3.4. Literatura

- [1] Hofman, J., *Měřicí systém pro sledování efektivity fotovoltaického panelu*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010, diplomová práce, vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [2] Kolektiv autorů, *Navrhování a projektování fotovoltaických elektráren*, Odborná seminář ČKAIT, Czech RE Agency, 2008, FEI ČVUT Praha
- [3] Vojáček, A., *Solární články a jejich použití v sensorice a automatizaci*, 2005, dostupné z <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005120501>, cit. 14.11.2011
- [4] Vaněk, J., *Studijní podklady pro předmět Alternativní zdroje energie*, 2010, Ústav elektrotechnologie VUT v Brně
- [5] *Webové stránky portálu ASB* – <http://www.asb-portal.cz/tzb/energie/fotovoltaicke-clanky-historie-a-soucasne-trendy-vyvoje-2262.html>, cit. 8.12.2011
- [6] Krejčí, T., *Vypracování studie připojitelnosti pro FV elektrárnu*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 59 s., bakalářská práce, vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.
- [7] *Webové stránky společnosti EkoWATT – Centrum pro obnovitelné zdroje energie*, – <http://www.ekowatt.cz/cz/informace/energie-slunce---vyroba-elektriny>, cit. 27.10.2010
- [8] *Webové stránky společnosti Isolar* – <http://www.isolar.cz/technologie.html>, cit. 27.10.2010
- [9] [5. Photon International, 5, 2010]
- [10] *Webové stránky společnosti Solar-C, s.r.o.* – <http://solar-c.cz/thema/fotovoltaicke-systemy/produkty/ostrovni-systemy-grid-off>, cit. 6.12.2011
- [11] *Interní firemní materiály společnosti SUNLUX, s.r.o.* – <http://www.sunlux.cz>
- [12] Wolf, P., *Fotovoltaické elektrárny – od návrhu po realizaci*, *Světlo 2009/4*, FCC Public, s.r.o., ISSN: 1212-0812
- [13] Šúri M., Huld T.A., Dunlop E.D. Ossenbrink H.A., *Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries*, 2007, *Solar Energy*, 81, 1295–1305 – <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [14] Benda, V., Staněk, K., Wolf, P., *Fotovoltaické systémy – Učební texty k semináři*, 2011, VUT v Brně
- [15] Mastný, P., *Studijní podklady předmětu Malé zdroje elektrické energie*, 2011, Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně
- [16] Photon International, 5, 2010
- [17] Janíček, F. a kolektiv, *Obnovitelné zdroje energie 2 – Perspektivně premeny a technologie*, STU FEI Bratislava, 2010, ISBN: 978-80-98402-13-7
- [18] Cenka, M., *Obnovitelné zdroje energie*, FCC Public, 2001, Praha, Česká republika, ISBN: 80-901985-8-9
- [19] *Webové stránky Ústavu elektroenergetiky VUT v Brně FEKT* – <http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/index.php/online-mereni>, cit. 6.12.2011

4. Biomasa

4.1. Úvod

Biomasa neodmyslitelně patří mezi obnovitelné zdroje energie. Biomasu můžeme popsat jako přeměněnou sluneční energii, zachycenou rostlinami a uloženou ve formě chemické energie. Dalo by se říci, že v případě hospodárného využívání půdy bude biomasa k dispozici neustále. Její velkou předností je její minimální vliv na množství CO₂ v ovzduší při jejím spalování.

Pro dobrou využitelnost biomasy je nutné dodržet určité technologické postupy při jejím zpracování. Jedním z faktorů, který ovlivňuje kvalitu biomasy, je obsah vody, která má přímý vliv na výhřevnost. Čerstvá biomasa má velký obsah vody a ta má velké výparné teplo. Před spalováním je proto třeba biomasu vysušit. Všeobecně se doporučuje snížit vlhkost pod 30 % a za optimální se považuje vlhkost do 20 %. Pro účely lisování briket nebo pelet je třeba surovinu vysušit na ještě nižší obsah vody.

Biomasu používáme k topení nejčastěji ve formě kusového dřeva. Dřevo je poměrně dostupné a levné, nicméně topidla na spalování kusového dřeva jsou poměrně náročná na obsluhu a obtížně se reguluje jejich výkon. Jednou z možností řešení tohoto nedostatku je využití akumulárních nádrží, které přebytečné teplo uloží na pozdější dobu a umožní tak kotli pracovat celou dobu v optimálním režimu.

Velmi častou formou biomasy, kterou využíváme, jsou pelety. Pelety se vyrábějí lisováním, mají však tak malé rozměry, že s nimi lze zacházet do jisté míry jako s kapalným palivem. Zásadní výhodou pelet je to, že hořák na pelety může být poměrně malý a pelety mohou být dávkovány do hořáku podle potřeby tepla. V důsledku toho je možné dělat topidla s výkonem zhruba od 2kW a tento výkon se dá podle požadavků termostatu rychle měnit. Pelety mají také malý obsah vody a popela a tedy dobrou výhřevnost. Automatická topidla na pelety se svým komfortem obsluhy přibližují topidlům na plyn nebo topný olej, cena paliva je ale o něco nižší.

Specifické postavení v oblasti biomasy má štěpka. Dřevní štěpka se vyrábí především z odpadu při těžbě dřeva nebo prořezávání stromů kolem cest a v parcích (zbytky větví, kůry a podobně). Dalším zdrojem štěpky mohou být „energetické plantáže“ tj. porosty rychle rostoucích dřevin. Vzhledem k tomu, že se surovina pro výrobu téměř vždy zpracovává čerstvá, je vlhkost štěpky poměrně vysoká. Cena štěpky je oproti peletám podstatně nižší a tak se mnohdy vyplácí spalovat štěpku ve vlhkém stavu s nižším ziskem tepla, než ji sušit. Z hlediska konstrukce je spalovací zařízení na štěpku větší, složitější a dražší než zařízení pro spalování pelet. Štěpka se proto téměř výlučně spaluje ve větších zařízeních (obecní výtopny, elektrárny). [14]

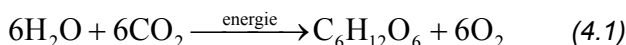
Limity určující využití biomasy pro energetické účely můžeme shrnout do několika následujících bodů: [15]

- produkce biomasy pro energetické účely konkuruje dalším způsobům využití biomasy,

- zvyšování produkce biomasy vyžaduje rozšiřovat produkční plochy nebo zvyšovat intenzitu výroby, což přináší zvýšené investice,
- získávání energie z biomasy v současných podmínkách s obtížemi ekonomicky konkuruje využití klasických energetických zdrojů,
- maximální využití zdrojů biomasy k energetickým účelům je z celosvětového hlediska problematické vzhledem k rozmístění zdrojů biomasy a spotřebičů energie, vzhledem k potížím s akumulací, transportem a distribucí získané energie.

Biomasou je materiál biologického původu nefosilního charakteru, který pochází zpravidla z pěstování rostlin, chovu živočichů, produkce organického původu, a jiné organické odpady. [1][2]

Základním principem získávání biomasy je zachycování slunečního záření a jeho využití k endotermické reakci, která se nazývá fotosyntéza. Vzniklý jednoduchý cukr se pak v dalších nesčetných reakcích mění na složitější cukry, škroby a další látky, které se v tělech živočichů mění na další chemické sloučeniny.



Využití biomasy jakožto obnovitelného zdroje má z hlediska energetiky veliký význam. Nespornými přednostmi jsou především vysoký energetický potenciál a centralizovaná výroba energie. Možnost produkce biomasy v lokálních podmínkách snižuje energetickou závislost na zdrojích z dovozu. Nezanedbatelnou výhodou je i zpracování a likvidace odpadů, které mohou být v nezpracované podobě toxické. Největší výhodou jsou široké možnosti řízení výroby energie v časovém měřítku, na rozdíl od ostatních obnovitelných zdrojů, které buď neumožňují řízení výroby vůbec a jsou zcela závislé na podmínkách počasí nebo jsou regulovatelné jen v omezené míře. Mezi nevýhody využití biomasy lze uvést malou účinnost využití sluneční energie a nutnost dopravy do místa zpracování.

4.2. Druhy biomasy

Biomasu využitelnou pro energetické účely je možné rozdělit do následujících skupin:

- fytomasa s vysokým obsahem lignocelulózy,
- fytomasa olejnatých plodin,
- fytomasa s vysokým podílem škrobu a cukru,
- organické odpady a vedlejší produkty živočišného původu,
- směsi různých organických odpadů.

Podle [1] se pro získávání energie využívá biomasa těchto typů:

- biomasa záměrně pěstovaná pro energetické účely
 - cukrová řepa, obilí, brambory, cukrová třtina, olejniny, energetické dřeviny
- odpadní biomasa

- rostlinné zbytky ze zemědělské prvovýroby a údržby krajiny
- odpady z živočišné výroby
- komunální organické odpady z venkovních sídel
- organické odpady z potravinářských a průmyslových výrob
- lesní odpady (dendromasa)

Způsob využití biomasy k energetickým účelům je dán jejími fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Jedním z nejdůležitějších parametrů určující kvalitu a využití biomasy je *vlhkost* (obsah sušiny v biomase). Hodnota 50% sušiny je přibližná hranice mezi mokřými procesy využití biomasy (obsah sušiny je menší než 50%) a suchými procesy (obsah sušiny je větší než 50%). [1]

V tabulce 4.1 je uveden obsah vody a výhřevnost u některých druhů biomasy využívané k energetickým účelům.

Druh paliva	Obsah Vody	Výhřevnost
	(%)	(MJ.kg ⁻¹)
Listnaté dřevo	15	14,605
Jehličnaté dřevo	15	15,584
borovice	20	18,4
vrba	20	16,9
olše	20	16,7
habr	20	16,7
akát	20	16,3
dub	20	15,9
jedle	20	15,9
jasan	20	15,7
buk	20	15,5
smrk	20	15,3
bříza	20	15,0
modřín	20	15,0
topol	20	12,9
Dřevní štěrka	30	12,18
Sláma obilovin	10	15,49
Sláma kukuřice	10	14,4
Lněné stonky	10	16,9
Sláma řepky	10	16,0

Tab. 4.1: [15]

4.2.1 Biomasa rostlinného původu

Biomasu rostlinného původu lze rozdělit do dvou skupin a sice na odpadní biomasu a biomasu pěstovanou za účelem energetického využití. O výhodnosti zpracování odpadní biomasy není pochyb. Prostřednictvím ní se lze zbavit odpadu, který by jinak nebyl využit nebo by byl proplýtván. Navíc lze jím alespoň částečně nahradit již tak vysokou spotřebu fosilních paliv. O prospěchu účelně pěstované biomasy pro energetické využití lze již vést polemiky. I když jde z hlediska politiky Evropské Unie o propagovanou a podporovanou činnost, má svá značná negativa. V následujícím nebudou tyto kategorie rozlišovány, ale rozdělení bude provedeno podle charakteru a složení z hlediska paliva.

Dřevo a dřevní odpady

Jde o tradiční energetické palivo, které se pro spalování v elektrárnách nebo výtopnách zpracuje do podoby tzv. dřevní štěpky. Využívá se odpad z dřevozpracujícího průmyslu, odpady z lesní těžby, odpady papírnictví atd. Pro pěstování se využívají tzv. rychlerostoucí dřeviny.

Rychlerostoucí dřeviny

Jde o dřeviny pěstované za účelem energetického využití, které jsou charakterizovány zejména vysokým ročním výnosem z osázené plochy a poměrně krátkým obdobím mezi sklizněmi (3-7 let). Tento typ pěstování neklade většinou vysoké nároky na kvalitu půdy, ale základní požadavky musí být splněny. Nutností je dostatečný přísun vláhy resp. vysoká hladina spodních vod, snadný přístup pro stroje zajišťující mechanizovanou sklizeň. [7][8]

V podmínkách České republiky jsou pro pěstování vhodné různé druhy topolů (obr. 4.1), vrby, ale také olše, lípy, lísky či jeřáby. Některé druhy není nutné po sklizni opětovně vysazovat, protože sami obrázejí a po uplynutí cyklu je možno opět sklízet. [7]



Obr. 4.1: Japonké topoly [16]

Obilní a řepková sláma

Sláma zemědělských plodin je významný zdroj energetické biomasy. Používá se sláma obilovin a sláma řepky olejné. Do této kategorie lze též zahrnout zbytky kukuřice, pěstované pro zrno.

Olejnaté plodiny

Do této kategorie spadá řepka (obrázek 4.2), slunečnice, len a další hospodářské plodiny. Ze semen těchto plodin je za tepla lisován olej. Olejnatá semena se před zpracováním kondiciují na 80-90°C a jsou lisována šnekovými lisami, čímž se získá přibližně 50% oleje. Pokrutiny z lisu jsou v extraktoru míseny technickým rozpouštědlem. Ze směsi je pak destilační oddělen olej od rozpouštědla. Celková účinnost procesu se pohybuje kolem 98%. Získaný olej se esterifikuje např. na bionaftu. [1]



Obr. 4.2: Řepka olejná [18]

4.2.2 Biomasa živočišného původu

Exkrementy hospodářských zvířat

Druh zvířat a způsob ustájení mají veliký vliv na složení kejdy a hnoje. Podíl sušiny je nejvyšší u slepičího trusu, střední u hovězí kejdy a nízký u prasečí kejdy. Podíl sušiny se odrazí v množství vyprodukovaného metanu při anaerobní fermentaci. Dalším faktorem ovlivňujícím produkci a kvalitu metanu je druh a způsob chovu, druh podlážky či podestýlky a krmivo. Množství generovaného plynu mohou také zcela zásadně ovlivnit vyšší koncentrace vybraných antibiotik, chemoterapeutik i desinfekčních prostředků v substrátu.

Kejda

Kejda je směs tuhých a kapalných zvířecích exkrementů produkovaná zvířaty ustájenými bez podestýlky. Zdrojem tohoto materiálu jsou především dojnice, jateční hovězí dobytek a jateční prasata.

Pevný hnůj

Zdojem jsou zvířata ustájená na chovu s podestýlkou. Vzhledem k podílu slámy je při zpracování ve fermentoru nutné provést rozmělnění substrátu.

Kejda a hnůj z volného ustájení

Jedná se o kal bez podestýlky z tuhých a kapalných zvířecích exkrementů. Pro výrobu bioplynu je to výborný materiál, který z důvodu vysokého podílu vody nelze kompostovat.

Kafilerní tuky

Jako zdroj biomasy je možné použít odpadní kafilerní tuk, kterého je poměrně velké množství soustředěno do kafilerí. Příznivým faktorem je jeho poměrně nízká cena, ovšem negativem je velké množství volných kyselin a vysoká teplota tuhnutí.

Tato surovina je využitelná pro spalování nebo přeměnu na bionaftu. Transesterifikace kafilerního tuku vyžaduje jiné podíly přidaných látek než je tomu u esterifikace rostlinných olejů.

4.2.3 Palivo z komunálního odpadu

Roztříděný komunální odpad je možné energeticky zpracovávat ve spalovnách. Organická část musí splňovat základní podmínky pro jeho zpracování, aby bylo energeticky výhodné. Zároveň je důležité zajištění dobrého třídění odpadu, aby se zamezilo možným únikům škodlivin do ovzduší.

V praxi spalovny komunálního odpadu nerozlišují mezi odpadem organického původu (tedy charakteru biomasy) a spalují značný podíl odpadů fosilního charakteru (např. plasty).

4.3. Zpracování biomasy

Jak už bylo zmíněno pro zpracování biomasy se využívá celé řady chemických procesů, které ji buď mění na jiný druh paliva nebo ji přímo mění na tepelnou energii. Přehled těchto procesů zpracování je uveden v následujících bodech:

- termochemická přeměna biomasy (suché procesy)
 - spalování
 - zplyňování
 - pyrolýza
- biochemická přeměna biomasy (mokrý procesy)
 - alkoholové kvašení
 - metanové kvašení
- fyzikální a chemická přeměna biomasy
 - mechanicky (štípání, drcení, lisování, peletování)
 - chemicky (esterifikace surových bioolejů)

- získávání odpadního tepla při zpracování biomasy
 - kompostování
 - aerobní čištění odpadních vod
 - anaerobní fermentace pevných organických odpadů

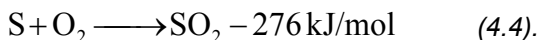
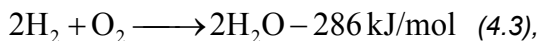
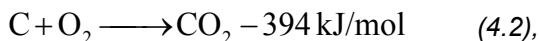
Z hlediska energetického využití lze biomasu rozdělit následujícím způsobem:

- a) lokální a centrální vytápění
- b) elektroenergetika (centralizovaná výroba elektrické energie, kogenerace lokální i centralizovaná)
- c) doprava

4.3.1 Spalování

Jako palivo pro spalovací procesy je možné použít téměř jakýkoliv biomateriál. Nejčastěji je spalováno dřevo a odpady z dřevozpracujícího průmyslu, sláma, pícniny, obiloviny, rostlinné zbytky ze zemědělské výroby, organický a komunální odpad. Je také možné využít olejnaté plodiny jako je řepka nebo slunečnice. [1]

Při spalování dochází k exotermickým reakcím paliva s kyslíkem, viz následující rovnice:



Mimo oxidu uhličitého a vodní páry vznikají při spalování biomasy i další znečišťující látky. Jde o tuhé znečišťující částice a oxid uhelnatý, vznikající nedokonalým spalováním. Oxidy dusíku, které vznikají nejen ze vzdušného dusíku, ale především z dusíku obsaženého v biomase samotné. V biologickém palivu je částečně obsažena síra, která se při spalovacím procesu podílí na vzniku oxidů síry. Jejich koncentrace bývají však výrazně nižší než při spalování uhlí. V popelu je pak možné objevit relativně vyšší podíl těžkých kovů. [1]

Při spalování zemědělské fitomasy vznikají rovněž vyšší emise chlóru, který působí agresivně na spalovací komoru.

Jak už bylo zmíněno pro spalování jsou nejčastěji využita pevná paliva, čemuž odpovídají i typy topenišť. Pro spalování dřevní štěpky, či zemědělské fitomasy se používají kotle s fluidním ložem nebo roštové kotle. Teplota tečení a tavení dřevního popela se pohybuje mezi 860°C až 1100°C.

Při spalovacím procesu se po zahřátí paliva uvolňuje směs uhlovodíků a dusíkatých látek, která spolu s pevným uhlíkem prohořívá. Vysoký podíl plynné hořlaviny je typický pro biomasu, i když je závislý na spalovací teplotě. Právě tento podíl definuje požadavky na dobu hoření, délku plamene, podíl vzdušného kyslíku, tak aby došlo k dobrému prohoření spalované látky. Nejen tyto požadavky mohou být výrazným omezením pro spoluspalování biomasy.[4]

Obecně můžeme říci, že proces spalování biomasy je ovlivněn následujícími faktory:

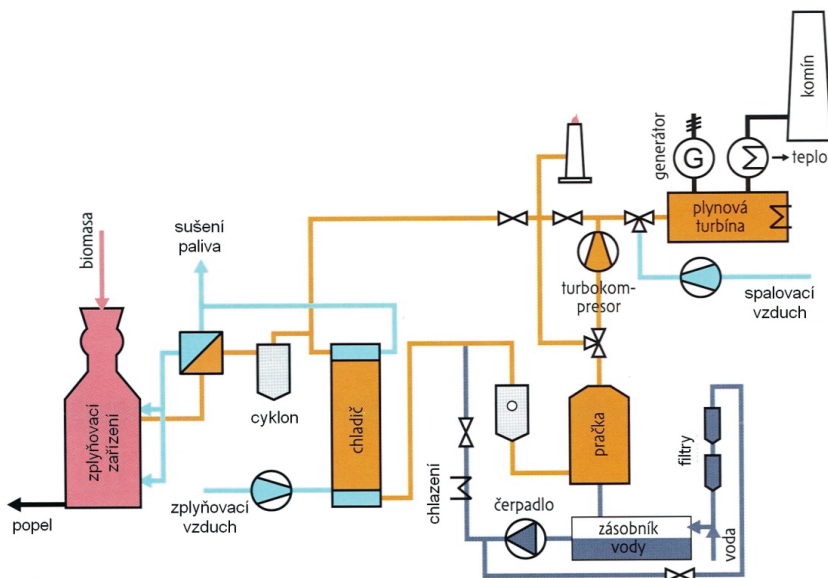
- vysoký podíl uvolňované prchavé hořlaviny při teplotách nad 200°C
- dlouhé plameny – obtížný průnik kyslíku pro spalování
- dlouhá doba prohořívání spalitelných plynů – možnost tvorby sazí
- vyšší spotřeba spalovacího vzduchu
- nízká hustota fytopaliv

Spoluspalování biomasy

Častým způsobem využití biomasy je její spoluspalování s jiným typem paliva fosilního charakteru (technologické schéma procesu je na obrázku 4.3). Výhodou spoluspalování je částečná náhrada fosilního paliva ekologičtější variantou při zachování výhodných parametrů fosilního paliva. Běžně se podíl biomasy v palivu pohybuje v rozmezí 5 – 20%. Specificky v České republice je biomasa jako příměšné palivo (nebo také v čisté formě) využívána v těchto energetických výrobnách:

- elektrárna Tisová,
- elektrárna Poříčí,
- elektrárna Hodonín,
- elektrárna Ledvice,
- elektrárna ve Dvoře Královém,
- teplárna v Plzni.

Největším spotřebitelem biomasy pro energetické účely je v současné době v České republice elektrárna Hodonín, která ročně zpracuje přibližně 250 tis. tun biomasy s výrobou asi 190 GWh elektrické energie. V současné době je jeden z kotlů v této elektrárně upraven pro 100% využití biomasy v technologickém procesu.



Obr. 4.3: Technologické schéma spoluspalování biomasy a uhlí [17]



Obr. 4.4: Skládka biomasy v elektrárně Hodonín

Emise ze spalování biomasy

Emisní faktor

Energetické využívání biomasy má zanedbatelný vliv na produkci „skleníkových plynů“, neboť se uvažuje, že množství CO_2 emitovaného spálením jistého objemu biomasy bylo dříve akumulováno. Z tohoto důvodu je často nesprávně uváděn emisní faktor pro spalování biomasy jako nulový. I když jde o správnou hodnotu z hlediska legislativy Evropské unie pro výpočet emisí CO_2 , z fyzikálního hlediska se emisní faktory CO_2 pohybují na hodnotách 62 až 86 kg/TJ. [3]

4.3.2 Zplyňování a pyrolýza

Pro zplyňování či pyrolýzu se používají především odpady z dřevozpracujícího průmyslu a organický komunální odpad. [1]

Zplyňování

Při zplyňování dochází k částečné chemické přeměně pevného paliva na plynné za pomoci zplyňovacích látek (vodní pára, H_2 , CO_2 , O_2). Teploty, za kterých chemické reakce probíhají, se pohybují kolem $700^\circ C$ až $1100^\circ C$. Nejčastější technologií je zplyňování na pevném loži, využívá se i dalších technologií – zplyňování s fluidní vrstvou, proudové zplyňovače. [4]

Zplyňování ve fluidní vrstvě využívá jako médium jen kyslík a vodní páru (ev. oxid uhličitý). Palivo je průtokem plynu nadnášeno a dochází tak k dobrému promíchávání, což urychluje distribuci tepla a i samotnou reakci. Obecně lze říci, že se snižující se teplotou je proces ekonomičtější. Naproti tomu při vyšších teplotách roste podíl vodíku, klesá podíl dehtu i CO_2 , což hraje ve prospěch kvality plynu. [11]

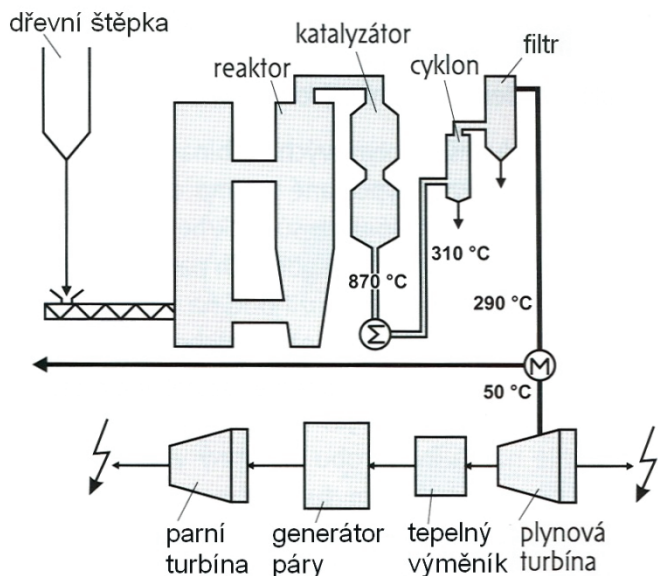
Druhou metodou je zplyňování v Battelle-Columbovu zplyňovacím systému, kde se promísí biomasa s pískem zahřátým na teplotu kolem $1000^\circ C$. Část materiálu se přemění na plyn a část na dřevěné uhlíky. Ty pak putují do kotle s fluidním ložem, kde se při teplotách kolem $850^\circ C$ spalují, aby se vyrobilo teplo pro ohřev písku. [10]

Plyn, který je produktem zplyňování obsahuje H_2 , CO , CH_4 a další uhlovodíky. Dále může obsahovat dusík (ať už vzdušný či z paliva), kyslík a také malé množství znečišťujících látek jako např. dehet, prach, oxidy dusíku a síry. [11]

Pro zplyňování je nejvhodnější palivové či odpadní dřevo získané při těžbě nebo v dřevozpracujících závodech. Dřevo se převážně zplyňuje za přítomnosti vzduchu. Zplyňování dřeva ve zplyňovači má následující průběh:

- sušení,
- pyrolýza,
- oxidace,
- redukce.

Jednoduché technologické schéma zplyňovacího cyklu je na obrázku 4.5.



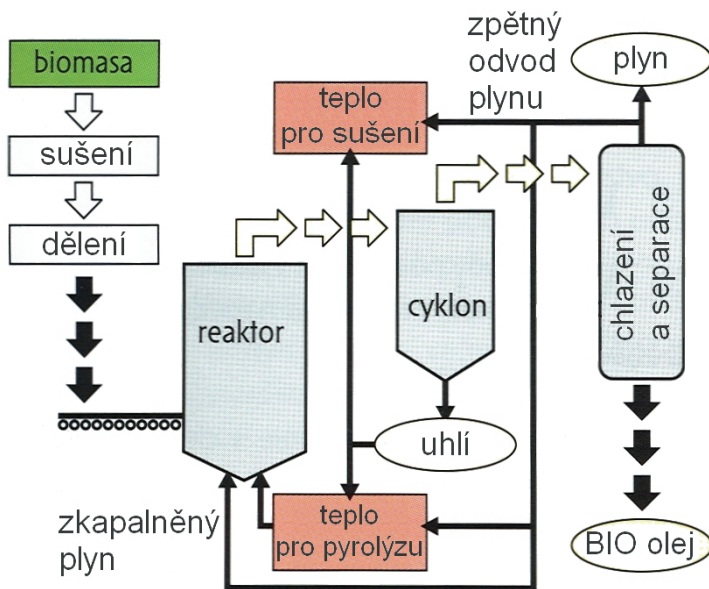
Obr. 4.5: Zplyňovací zařízení pro dřevní hmotu [17], [15]

Pyrolýza

Pyrolýza je jednoduchý a pravděpodobně nejstarší způsob úpravy biomasy na palivo vyšší kvality (dřevěné uhlí). Při pyrolýze dochází k termickému rozkladu hmoty za nedostatku vzduchu. Teploty se pohybují v rozmezí od 400 °C do 700 °C a vzniká plyn, který je směsí uhlovodíků. Dále je produktem pevná složka s vysokým podílem uhlíku (již zmíněné dřevěné uhlí). [4]

Plyn z pyrolýzy a spalování je možné využít například v kogeneračních jednotkách pracujících se spalovacím motorem nebo s plynovou turbínou.

V současné době je pyrolýza považována za velmi perspektivní technologii. Toto souvisí s tím, že proces probíhá při relativně nízkých teplotách, což vede k nižším emisím potenciálně škodlivých látek v porovnání s klasickým spalováním biomasy. Technologické schéma zařízení pro pyrolýzu biomasy je na obrázku 4.6.



Obr. 4.6: Technologické schéma pyrolýzy biomasy [17], [15]

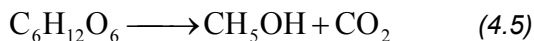
4.3.3 Anaerobní fermentace

Anaerobní fermentace dokáže zpracovat celou řadu produktů. Nejvíce využívané jsou odpady z živočišné výroby (exkrementy), organické komunální odpady a organické odpady z potravinářského průmyslu. Méně používané bývají dřevo a odpady z dřevozpracujícího průmyslu, olejnaté plodiny, sláma, obiloviny a jiný odpad ze zemědělské výroby.[1]

Alkoholové kvašení

Pro alkoholovou fermentaci se využívají škrobové a cukernaté energetické plodiny jako jsou brambory, cukrová řepa, cukrová třtina, obiloviny případně odpad z potravinářské výroby. [1]

Samotné alkoholové kvašení lze souhrnně popsat rovnicí (1.4), ve skutečnosti jde o sled několika chemických reakcí, ve kterých se nejprve glukóza v sérii přeměn metabolizuje na pyruvát, dále se dekarboxyluje na acetaldehyd a následně redukuje na ethanol.[12]



Pro správný průběh chemických reakcí je ve fermentorech regulována teplota i pH. Využívá se buď způsobu kvašení s recyklací kvasinek (kvasinky se přenášejí mezi kvasy) nebo s kontinuální výměnou kvašeného média. Účelem je úspora cukru, který by kvasinky k syntéze a k urychlení kvašeného procesu potřebovaly. Dále je nutné udržovat koncentraci alkoholu pod limitní hranicí, neboť způsobuje inhibici kvasinek a zpomalení procesu kvašení. [13]

Anaerobní fermentace odpadů z živočišné výroby

Proces anaerobní fermentace je z chemického hlediska vícestupňový proces, ve kterém dochází k postupné přeměně sacharidů, tuků a bílkovin na bioplyn působením metanogenních, acetotrofních a hydrogenotrofních mikroorganismů. Celý proces probíhá ve čtyřech fázích – hydrolýza, acidogeneze, acetogeneze a metanogeneze (schématicky je celý proces naznačen na obrázku 4.7):

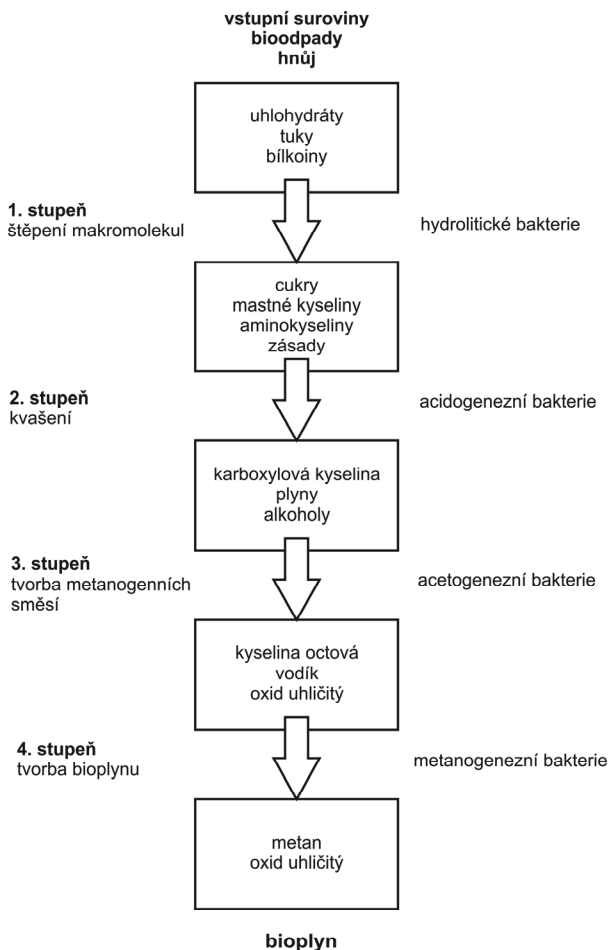
- Hydrolýza
 - při hydrolýze není vyžadováno bezkyslíkaté prostředí. Hydrolytické mikroorganismy vyžadují pouze dostatečný obsah vlhkosti. V tomto procesu dochází k přeměně vlhkých organických látek na jednodušší organické sloučeniny. [1]
- Acidogeneze
 - v této fázi z vlhkých organických látek vznikají organické kyseliny (kyselina kapronová, valerová, máselná, propionová a také kyselina octová, která se 3. fáze neúčastní). Současně se anaerobní bakterie podílejí na vzniku H_2 a CO_2 . [1]
- Acetogeneze
 - při acetogenezi přeměňují bakterie vyšší organické kyseliny na kyselinu octovou. [1]
- Metanogeneze
 - v této fázi probíhají dva procesy. Metanogenní acetotrofní bakterie rozkládají kyselinu octovou na metan a oxid uhličitý. Hydrogenní bakterie produkují z vodíku a oxidu uhličitého metan. [1]

Substrát	sušina	bioplyn
	(% objemu)	($m^3 \cdot t^{-1}$)
<i>hovězí kejda</i>	7	25
<i>prasečí kejda</i>	9	36
<i>jateční odpady</i>	18	65
<i>zeleninové odpady</i>	22	90
<i>slamný hnůj</i>	22	100
<i>domovní bioodpad</i>	35	100
<i>travní senáž</i>	30	150
<i>kuchyňské odpady</i>	33	245
<i>obilní odpad</i>	55	360
<i>odpadní tuky</i>		800

Tab. 4.2: Produkce bioplynu

Výstupním produktem anaerobní fermentace je směs plynů nazývaná jako bioplyn. Produkce bioplynu podle typu substrátu je pro některé vybrané typy substrátů

uvedena v tabulce 4.2. Bioplyn se skládá převážně z metanu, oxidu uhličitého a v menších koncentracích jsou to látky jako sirovodík, vodík či kyslík. [5]



Obr. 4.7: Postup výroby bioplynu [17]

Přítomnost vodíku zpravidla nemá vliv na kvalitu bioplynu, svedčí pouze o nerovnováze mezi bakteriemi podílejícími se na acidogenní a metanogenní fázi. Koncentrace kyslíku v bioplynu jsou nežádoucí, protože tvoří s bioplynem třaskavou směs. Sirovodík v zařízení způsobuje jeho korozi (armatury, plynoměry, hořáky, motory), navíc spalováním H_2S vznikají škodlivé oxidy síry SO_x . V praxi se z bioplynu odsiřuje profukováním přes granulát složený z oxidů železa, či přes železné piliny. Jiným způsobem odsíření je bakterie Thiobacillus, která v kapalně fázi mění H_2S na síru. [5], [6]

Spalování bioplynu je velmi výhodné z hlediska emise skleníkových plynů, neboť volně unikající metan má z hlediska globálních klimatických změn mnohem větší dopady než oxid uhličitý. Dalším nezanedbatelným faktem je možnost zpracování organických odpadů z živočišné výroby, které mohou způsobit kontaminaci

spodních i povrchových vod. Z tohoto důvodu je také vhodné, aby transport neprobíhal na velké vzdálenosti, aby se snížila pravděpodobnost havárie.

Bioplyn je možno využívat všude, kde se používají i jiná plynná paliva. Bioplyn lze pro energetické účely využít následujícími způsoby:

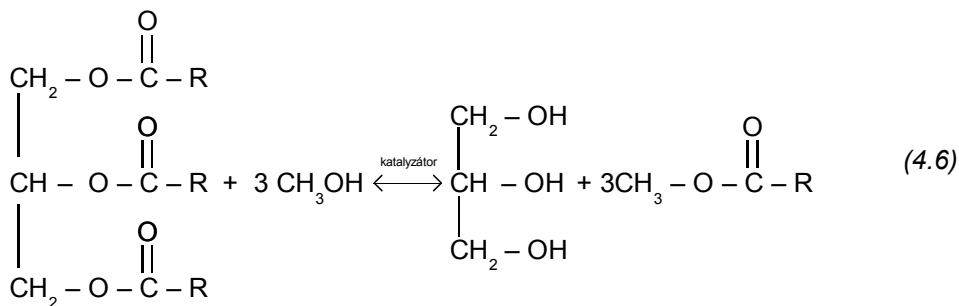
- přímé spalování,
- výroba elektrické energie a ohřev teplotnosného média (kogenerace),
- výroba elektrické energie, ohřev teplotnosného média, výroba chladu (trigenerace),
- pohon spalovacích motorů nebo turbín,
- využití bioplynu v palivových člancích.

Jak již bylo uvedeno, výroba bioplynu je vícestupňový proces. Zjednodušené technologické schéma je na obrázku 4.7. Všechny procesy v tomto cyklu vyžadují dodržení fyziologicky příznivé podmínky pro mikroorganismy. Jedná se především o teplotu, hodnotu pH, koncentraci substrátu a inhibitorů, které ovlivňují proces výroby bioplynu.

4.3.4 Esterifikace bioolejů

Vstupní surovinou pro esterifikaci jsou tuky. Využívá se olejnatých plodin, tedy především řepka, ale i slunečnice, hořčice, seznam či len. Pro zpracování je ovšem možné použít i kafilerní tuky. [1], [4]

Metylésterifikace je proces při němž se tuky (biooleje) za přidání metylalkoholu mění na metylestery (bionaftu). Směs je zahřívána a probíhá reakce, která je katalyzována zpravidla kyselinou (HCl, H₂SO₄, aj.) rozpuštěnou v alkoholu. Reakce se následně zastaví zchlazením, při němž se vytvoří dvě vrstvy. Spodní vrstva obsahuje nezreagovaný tuk, kyselinu a glycerin, v horní vrstvě je pak esterifikovaný tuk a metanol. Pro separaci vrchní vrstvy se pak využije destilace. Získaný methylester se v závěrečné fázi zbaví vlhkosti. Základní chemický proces je popsán v rovnici 4.6. [1], [9]



4.4. Literatura

- [1] Pastorek, Z. Biomasa – obnovitelný zdroj energie. FCC Public: 2004, 288 s. ISBN: 80-86534-06-5
- [2] Rosa, A.V. Renewable energy processes. Elsevier Inc.: 2009, 844 s. ISBN: 987-0-12-374639-9
- [3] Bartošík, T.; Mastný, P. Carbon capture technologies according to fuel type. In Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011. VSB Ostrava: 2011, s. 1-3. ISBN: 978-80-248-2393-5.
- [4] Koppe, K., Juchelková, D. Nutzung der biomasse – Využití biomasy. REPRONIS Ostrava: 2003, 112 s. ISBN: 80-7329-035-9
- [5] Schutz, H., Eder, B. Bioplyn v praxi. HEL Ostrava: 2004, 168 s. ISBN: 80-86167-21-6
- [6] Mikeš, J., Siglová, M., Zábranská, D. Biologická eliminace sulfidů z bioplynu. [online] Odpadové fórum 2011: 2011-04-13, 4 s. [cit. 2011-12-14]. <<http://www.odpadoveforum.cz/OF2011/dokumenty/prispevky/030.pdf>>
- [7] Weger, J., Havlíčková K. Zásady a pravidla pěstování rychle rostoucích dřevin (r.r.d.) ve velmi krátkém obmýtí. [online] 2002-01-18. [cit. 2011-12-10] <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zasady-a-pravidla-pestovani-rychle-rostoucich-drevin-r-r-d-ve-velmi-kratkem-obmyti>> ISSN: 1801-2655.
- [8] Bungay, H. R. Energy, The Biomass Options. Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York: 1981, 347 s. ISBN: 0-471-04386-9
- [9] Prošková, A., Kučera, J., Kopicová, Z. Využití odpadního kafilerního tuku k výrobě paliva. [online] Z vědy a výzkumu 12/2008 s.24-26. [cit. 2011-12-11] <www.chemicke-listy.cz/docs/full/2009_12_1034-1036.pdf>
- [10] Rezaiyan, J., Cheremisinoff, N. P. Gasification Technologies: A Primer for Engineers and Scientists. CRC Press, Boca Raton: 2005, 360 s. ISBN: 978-08247-2247-0
- [11] Pohořelý, M., Jeremiáš, M., Skoblia, S. Alotermní fluidní zplyňování biomasy. [online] Paliva 2009, s. 23-30. [cit. 2011-12-14] <http://paliva.vscht.cz/data/clanky/9_alotermni_fluidni_zplynovani_biomasy.pdf>
- [12] Čegan, A., Korecká, L. Biochemie pro bakalářské studium chemie a technické chemie. [online] Univerzita Pardubice, Pardubice: 2008, 61 s. [cit. 2011-12-15] <<http://biochemie.wbs.cz/skripta-biochemie.pdf>>
- [13] Kadlec, P. a kolektiv Technologie potravin II. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha: 2002, 236 s. ISBN: 80-7080-510-2
- [14] Mastný, P., *Využití znalostních technologií pro podporu návrhu energetických systémů v budovách*, Habilitační práce, Brno 2010, Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 123 stran
- [15] Mastný, P., Studijní podklady předmětu Malé zdroje elektrické energie, 2011, Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně
- [16] Webové stránky Japonský topol – <http://japonske-topoly.com/fotogalerie/>, cit. 20.12.2011
- [17] Janíček, F. a kolektiv autorů, *Obnovitelné zdroje energie 1 – Technologie pro udržitelnou budoucnost*, STU FEI Bratislava, 2007, ISBN: 978-80-969777-0-3
- [18] Webové stránky – http://www.gymnazium.milevsko.cz/projekty/oze/bioplynov_elektrany.html, cit. 9.1.2012

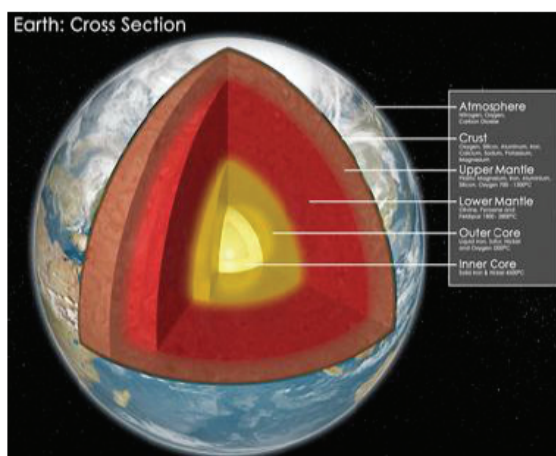
5. Geotermální energie

5.1. Úvod

Geotermální energii můžeme označit jako další druh obnovitelné energie a lze ji tedy zařadit do skupiny OZE.

Slovo *geotermální* má svůj původ v řečtině. Skládá se ze dvou slov – Geos a thermos, tedy země a teplo. Energie, která se uvolňuje ze země, pochází z menší části z doby vzniku planety a její významnější část z dalších druhotných zdrojů. Mezi ně můžeme zahrnout pohyb litosférických desek a dále jaderné pochody uvnitř planety. Z tohoto štěpení prvků (například uran, thorium, draslík a jiné) pochází až 40% celkové tepelné energie.

Ve všeobecnosti se jedná o energii nevyčerpatelnou (její potenciál dosahuje každý rok hodnoty až $5 \cdot 10^{20}$ J.rok⁻¹).



Obr. 5.1: Planeta Země – složení [9]

Tato energie je ale rozptýlena, také průměrný výkon ze zemské kůry je $57 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. Pouze v oblastech se zvýšenou sopečnou činností může být tato hodnota vyšší a to až 300 Wm^{-2} . Teplo zemského jádra je k povrchu přenášeno pomocí konvekce (proudění) a kondukce (vedením). Složka radiální není příliš významná. Gradient teploty se zvyšuje směrem k zemskému jádru o $20^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}$ na 1 km hloubky.

5.2. Využití geotermální energie

Teplo, resp. energii zemské kůry, jsme schopni využít pouze omezeně. Jelikož plošná hustota energie je příliš malá (dříve zmiňovaných 57 mWm^{-2}), není její využití technologicky jednoduché. Níže uvedeme několik možností, které jsou schopné po technické stránce využít tento potenciál.

V tabulce níže je základní přehled o využívání energie zemské kůry ve světě v roce 2001. [4]

Stát	Výkon (MWt)	Energie (TJ.rok⁻¹)	Stát	Výkon (MWt)	Energie (TJ.rok⁻¹)
<i>Alžírsko</i>	100	1586	<i>Kolumbie</i>	13,3	266
<i>Argentina</i>	25,7	449	<i>Korea</i>	35,8	753
<i>Arménie</i>	1	15	<i>Litva</i>	21	599
<i>Austrálie</i>	34,4	351	<i>Maďarsko</i>	472,7	4086
<i>Belgie</i>	3,9	107	<i>Makedonie</i>	81,2	510
<i>Bulharsko</i>	107,2	1637	<i>Mexiko</i>	164,2	3919
<i>Caribské ostrovy</i>	0,1	1	<i>Německo</i>	397	1568
Česká republika	12,5	128	<i>Nepál</i>	1,1	22
<i>Čile</i>	0,4	7	<i>Nizozemsko</i>	10,8	57
<i>Čína</i>	2282	37 908	<i>Norsko</i>	6	32
<i>Dánsko</i>	7,4	75	<i>Nový Zéland</i>	307,9	7081
<i>Egypt</i>	1	15	<i>Peru</i>	2,4	49
<i>Filipíny</i>	1	25	<i>Polsko</i>	68,5	275
<i>Finsko</i>	80,5	484	<i>Portugalsko</i>	5,5	35
<i>Francie</i>	326	4895	<i>Rakousko</i>	255,3	1609
<i>Gruzínsko</i>	250	6307	<i>Rumunsko</i>	152,4	2871
<i>Guatemala</i>	4,2	117	<i>Rusko</i>	308,2	6144
<i>Honduras</i>	0,7	17	<i>Řecko</i>	57,1	385
<i>Chorvatsko</i>	113,9	555	<i>Slovensko</i>	132,3	2118
<i>Indie</i>	80	2517	<i>Slovinsko</i>	42	705
<i>Indonesie</i>	2,3	43	<i>Spojené království</i>	2,9	21
<i>Island</i>	1469	20170	<i>Srbsko</i>	80	2375
<i>Itálie</i>	325,8	3774	<i>Švédsko</i>	377	4128
<i>Izrael</i>	63,3	1713	<i>Švýcarsko</i>	547,3	2386
<i>Japonsko</i>	1167	26933	<i>Thajsko</i>	0,7	15
<i>Jemen</i>	1	15	<i>Tunis</i>	23,1	201
<i>Jordánsko</i>	153,3	1540	<i>Turecko</i>	820	15756
<i>Kanada</i>	377,6	1023	<i>USA</i>	3766	20302
<i>Keňa</i>	1,3	10	<i>Venezuela</i>	0,7	14

Tab. 5.1: Přehled využívání geotermální energie ve světě [4]

5.2.1 Systémy založené na využití nízkopotenciální energie

Systémy založené na využití nízkopotenciální energie jsou zatím nejrozšířenějším způsobem získávání energie ze země. Jejich konstrukce je rozdílná, ale většinou se jedná o tepelná čerpadla.

Tepelná čerpadla

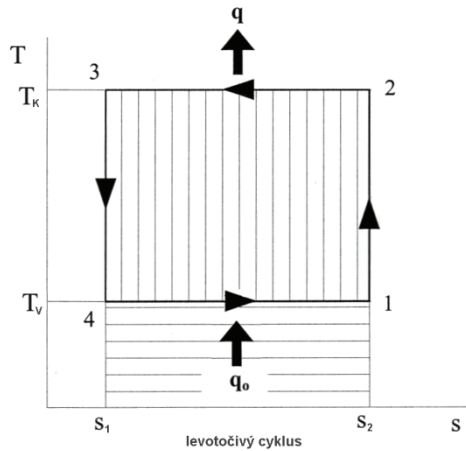
Tepelné čerpadlo je zařízení, které umí využívat nízkopotenciální energii. Samotné zdroje nízkopotenciálního tepla mohou být různé. Podle využívaného zdroje nízkopotenciálního tepla můžeme tepelná čerpadla rozdělit na tři základní systémy:

- země – voda,
- voda – voda,
- vzduch – voda.

Systémy tepelných čerpadel jsou rozděleny podle druhu nízkopotenciálního zdroje tepla pro tepelné čerpadlo a podle média, kterému je teplo předáváno pro vytápění. Zvláštním typem tepelného čerpadla jsou systémy vzduch – vzduch, které můžeme označit jako klimatizační jednotky.

Princip funkce tepelných čerpadel můžeme popsat v několika bodech, definujících uzavřený tepelný oběh:

- tepelné čerpadlo odebírá ze zdroje teplo varem a odpařováním teplotnosné látky (chladiwa),
- páry teplotnosné látky jsou kompresorem přečerpávány do chladiče, kde zkapalní a odevzdají své teplo okolí,
- odevzdané teplo má vyšší teplotní potenciál než teplo odebírané ze zdroje,
- za ideálních podmínek lze tepelné čerpadlo považovat za motor, který využívá levotočivého Carnotova cyklu (obrázek 5.2).

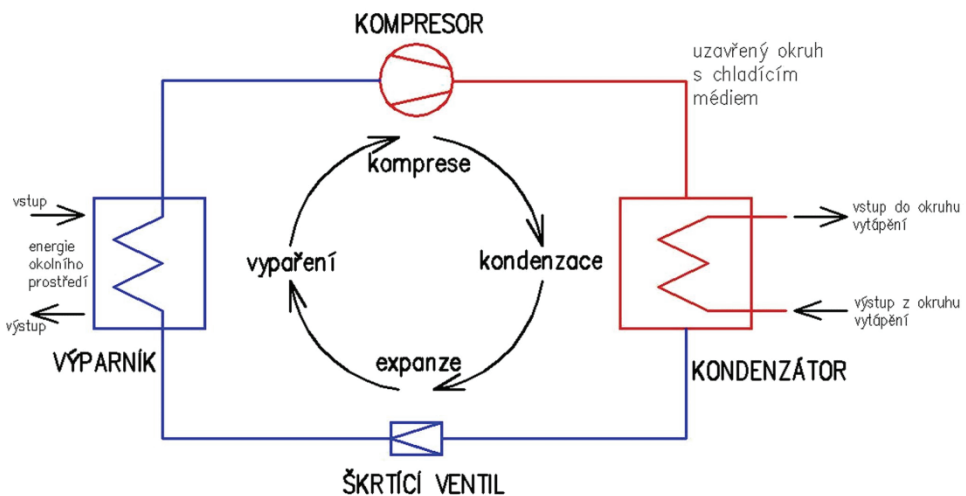


Obr. 5.2: Ideální levotočivý Carnotův cyklus

Pracovní cykly Carnotova cyklu jsou vratné izotermické nebo izoentropické děje v levotočivém (chladiřenském) oběhu:

- 1 – 2 izotermické vypařování, jímání přírodního tepla chladivem,
- 2 – 3 izoentropická komprese, stlačování chladiva kompresorem,
- 3 – 4 izotermická kondenzace, dochází k předání tepla a zkapalnění chladiva,
- 4 – 1 izoentropická expanze.

Pracovním principem tepelného čerpadla je tedy chladicí okruh s parním oběhem, který se skládá ze čtyř základních částí (výparník, kompresor, kondenzátor a škrťací ventil), jak je zobrazeno na obrázku 5.3.



Obr. 5.3: Technologické schéma tepelného čerpadla

Tepelné čerpadlo jako zdroj tepla může pracovat ve dvou základních systémech zapojení, a to jako *monovalentní zdroj* nebo *bivalentní zdroj*.

V *monovalentním systému* je tepelné čerpadlo hlavním a jediným zdrojem tepla. Systémy v tomto zapojení jsou poměrně málo využívány, a to z důvodu vyšších ekonomických a energetických nákladů na samotné tepelné čerpadlo a jeho provoz. Tepelné čerpadlo musí být voleno tak, aby svým výkonem krylo tepelné ztráty i při nejnižší teplotě okolního vzduchu, z čehož vyplývá, že není jeho výkon během celé otopné sezóny plně využit (systém je předimenzován). Problémem je i provozní rezerva, neboť použití dvou tepelných čerpadel by bylo investičně značně náročné. Určitou alternativou monovalentního systému s tepelným čerpadlem je např. spojení tohoto zdroje spolu se systémem pasivního využití solární energie.

V *bivalentních systémech* pracuje tepelné čerpadlo spolu s doplňkovým zdrojem tepla. Tepelný výkon tepelného čerpadla je v bivalentním systému navržen tak, aby tepelné čerpadlo krylo přibližně 60% tepelných ztrát vytápěného objektu. Zbylé potřebné teplo je dodáno pomocí druhého (pomocného) zdroje. Tím může být např. elektrokotel, plynový kotel, přímotop, ale také solární systém. Provoz může být paralelní i alternativní. [11]

Základním kritériem pro hodnocení energetické výtěžnosti tepelných čerpadel je poměr získaného tepla (topného výkonu – Q_T) a energie potřebné pro přečerpání tepla (pohon tepelného čerpadla – Q_E) – tzv. *topný faktor* (rovnice AA). Topný faktor vyjadřuje, kolikrát více energie získáme, než ve formě poháněcí energie přivedeme.

$$\varepsilon = \frac{Q_T}{Q_E} \quad (-) \quad (5.1).$$

Výpočet topného faktoru pro ideální Carnotův cyklus vychází z podílu výstupní (T_k^x) a vstupní (T_o^x) teploty:

$$\varepsilon_{c,id} = \frac{T_k^x}{T_k^x - T_o^x} \quad (-; K, K) \quad (5.2).$$

Při výpočtu skutečného topného faktoru musíme započítat ztráty vznikající při provozu tepelného čerpadla:

- velikost teplosměnných ploch,
- parametr reálného chladiva,
- pochody ve skutečném kompresoru,
- ztráty tepla do okolí,
- příkon pomocných zařízení.

V praxi se pro přibližné určení topného faktoru používá rovnice ve tvaru:

$$\varepsilon = 0,4 \cdot \frac{(T_K + 273,15)}{(T_K - T_0)} \quad (-) \quad (5.3),$$

kde koeficient 0,4 představuje souhrn veškerých provozních ztrát tepelného čerpadla, jak byly uvedeny výše.

Nejprůkaznější určení topného faktoru však vychází z energetických toků v provozovaném tepelném čerpadle. Energetický topný faktor COP (Coefficient of Performance) můžeme vyjádřit pomocí následujícího vztahu:

$$COP = \frac{P_{te}}{P_e} \quad (-) \quad (5.4),$$

kde pro P_{te} platí vztah

$$P_{te} = \Delta T \cdot Q_m \cdot C_p \quad (W) \quad (5.5),$$

kde

T – rozdíl teplot na vstupu a výstupu kondenzátoru,

Q_m – hmotnostní průtok chladiva ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$),

C_p – měrná tepelná kapacita teplotnosné látky,

P_{te} – tepelný výkon,

P_e – elektrický příkon.

Je zřejmé, že tepelná čerpadla nemohou zásadně řešit energetickou situaci, ale za předpokladu správného energetického a ekonomického návrhu mohou významně přispět ke snížení primární spotřeby energie a provozních nákladů.

5.2.2 Systémy založené na využití vysokopotenciální energie

Metoda suchých par

Suchá metoda je založena na přímém získávání par z hlubin země. Jedná se o metodu, která v současné době už nemá příliš velkého využití. Veškeré dostupné lokality, které by byly vhodné pro nasazení jednotek, jsou buď zastavěné, nebo vyčerpané.

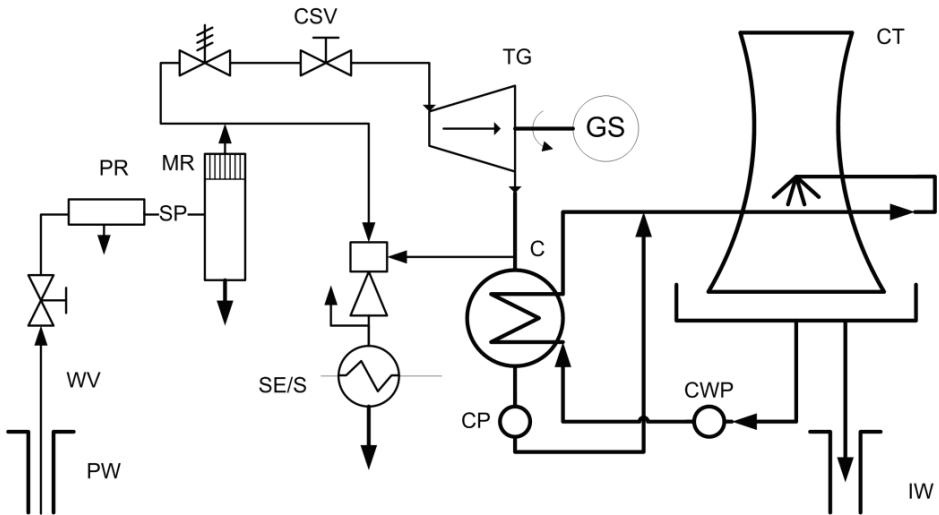
Vrt je veden do země, odkud je odebírána přímo pára. V prvopočátcích se zkondenzovaná voda nezaváděla zpět do vrtu. Posledním vývojem (a zejména vyčerpáváním ložisek) se voda zavádí zpět a dosahuje se lepších účinností celého cyklu.

Problémem při provozování elektráren jsou různé nekondenzovatelné plyny a plyny těžce oddělitelné. Jako příklad můžeme uvést H_2S , CH_4 , CO_2 apod. Tyto plyny snižují výkon turbíny a jsou tudíž nežádoucí.

Ve světě existují dvě metody na separaci těchto sloučenin.

- separace před injektorem do turbíny,
- separace až za turbínou v oblasti kondenzace.

Výhodou tohoto systému je, že pára se nemusí opět kondenzovat a vtláčet zpět do podzemí, ale může být vypouštěna do okolního prostředí. Za předpokladu, že nedojde k ohrožení případných obyvatel, například výše zmíněným sirovočím.



Obr. 5.4: Metoda využití suché páry [5]

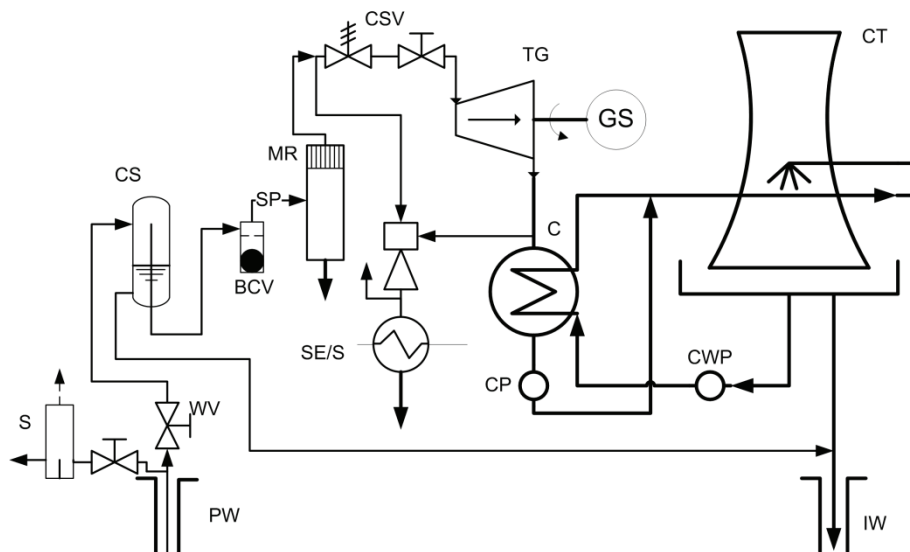
Metoda mokrých par

Metoda mokrých par je jedna z metod, ze kterých se dá předpokládat větší energetické využití. Pro energetické účely je vhodné, aby voda, která stoupá horninou, nebo je čerpána, měla teplotu alespoň 160°C. Z ní je následně přes klasický parní Rankin-Clausiiův oběh vyrobena mechanická a následně elektrická energie. Většina jednotek je založena na soustavě se získkem elektrické i tepelné energie, tzv. kogenerační jednotky (někdy též označovány jako bivalentní).

Geotermální elektrárny jsou především určeny k výrobě elektrické energie. Systémem mokré páry toho lze docílit dvěma způsoby. Oba pracují na podobném principu. Jak ukazují obrázky 5.5 a 5.6, voda se čerpá nebo je přiváděna tlakovými přiváděči na povrch, kde při nižším tlaku expanduje a následně je vyráběna pára. Vylepšená soustava pracuje se dvěma turbínami, z nichž první zpracovává páru o vyšších parametrech, druhá pracuje s nižšími parametry. Účinnost celého systému je od 12 – 25%, v závislosti na použité technologii a zejména na parametrech přiváděné vody.

Jednoduchý „flash“ systém

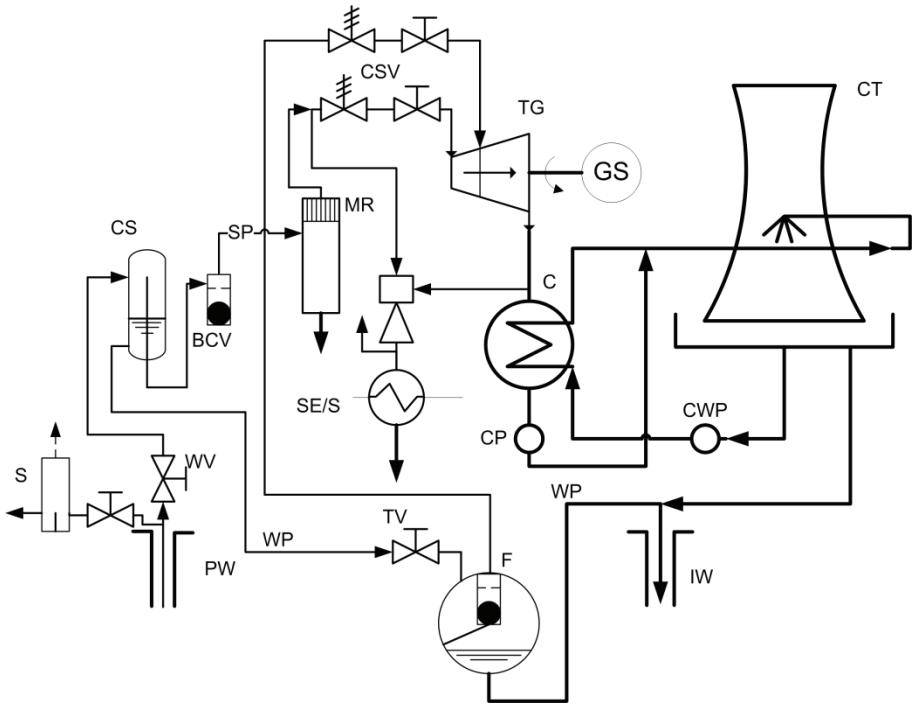
Výrazem „flash“ je zde míněn kotel, který plní funkci cyklonového odlučovače a zároveň demineralizuje vodu. Za kotlem následuje ve většině případů odstraňovač vlhkosti. Typický zástupce této elektrárny má instalovaný výkon do 30 MW, 5 – 6 produkčních vrtů a 2 – 3 vrtů injektážní. Nevýhoda spočívá v technologické náročnosti (obrázek 5.5).



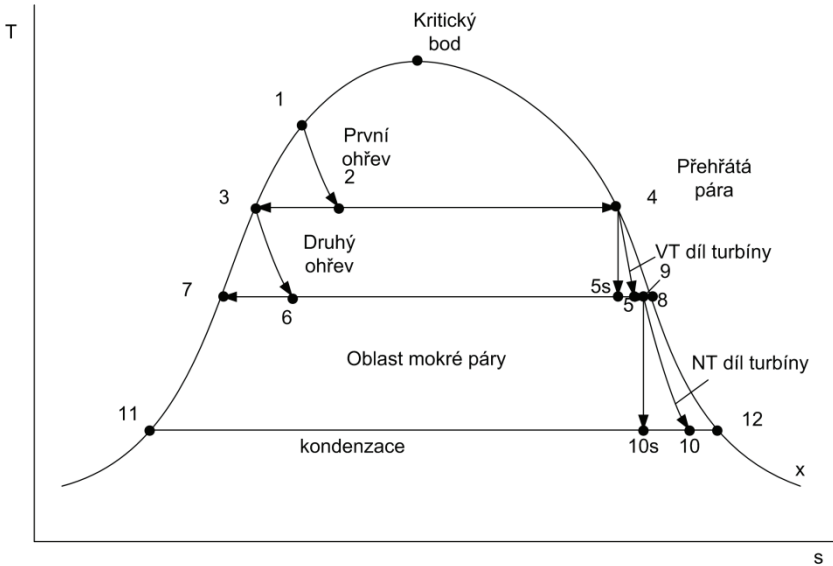
Obr. 5.5: Schéma „single flash“ systému [5]

Zdokonalený „double flash“ systém

Tento systém je koncipován stejně jako jednoduchý „flash“ systém, jen na výstupu z kotle má zařazen další parní buben, ze kterého je pára o nižších parametrech vedena na turbínu. Původní systém vodu odváděl zpět do vrtu, i přes stále dostatečnou teplotu vody. V konkrétním případě na Obr. 5.6 je turbína stejná, proto se pára přivádí až do sekundární části, kde tlakové parametry odpovídají vyrobené páře. Tento stav názorně ilustruje T-s diagram na Obr. 5.7.



Obr. 5.6: Technologie „double-flash“ [5]

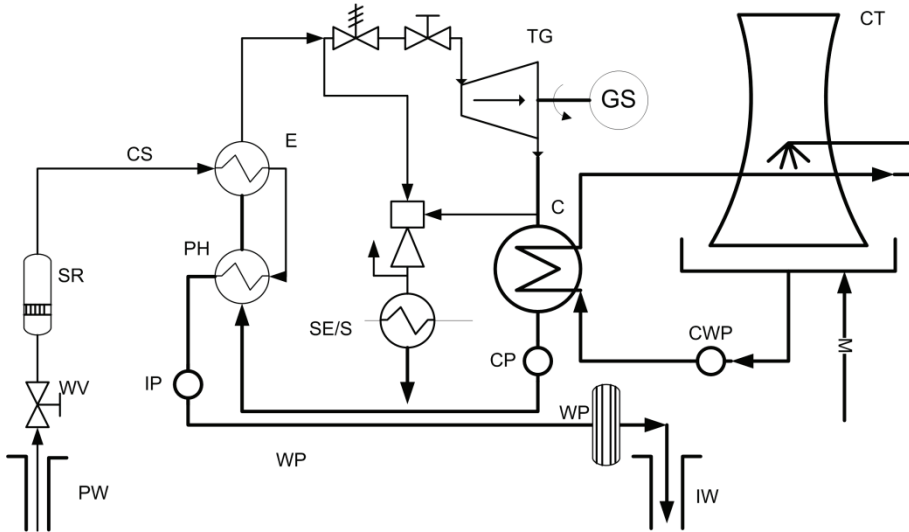


Obr. 5.7: T-s diagram při použití duální turbíny [5]

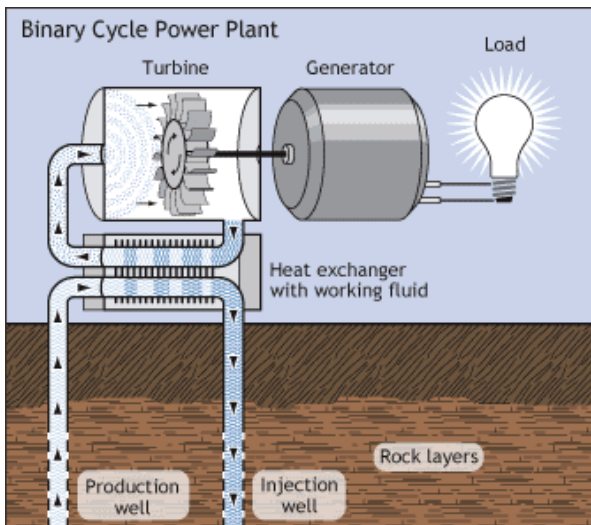
Pozemní výměník (Binary Cycle Power Plant)

Tento systém je také uvažován při výstavbě nových zdrojů. Spojuje výhody „double flash“ systému, ale voda je přiváděna do výměníku na povrchu, kde předá svoji energii páře a odchází zpět do vrtu. Soustava se zjednodušuje o demineralizační jednotku (obrázek 5.8 a 5.9).

Dalším případem, a opět částečným vylepšením, jsou různé organické Rankinovy cykly – ORC. Tyto pracují jednak na principu Kalinova cyklu nebo cyklu využívajícího silikonové oleje, popřípadě nízkovroucí tekutiny (toluen, a jiné druhy na bázi uhlovodíků).



Obr. 5.8: Základní binární systém a jeho princip schematicky [5]



Obr. 5.9: Binární systém graficky [10]

5.2.3 HDR – Hot Dry Rock

Tato metoda je založena na několika předpokladech:

- s větší hloubkou je vyšší pravděpodobnost vyšší teploty a tím pádem vyšší energie,
- v místě použití je dostatečně silná hornina, která není propustná.

Uvádí se, že hloubka vrtu se pohybuje mezi 5 – 6 km, kde teplota dosahuje zpravidla 180°C – 220°C a tlak je do 165 MPa.

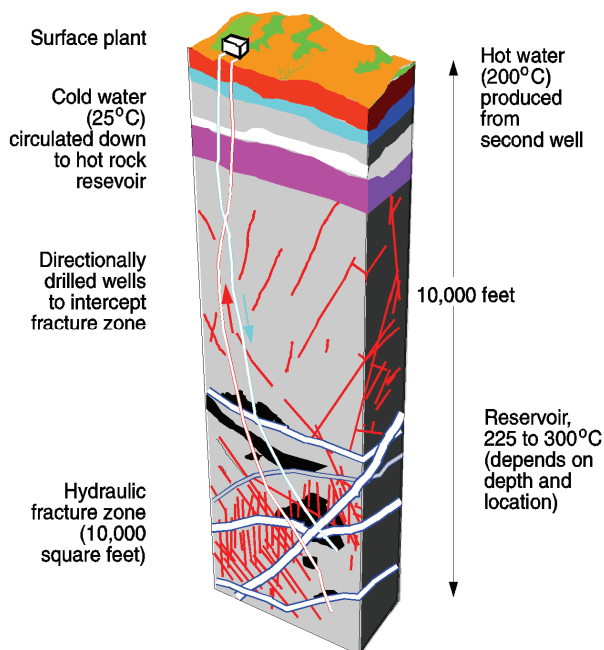
Voda proudící několika vrty rozruší horniny a puklinami v okolí je jímána již pára nebo voda o vysokých parametrech zpět na povrch. Rozrušování podloží ve velkých hloubkách může být doprovázeno menšími zemětřesnými aktivitami.

V praxi je též běžné, že poměr vrtů produkčních a injektážních je od 3:2 až po 5:2. Záleží na konkrétní lokalitě.

Nevýhodou systému je velký únik vody (opět závisí na konkrétní lokalitě) a může být až 30%. Další, poměrně velkou nevýhodou, je značné namáhání podloží, kde se případná mikro zemětřesení mohou s větší nebo menší mírou projevit i na povrchu. Z tohoto důvodu byl ukončen projekt elektrárny HDR ve Švýcarsku.

Modernější způsobem je metoda FDR, která je obdobná jako HDR s tím rozdílem, že FDR pracuje s již rozpukanou horninou a tudíž není nutné složité injektážní zařízení. I mikro otřesy jsou z větší části odstraněny.

V současné době se principiálně využívá systém mokré páry – základního binárního procesu, tedy s výměníkem umístěným nikoli na zemi, ale přímo v zemi.



Obr. 5.10: Princip metody HDR [4]

5.3. Možnosti využití v České republice

V České republice je energie zemské kůry využívána zejména v léčebných procesech v lázních. Menší zdroje pak vyhřívají například skleníky (Karlovarsko). S rozvojem skleníků a vytápění má bohaté zkušenosti Slovenská republika, kde několik projektů tohoto druhu funguje.

Výroba elektrické energie z geotermální energie, potažmo z vrtů, není nikde použita. Zatím nejdále je projekt městské teplárny v Litoměřicích. Zde by měla geotermální elektrárna nahradit dosluhující teplárnu využívající uhlí.

5.3.1 Technologie

Technologie je stejná jako systém HDR, zmíněná v odstavci 5.2.3. Projekt je možné realizovat, protože město Litoměřice se nachází nad příhodnou oblastí českého masivu v Ústeckém kraji. První vrty, které byly uskutečněny do hloubky 2100 m, dosáhly v dolní části vrtu teploty 65,5 °C. [7] Byla též potvrzena malá seismická aktivita.

5.3.2 Realizace a přínos obyvatelstvu

Naopak, jak uvádí [2] mají být vyprojektovány vrty s délkou 4 – 5 km s tepelným výkonem horního výměníku 47,25 MW_t. Spodní výměník má mít rozměry 1200x600 m. Injekční vrt má průřez: 38,2 m² a dva produkční vrty 2x19,1 m². Celková plocha teplárny je odhadována na 1730 m².

Předpokládá se, že výkonem teplárna pokryje až 8000 domácností ve městě Litoměřice a přilehlého okolí.

5.4. Jednotky ve světě

Tato kapitola se věnuje úspěšným příkladům elektráren, které využívají geotermální energii.

5.4.1 Larderello – Itálie

Počáteční možnosti využití geotermální energie k výrobě elektřiny spadají do doby kolem roku 1900. První skutečnou elektrárnou byla jednotka v Larderello v Itálii, přesněji v Toskánsku. Roku 1904 zde spustil P.G. Conti první parní stroj o výkonu $\frac{1}{4}$ koňské síly. O rok později zde již pracovala turbína s 20 kW dynamem.

Zdroj pracuje na suchou páru. Výkon jednotky je 112 MW. Celkový instalovaný výkon v Itálii je 843 MW. Hrubá výroba se pohybuje okolo 5 TWh elektrické energie (pro představu je to stejné množství energie jako součet celoroční výroby elektřiny z vodních a fotovoltaických elektráren v ČR).

V současnosti se v Itálii vyrábí přes 10% celosvětové výroby elektrické energie z geotermálních procesů. Larderello se skládá ze 4 bloků, které byly postaveny postupně (viz. tabulka 5.1).

	Elektrárny			
	Lago	Molinetto	Gabbro	Travale
<i>Množství páry ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)</i>	22,22	36,11	40,28	69,44
<i>Tlak páry (bar)</i>	2,5	6,5	6,5	14,0
<i>Nezkondenzovatelné páry (%)</i>	1,7	4	12	5
<i>Hrubý výkon (MW)</i>	8,855	19,210	19,005	43,230
<i>Čistý výkon (MW)</i>	8,305	17,945	16,515	40,750
<i>Teplota par na vstupu ($^{\circ}\text{C}$)</i>	127,4	190	162,0	195,1

Tab. 5.1: Seznam bloků v Larderello a jejich parametry [5]

Problémem v této oblasti je (a v každé z dalších) vysoký podíl příměsí druhotných plynů (CO_2 , H_2S , silikáty, sultanáty, bórové kyseliny a chloridů) v koncentraci až 300 ppm. Zejména chloridy působí korozivně na části turbín, proto se snižuje obsah látek až do velikosti 30 ppm. [5]

Dříve se bórové sloučeniny využívaly, byly separovány a prodávány. Stejně jako ostatní látky. Dnes je to již neekonomické.



Obr. 5.11: Soustava děl Larderello

5.4.2 Mutnovsky, Kamčatka. Ruská federace

Tato oblast se nachází v blízkosti Petropavlovsku. Území Kamčatky je velice řídkce elektrifikováno. Proto se rozhodlo využít geotermální energie. Celková kapacita geotermální energie je odhadována na 1130 MW_e při využití teplot vyšší než 150°C a až 1345 MW_t při využití potenciálu nižšího než 150°C po dobu delší než 100 let. [3], [5]

Jednotlivé elektrárny, případně vrty, jsou rozmístěny na celém území Mutnovského komplexu. První využívání se datovalo od roku 1954, kdy bylo instalováno soustrojí o výkonu $2 \times 2,5 \text{ MW}$. Postupně se výkon zvyšoval až do roku 1999.

V současné době byla započata rekonstrukce. Došlo k vyvrtání tří produkčních vrtů, každý o výkonu 4 MW. Technologie využití, tzv. „single flash“, byla doplněna o zařízení zvyšující kvalitu páry. Ta dosahuje až 99,98%. Zajímavě je zde řešen problém nízkotlaké páry. Již nejde na turbínu, ale pára je využívána pouze pro ejektor pro odstranění nekondenzovatelných plynů v kondenzátoru.

Parametry elektrárny: Tlak páry na vstupu do turbíny: 800 kPa, teplota: 170°C , teplota kondenzátu: 50°C . Jedná se o plno otáčkové soustrojí, tedy 3000 min^{-1} .

V roce 2002 došlo k modernizaci, kde se výkon opět zvýšil. Tentokrát na $2 \times 25 \text{ MW}$. Předpokládané využití místního zdroje je až 300 MW.

Každá z turbín pracuje s hmotnostním průtokem $42,9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Vstupní tlak je 620 kPa, kondenzační tlak 5 kPa a účinnost celé elektrárny je 33,5%. [3], [5]



Obr. 5.12: Mutnovsky geotermální elektrárna [5]

5.4.3 Heber Binary Plants. Kalifornie, USA

Heber je město, které leží v Kalifornii v USA pouhých 6 km od hranic s Mexikem.

První vrt v této oblasti uskutečnila firma Chevron při hledání ropy. Brzy však zjistila, že již v hloubce okolo 1200 m dosahuje teplota hodnot okolo 190°C. Prvotní vývojové plány předpokládaly nasazení sedmi jednotek o výkonech 3x100 MW a 4x50 MW. Celková plocha, ze které se pára čerpá, dosahuje až 4 km². [5]

Elektrárna se budovala ve dvou etapách: V první se jednalo o binární proces s pozemním výměníkem, výkon se pohyboval na úrovni 47 MW s parametry:

- 15 produkčních vrtů,
- hmotnostní průtok byl 940 kg·s⁻¹ při teplotě 182°C,
- 9 injektážních vrtů,
- pracovním médiem turbíny byla směs uhlovodíků (90% isobutan a 10% isopentan),
- admisní tlak 4 MPa, výměník měl rozměry 24x2 m.

Druhou etapou bylo umístění dalšího bloku o výkonu 44 MW (většinou se jedná o hrubou výrobu, ze které je nutné odečíst výkon na vstřikování vody zpět do země). Opět se jednalo o binární systém, tentokrát s čistým isopentanem. Hrubá tepelná účinnost byla 12,5 %. Hrubá efektivita využití byla do 42,5 %. [5]

V roce 2000 bylo zjištěno, že elektrárna pracuje 99% celkového času s průměrným výkonem na úrovni 90% nominálního výkonu. Bližší informace lze nalézt například v [5].

5.4.4 Hatchobaru. Kjúšú. Japonsko

Hatchobaru vznikl ve třech krocích. Od roku 1977 zde pracuje malá jednotka, která je vybavena technologií „double-flash“ s výkonem 55 MW_e. V hloubce kolem 1700 m je velice vysoká teplota – 300°C. [5]

Je to také první komerční elektrárna, která využívá výše zmíněný systém. V roce 1958 využívala podobný princip elektrárna Wairakei na Novém Zélandu, ale čistě o „double-flash“ se nejednalo. [5], [6]

V současné době má Hatchobaru 3 bloky (55 MW – 1977, 55 MW – 1990 a binární jednotku 2 MW – 2003). Dále obsahuje 28 produkčních vrtů s celkovým hmotnostním průtokem geofluidu $710 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ a 16 reinjektážních vrtů. [5]

Zajímavé jsou údaje o binární jednotce. Tato malá jednotka je postavena pro ověřování parametrů a předpokládá se další vývoj:

<i>Hrubý výkon</i>	2000 kW
<i>Vstupní tlak</i>	400 kPa
<i>Vstupní teplota</i>	143,6 °C
<i>Průtok páry</i>	$4,96 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$
<i>Průtok mineralizované vody</i>	$17,82 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$
<i>Teplota mineralizované vody</i>	143,1 °C
<i>Typ generátoru</i>	Synchronní, bezkartáčový, 2230 kVA
<i>Využitelná účinnost, hrubá</i>	35%

Tab. 5.2: Parametry binárního cyklu Hatchobaru [5]



Obr. 5.13: První elektrárna na principu „double flash“ [6]

5.4.5 Nesjavellir, Island

Prvotní úvahy o vybudování geotermálního zdroje se objevily v roce 1990. Vyvstala potřeba 100 MW_t a okolo $600 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ 80°C horké vody. To byla první etapa. Následovalo několik rozšíření, až v roce 1998 bylo rozhodnuto vybudovat elektrárnu. Výstavba trvala pouhých 22 měsíců a stala se druhou největší elektrárnou na Islandu.

Elektrárna má instalovaný výkon $2 \times 30 \text{ MW}_e$ a 200 MW_t . Má 10 produkčních vrtů, centrální separační jednotku. Dodává $132 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ páry a $240 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Turbíny jsou opět plno otáčkové, každá s hltností $57,2 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ se vstupním tlakem 1,2 MPa a tlakem kondenzačním 20 kPa. Výrobce turbín byla firma Mitsubishi Heavy In-

- technologií, 2011. 56s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Radil.
- [3] Britvin, O.V., Povarov, O.A., Klochkov, E.F., Tomarov, G.V., Luzin, V.E.: Mutnovsky geothermal power complex in Kamchatka, Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000
- [4] Dickson, m.h., Fanelli, m. What is Geothermal Energy? Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR , Pisa, Italy, Prepared on February 2004,
- [5] Dipippo, R. Geothermal power plant. 2008, ISBN: 978-0-7506-8620-4.
- [6] Hatchobaru Power Plant, Kyushu Electric Power Co., Dostupné na <Inc.http://www.mhi.co.jp/en/products/detail/___icsFiles/artimage/2008/01/23/ce_pd_pe_re/1_geo1.jpg>
- [7] Myslík, V., Tým, A.: Stránky města Litoměřice – geotermální projekt , citováno dne: 12.12.2011, datum aktualizace: 12.4.2010, Dostupné z <http://www.litomerice.cz/gte/index.php?lang=cz&akce=novinky&func=clanek&par=78>
- [8] Radil,L. Eliminace diskontinuity dodávky energie z obnovitelných zdrojů. Pojednání o dizertační práci. Brno (2010).
- [9] TJ's Plumbing & Heating [online]. c2003, 2011 [cit. 2011-05-25]. Geothermal Energy for Heating and Cooling. Dostupné z <http://www.tjsgeothermal.com/services/geothermal/geothermal-energy-for-heating-andcooling>
- [10] US.DEPARTMENT OF ENERGY: GEOTERMAL TECHNOLOGIES PROGRAM [online]. 2006, 20.03.2009 Datum citace: 12.10.2011. Dostupné z <http://www1.eere.energy.gov/geothermal/powerplants.html>
- [11] Mastný, P., *Využití znalostních technologií pro podporu návrhu energetických systémů v budovách*, Habilitační práce, Brno 2010, Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 123 stran

6. Slapové elektrárny

6.1. Úvod

Slapová energie je energie, kterou lze získat díky měnící se hladině moří a oceánů. Jinými slovy, energie přílivu a odlivu je přímým důsledkem přesunu vyšší vodní hladiny k hladině nižší a vyrovnání těchto dvou rozdílných hladin.

Přílivová energie je považována za obnovitelný zdroj energie, protože využívá pouze energii z přílivu. Nedochází ke spalování ani jiným přeměnám na jiné formy energií. Slapová energie je také považována za nevyčerpatelnou, protože hladina moří a oceánů stále stoupá a klesá v důsledku působení gravitačních sil.

Slapová energie, tedy energie přílivu a odlivu, je považována za velmi spolehlivý zdroj energie, a to vzhledem k její předvídatelnosti. Ve srovnání s jinými zdroji energie, jako je větrná či solární energie, slapovou energii a její změny lze poměrně spolehlivě předvídat. Slapová energie se také vyskytuje pravidelně. Na rozdíl od sluneční a větrné energie, energie přílivu není závislá na ročním období nebo počasí. Přílivová energie závisí čistě na rotační kinetické energii, slunce působí na Zemi, která obíhá kolem něj. To stejné platí v rámci orbitálního systému Země – Měsíc. Jak Měsíc obíhá kolem Země, obě tělesa na sebe působí gravitačními silami. Všechny síly, které působí v rámci těchto orbitálních systémů, vytvářejí nerovnováhu zemské vodní hladiny. Tak některá místa mají vysokou hladinu vody, zatímco jiná hladinu vody nízkou [1].

6.1.1 Historie

Lidé sledují příliv a odliv nepochybně již od dob, kdy začali osidlovat pobřežní oblasti kontinentu. Nejstarší písemné záznamy o tomto jevu pochází od Herodota, který svá pozorování konal ve Středozemním moři v roce 450 před naším letopočtem. I dávní mořeplavci věděli o existenci nějakého vztahu mezi přílivem a odlivem a cyklem Měsíce, neboť oba jevy se opakují podobným cyklickým způsobem. Správné vysvětlení těchto jevů však podal až Isaac Newton (1642-1727), když formuloval obecný gravitační zákon [3].

Přílivová energie je jednou z nejstarších forem člověkem využívané energie. Používání přílivových mlýnů na španělském, francouzském a britském pobřeží, se datuje do roku 787 n.l. Přílivové mlýny se sestávaly ze záchytného rybníka nebo menší nádrže, stavidla a přepadu přes splav. Vyrovnávání hladin probíhalo přes vodní kolo. Příliv a odliv točil vodním kolem, vyráběl mechanickou energii a mlýn mlel obilí. Jeden takový funkční mlýn byl také v New Yorku, kde pracoval až do 20. století.

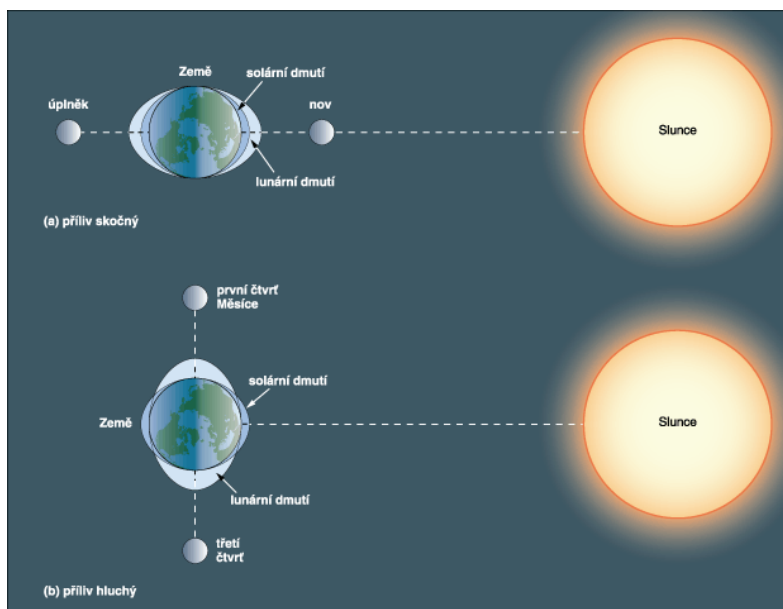
6.2. Princip slapového jevu

Gravitační síla, kterou Měsíc působí na Zemi, vytváří slapové změny hladiny oceánů, která stoupá a klesá podle pohybu Měsíce kolem Země. Bez Měsíce by se určitě jejich rozsah velmi snížil, ale nezmezil by úplně. Měsíc totiž tvoří pouze dvě třetiny slapového působení na naši planetu. Zbytek způsobuje Slunce a méně i planety, zvláště Jupiter.

Země spolu s Měsícem obíhají okolo společného těžiště. Protože hmotnost Měsíce dosahuje jen 1/81 hmotnosti Země, leží těžiště soustavy Země-Měsíc 4 800 km od středu Země, tedy ještě uvnitř zemského tělesa. Při oběhu Země kolem tohoto těžiště vzniká odstředivá síla. Jen ve středu Země je přitažlivá síla Měsíce stejně velká jako odstředivá síla, a každá působí opačným směrem – obě síly jsou tam tedy vyrovnány. Na straně Země obrácené k Měsíci je ale přitažlivá síla Měsíce o něco větší než odstředivá. Tam vzniká výdut' - příliv. Stejně je to však i na straně Země odvrácené od Měsíce – tam je větší odstředivá síla, než přitažlivá síla od Měsíce. Proto i tam nastává příliv. Existují tedy dvě přílivové výdutě na protilehlých stranách Země. Mezi nimi je oblast odlivu. Můžeme tedy říci, že v každém přístavu nastává dvakrát denně příliv a odliv.

Rozsah slapových vzdutí závisí na poloze Měsíce a Slunce vůči Zemi (viz obrázek 6.1). Rozlišujeme dva extrémy:

- příliv skokový - největší příliv. Nastává pokud se Země, Slunce a Měsíc (v úplňku nebo novu) nacházejí na jedné přímce, zajištění dostatečného množství elektřiny v požadovaném čase
- příliv hluchý - nejmenší příliv. Nastává jestliže se zmíněná tělesa nacházejí v pravém úhlu (první a poslední čtvrt')



Obr. 6.1: Souvislost uspořádání těles v soustavě Země – Slunce – Měsíc a slapových jevů [3]

Slapové deformace jsou doprovázeny ztrátou energie systému Země - Měsíc vlivem vnitřního tření (slapového tření) a proto vzrůstá délka dne (asi o 1,5 milisekundy za století) a nepatrně se zvyšuje vzdálenost Země - Měsíc (Měsíc se dostává na vyšší oběžnou dráhu, o 3,8 cm za rok). Výrazněji působí slapové síly na hladiny světových moří a oceánů (příliv a odliv) a na zemskou atmosféru, kde je pozorováno periodické kolísání tlaku vzduchu [5].

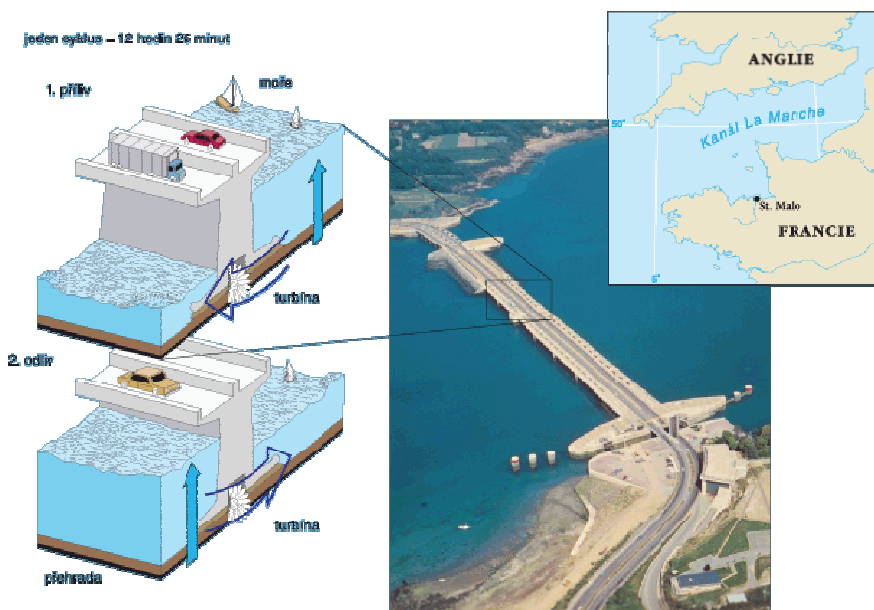
6.2.1 Fyzikální princip využití slapového efektu

Energie přílivu může být využívána dvěma způsoby:

- ve speciálních vodních nádržích v mořských zátokách nebo v ústí řek s vysokým přílivovým rozsahem,
- při využití přílivových proudů na otevřeném moři (offshore tidal turbines).

Přehradní elektrárny

Voda může být při přílivu zachycena v tzv. přílivové laguně, která je za tímto účelem obestavěna hrázi s vpusťmi, ve kterých jsou umístěny turbíny s generátory. Laguna se naplní vodou, zatímco příliv stoupá. Rozdíl hladin mezi lagunou a volným mořem bude mít za následek vznik potenciální energie, která může být využita při vyrovnávání hladin, při kterém bude hydrostatický tlak působit na lopatky turbíny a bude konána práce.

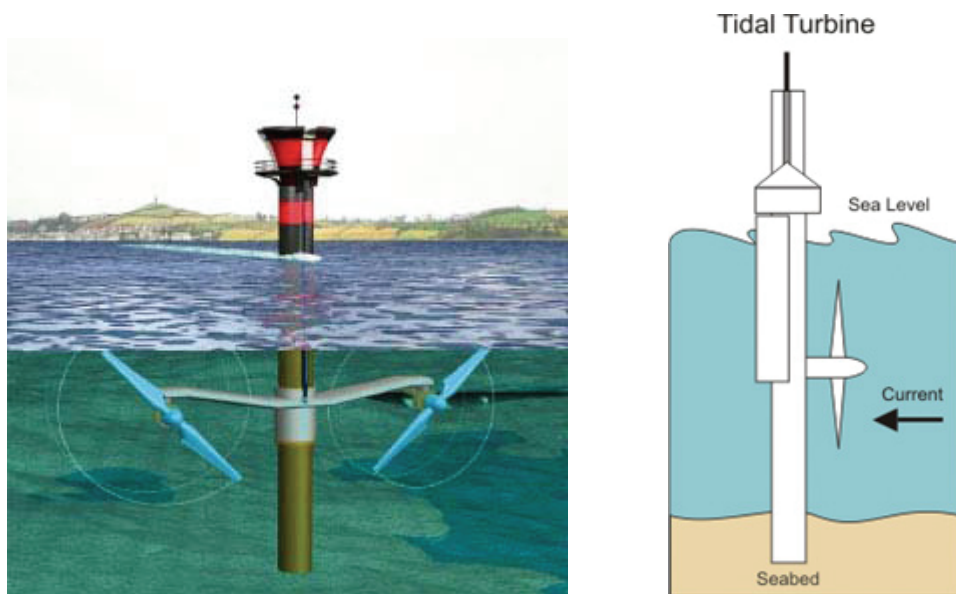


Obr. 6.2 Přílivová elektrárna [3]

Při odlivu naopak dojde k poklesu hladiny na volném moři, tzn., že síly a energie budou působit opačným směrem. Je zřejmé, že potenciální energie roste s rostoucím rozdílem hladin mezi nádrží a mořem, řekou či oceánem, a že nejvíce efektivní budou taková zařízení, kde dochází k významným projevům přílivů a odlivů.

Elektrárny pracující s přílivovými proudy

Pracují podobně jako větrné elektrárny. Využívají podmořských proudů, které lze snadno vyhledat, předpovídat atd.



Obr. 6.3: Přílivová elektrárna na volném moři tzv. offshore tidal turbines [2]

Výhody

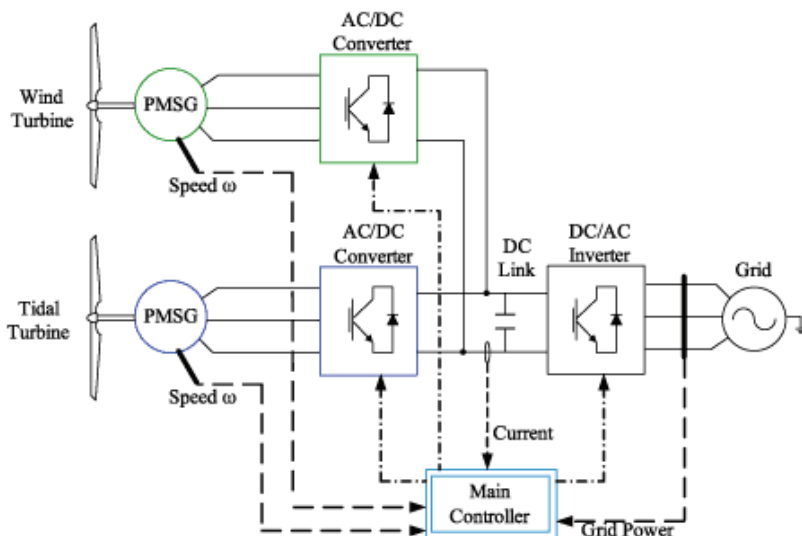
Hlavní výhodou je, že energie přílivu u jednou postavené elektrárny, je zdarma. Nevytváří žádné nebezpečné skleníkové plyny a jiné nebezpečné škodliviny a odpady. Funguje bez jakýchkoliv požadavků na palivo, pouze s přírodními energiemi. Je to konzistentní zdroj elektrické energie s velmi malými náklady na údržbu. Turbíny na volném moři a turbíny s vertikální osou jsou ekonomicky výhodné a nemají velký ekologický efekt.

Omezení

Slapová – přílivová energie může být využita pouze v místech s výraznými změnami hladiny vody. Přeměna potenciální energie přílivu a odlivu, který budeme zadržovat v přílivové nádrži je využita přibližně na 80%. To znamená, že 20% z celkové potenciální energie je obvykle ztraceno a pouze 80% se využívá pro výrobu elektřiny.

Většina moderních konceptů přílivových elektráren pracuje na principu vodních „přehradových“ turbín. Nevýhodou energie přílivu je její nízký kapacitní faktor, tudíž není pokryta špičková poptávka. Důvodem je 12,5 hodinový cyklus přílivu a odlivu. Celkový potenciál slapové energie pro světové oceány byl odhadnut na 64.000 MWe. Slapové přehradu Passamaquoddy Bay (zátoka Fundy na hranici USA a Kanady) mají potenciál mezi 800 až 14.000 MWe.

Příklad přílivové elektrárny pracující v součinnosti elektrárny větrné lze vidět na následující obrázku (6.4).



Obr. 6.4: Hybridní systém pobřežní větrné a přílivové elektrárny [6]

Srovnání přehradové a offshore turbíny

Dle následujícího vztahu (6.1) je teoretická využitelná kinetická energie u offshore turbín úměrná třetí mocnině rychlosti a ploše rotoru podvodní turbíny, která je kolmá na směr proudění.

$$P_{KE} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (6.1)$$

Totožný vztah prakticky platí pro větrné elektrárny. Podobně jako větrné elektrárny, přílivové turbíny mohou být použity pro získávání energie přílivu. Přílivové elektrárny a větrné turbíny jsou si do jisté míry podobné jak vzhledem, tak i strukturou. Přílivové turbíny mohou být umístěny v ústích řek a všude tam, kde je silný příliv. Protože voda má asi 800x vyšší hustotu než vzduch, musí být přílivové turbíny mnohem silnější a robustnější, než u větrných elektráren. Budou tak těžší a dražší, ale budou moci zachytit více energie při mnohem vyšších objemových tocích.

To znamená, že budeme-li pro zjednodušení uvažovat, že voda o hustotě $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ proudí rychlostí $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ určitou plochou. Pak použitelný výkon je $P/A = 500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

U přehradové slapové elektrárny je využíván stejný princip jako u vodních elektráren s malými spády, kde platí následující vztah (6.2) pro potenciální energii, kde energie je přímo úměrná rychlosti, ploše, gravitačnímu zrychlení a velikosti spádu.

$$P_{PE} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h = \rho \cdot g \cdot A \cdot V \cdot h \quad (6.2)$$

Provedeme podobnou úvahu jako v předešlém případě. Rychlost proudění je rovna $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $g = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ $h = 5 \text{ m}$. Pak energie na jednotku spádu a plochy je

rovna $P/A = 5 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, což je o dva řády více než u offshore systémů a vysvětluje to, proč jsou slapové přehradové elektrárny používanější než elektrárny „offshorové“.

V oblastech kde rozdíl mezi přílivem a odlivem je okolo 8 metrů, jsou pak přehradové systémy jasně efektivním řešením. Nicméně v určitých oblastech, kde jsou mořské proudy profilem dna sevřeny do úzkých profilů, může rychlost proudění výrazně překročit $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a pak je výhodnější použít turbíny typu offshore, protože kinetická energie roste s třetí mocninou rychlosti [4].

6.2.2 Projevy na Zemi

Souhrn charakteristik slapových jevů na idealizované Zemi:

- Všude na Zemi (s výjimkou pólů) nastává příliv a odliv dvakrát za den.
- Přílivy ani odlivy nemají stejné výšky kvůli deklinaci Měsíce a Slunce (s výjimkou vzácných případů, kdy je Měsíc i Slunce přímo nad rovníkem).
- Roční a měsíční periody přílivového cyklu jsou spojeny se změnami vzdáleností Slunce a Měsíce od Země.
- Každý (lunární) týden nastává buď skočný nebo hluchý příliv. Za jeden lunární měsíc tedy dojde ke dvěma skočným a dvěma hluchým přílivům.
- Oblast, která je na pobřeží při odlivu odhalena, poskytuje velmi bohatou zónu obživy pro migrující ptactvo. Kdyby byl odliv o 70% menší, což by nastalo v nepřítomnosti Měsíce, přílivová oblast by byla mnohem menší a mnoho ptačích druhů by se muselo dělit o potravu v jiných oblastech.

Místa na Zemi s největšími přílivy:

- záliv Fundy (Kanada) 19,6 metrů,
- ústí řeky Gallegos (Argentina) 18 metrů,
- Frobisher Bay (Baffinův ostrov) 17,4 metrů,
- ústí řeky Severn (Anglie) 16,3 metrů,
- Granville (Francie) 14,7 metrů.

6.3. Slapové elektrárny – otázky a odpovědi

6.3.1 Současný stav, vývoj do budoucna

Vody v Pacific Northwest na západním pobřeží USA a Kanady jsou ideální pro využití slapové energie za použití nově vyvinutých podmořských turbín. Hladina oceánu při přílivu a odlivu výrazně kolísá, až 12 metrů za den. Dále mají výjimečný energetický potenciál některé oblasti pobřeží Aljašky, Britské Kolumbie a Washingtonu. Na pobřeží Atlantiku v Maine je také vynikající oblast vhodná pro slapové elektrárny.

V současné době, i když je technologie potřebná k využití energie přílivu na dobré technické úrovni, tak je drahá, a ve vyjmenovaných vhodných oblastech, je v provozu jen jedna přílivová elektrárna. Je to 240 MW velká elektrárna při ústí řeky Rance La na severním pobřeží Francie (velké uhelné či jaderné elektrárny vyrábí asi 1000 MW elektrické energie). Elektrárna La Rance je v provozu od roku 1966 a je velmi spolehlivým zdrojem elektrické energie pro Francii. La Rance měla být jedena z mnoha přílivových elektráren ve Francii, pak však začal být realizován francouzský jaderný program.

Dále je realizováno experimentální zařízení v Annapolis Royal v Nova Scotia o výkonu 20 MW, a 0,4 MW přílivové elektrárny v blízkosti Murmansk v Rusku. Velká Británie má několik návrhů na projekty atp.

Existují studie, které zkoumají potenciál přílivových lokalit po celém světě. Bylo odhadnuto, že přílivová hráz s turbínou přes řeku Severn v západní Anglii by mohla pokrýt až 10% spotřeby elektřiny v zemi (ze spotřeby 12 GW). Podobně, několik míst v zátocě Fundy, Cook Inlet na Aljašce, a Bílém moři v Rusku má potenciál generovat velké množství „slapové“ elektřiny.

6.3.2 Dopad na životní prostředí

Přílivová energie je obnovitelný zdroj elektrické energie, která nemá za následek emise plynů, které se podílejí na globálním oteplování, nebo způsobují kyselý dešť spojený se spalováním fosilních paliv při výrobě elektřiny. Využití přílivové energie by také mohlo snížit potřebu jiných konvenčních elektráren a rizik plynoucích z jejich provozování. Změna přílivu přehrazením zálivu nebo ústí řeky, by však mohla mít za následek negativní dopady na vodní a pobřežní ekosystémy, včetně dopady na obyvatelstvo dané lokality.

Provedené studie dokazují, že dopady na životní prostředí u slapových elektráren závisí na každém konkrétním místě a realizaci dalších geografických a demografických podmínek.

6.3.3 Ekonomická efektivita slapových elektráren

Technologie pro využití energie přílivu a odlivu je poměrně levná, protože je to technologie, která je známá a využívána stovky let. Zařízení z oblasti vodních elektráren jsou dobře vyvinutá a technické poznání v této oblasti je daleko. Hlavní překážkou pro využití slapového jevu jsou stavební náklady na stavbu hrází a záchytných nádrží, lagun a přehrad. Zde jsou vysoké investiční náklady, u kterých se musí počítat s dlouholetým plánem výstavby. Potom je celý projekt a cena elektřiny citlivá na velikost diskontní sazby.

Hlavními faktory při určování efektivnosti nákladů při využití energie přílivu jsou rozměry (délka a výška) požadované hráze, a výškový rozdíl mezi přílivem a odlivem. Tyto faktory mohou být vyjádřeny v tzv. "*Gibrat*" poměru místa realizace. Poměr *Gibrat* je poměr délky přehrad v metrech na roční produkci energie v kWh. Čím menší je poměr *Gibrat*, tím více je to žádoucí místo. Příklady *Gibrat* poměrů La Rance má 0,36; 0,87 a Severn na Passamaquoddy v zátocě Fundy má 0,92.

Tři projekty (Swansea Bay 30 MW, Fifoots Point 30 MW a 432 MW North Wales) jsou ve vývoji ve Walesu, kde jsou vysoké přílivové rozsahy. Obnovitelný zdroj

energie je silnou veřejnou a politickou prioritou a tudíž tato elektřina na trhu má konkurenční výhodu.

6.3.4 Technologie

Technologie potřebná pro konverzi přílivové energie na elektrickou energii, je velmi podobná technologii používané v tradičních vodních elektrárnách. Prvním požadavkem je přehrada, nebo jez přes zátoku nebo přílivové ústí. Budování hrází je nákladný proces, proto je nejlepší využívání přílivových zátok a lagun, kde vtokovou část zátoky tvoří jen malý otvor, což snižuje délku přehrady, která je vyžadována. V určitých místech podél přehrady, jsou instalovány turbíny. Když je adekvátní rozdíl v nadmořské výšce vody na různých stranách hráze, otevřou se výpustě. Voda pak teče přes turbíny, které otáčejí elektrický generátor a ten vyrábí elektrickou energii.

Elektřinu lze vyrábět jak ve fázi když voda do hráze natéká (přiliv), tak i když z hráze vytéká (odliv). Elektrárna pracuje tedy v režimu dva přílivy a dva odlivy za den a je potřeba s takovým chodem elektrárny počítat v odběrném diagramu zatížení. V určitých případech a při použití dalších technologií jako jsou čerpadla, by mohla slapová elektrárna pracovat i jako klasická přečerpávací vodní elektrárna.

6.4. Literatura

- [1] Tidal Energy. [online] Tech-FAQ [cit. 2011-12-13] <<http://www.tech-faq.com/tidal-energy.html>>
- [2] Tidal Power. [online] Renewable Energy Office for Cornwall [cit. 2011-12-13] <<http://www.reoc.info/tidal-power>>
- [3] THURMAN, H.V., TRUJILLO A.P. Oceánografie - Tajemný svět moří a oceánů. Computer Press, Brno: 2005, 479 s. ISBN: 80-2510-353-6
- [4] BROOKS, D.A. The Tidal-stream energy resource in Passamaquoddy-Cobscook bays: A fresh look at an old story. [online] Department of Oceanography Texas A&M University, Texas: 2005, 22 s. [2005-01-24] [cit. 2011-12-14] <http://cobscook.tamu.edu/review/TidalStream_RenEnergy.pdf>
- [5] VLACHOVÁ, M. Slapové jevy. [online] Matematicko-fyzikální web [cit. 2011-12-15] <<http://mfweb.wz.cz/astrofyz/94.htm>>
- [6] KHALIGH, A. Ocean Tidal Energy Harvesting. [online] Energy Harvesting and Renewable Energies Laboratory, Maryland. [cit. 2011-12-15] <http://www.ece.umd.edu/~akhaligh/researchprojects.php?project=ocean_tidal>
- [7] Tidal Energy. [online] Ocean Energy Council, Inc., West Palm Beach [cit. 2011-12-16] <<http://www.oceanenergycouncil.com/index.php/Tidal-Energy/Tidal-Energy.html>>

7. Vodní elektrárny

Vodní energii využívá lidstvo již cca 2000 let. Využívání transformace kinetické energie vody k získání mechanické práce byl první úspěšný pokus lidstva využít přírodních energetických zdrojů ke svému prospěchu. Rozvoj prvních civilizací byl spojen s využíváním vodní energie. Stagnující vývoj vodních strojů výrazně urychlila první průmyslová revoluce. V 19. století se začala prosazovat Francisova turbína s radiálním oběžným kolem a dostředivým průtokem s natáčivými rozváděcími lopatkami, Peltonova rovnotlaká turbína pro velké spády a na počátku 20. století Kaplanova přetlaková axiální turbína. Ve 20. století byla postavena velká vodní díla, osazená turbínami se značně velkým jednotkovým výkonem, často v řádu několika set MW. Vzhledem k tomu, že většina typů vodních turbín i velmi velkých výkonů je schopna během velmi krátké doby najet na plný výkon, má vodní energetika každého státu poměrně značný stabilizující význam jak z technického, tak i ekonomického hlediska.

7.1. Význam vodních elektráren pro energetiku v ČR

Význam vodních elektráren v hydrologických podmínkách ČR nespočívá v objemu výroby elektrické energie, jaký poskytuje např. jaderná energetika, tj. JE Dukovany a JE Temelín, ale ve specifických vlastnostech jejich provozu. Vodní elektrárny dokáží velmi pohotově reagovat na okamžitou potřebu elektrické energie v energetické soustavě, nezatěžují životní prostředí odpady, jako je např. vyhořelé palivo, není třeba budovat úložiště odpadu apod. Vodní elektrárny představují levný zdroj elektrické energie, který se využívá zejména v období špičkové spotřeby. Přečerpávací vodní elektrárny navíc umožňují i účelné využití elektřiny produkované méně flexibilními energetickými zdroji v období nízké spotřeby. Vodní elektrárny mají i vodohospodářský význam.

Kromě průtokových vodních elektráren patří mezi nejznámější typy vodních elektráren elektrárny akumulací. Jsou součástí vodních děl - nádrží. Tato vodní díla kromě akumulace vody pro výrobu elektrické energie stabilizují průtoky říčním korytem, chrání před povodňovými vlnami a podporují ekonomicky výhodné plavební možnosti vodních toků.

Břehy nádrží mohou sloužit jako rekreační oblasti. Mnohdy jsou nádrže také zdrojem pitné vody pro vodárny, zdrojem technologické vody pro průmysl a závlahové vody pro zemědělství. V neposlední řadě je třeba připomenout, že v Evropě má své významné a uznávané místo i architektura českých vodních elektráren.

Využití vodních elektráren a především vodních děl z hlediska vodohospodářského významu se projevilo v období katastrofických záplav v roce 2002. Těm se sice v povodí Vltavy nepodařilo zcela zabránit; jejich důsledky by však bez schopnosti operativně a plánovitě přivál vodní masy zadržet byly daleko ničivější.

Vodní elektrárny mají řadu specifických vlastností. Jednou z nich je schopnost tzv. přečerpávacích vodních elektráren operativně řešit zvýšenou potřebu elektrické energie v období energetických špiček.

Elektrizační soustava státu musí v každém okamžiku vyrobit přesně tolik elektrické energie, kolik jí je právě třeba. Spotřeba elektrické energie přitom jak během

dne, tak i v delších obdobích kolísá. Elektrickou energii sice nelze v čistém stavu skladovat, situaci však účinně pomáhají řešit přečerpávací vodní elektrárny.

Přečerpávací vodní elektrárna je v principu soustava dvou výškově rozdílně položených vodních nádrží spojených tlakovým potrubím, na němž je v jeho dolní části umístěna turbína s elektrickým generátorem. Ta vyrábí elektřinu pro elektrizační soustavu v době energetické špičky; v době útlumu se voda z dolní nádrže přečerpává "levnou elektřinou" do nádrže horní, kde její potenciální energie čeká na své optimální využití v "pravou chvíli". Na každou akumulovanou kWh, kterou z přečerpávací vodní elektrárny odebíráme, je nutné k načerpání vody do horní nádrže vynaložit asi 1,4 kWh.

Ke stabilizaci elektrizační sítě jsou však tyto elektrárny nezastupitelné - na potřebu elektrického výkonu v síti, popř. na eventuální výpadek výkonu některé z uhelných elektráren, dokáží reagovat okamžitě. Stejně jako u ostatních typů vodních elektráren přitom využívají své schopnosti rychlého najetí při velkém výkonu.

Technologie využívající principu přečerpávacích vodních elektráren je perspektivní především z hlediska možnosti akumulace elektrické energie. Posláním vodních elektráren v ČR je pracovat jako doplňkové zdroje primárních zdrojů (klasických elektráren, JE Dukovany, JE Temelín). Jednotlivé technologie vodních elektráren budou podrobněji popsány v dalších částech této kapitoly.

7.2. Pracovní princip vodních elektráren

Ve vodních elektrárnách voda roztáčí turbínu; ta je na společné hřídeli s elektrickým generátorem (dohromady tvoří tzv. turbogenerátor). Mechanická energie proudící vody se tak mění na energii elektrickou, která se transformuje a odvádí do míst spotřeby. Obdobný princip využívá i uhelná nebo jaderná elektrárna.

Výběr turbíny závisí na účelu a podmínkách celého vodního díla. Nejčastěji se osazují turbíny reakčního typu (Francisova nebo Kaplanova turbína), a to v řadě modifikací. Pro vysoké spády (někdy až 500 m) se používá akční Peltonova turbína. V přečerpávacích vodních elektrárnách se používá turbín s reverzním chodem a s přestavitelnými lopatkami. V malých vodních elektrárnách se převážně zabydlela malá horizontální turbína Bánkiho spolu s upravenou jednoduchou turbínou Francisovou.

Vůbec nejvyšší účinnost pro velké spády vykazuje Dériazova turbína z roku 1951. Jde o diagonální verzi Kaplanovy turbíny. Podle způsobu práce se moderní turbíny dělí na rovnotlaké a přetlakové. V rovnotlakých turbínách zůstává tlak vody stále stejný, to znamená, že voda vychází z turbíny pod stejným tlakem, pod jakým do ní vstupuje. U přetlakových turbín vstupuje voda do oběžného kola s určitým přetlakem, který při průtoku klesá. Při výstupu z turbíny má tedy voda nižší tlak než při vstupu do ní. Tak pracují např. Francisovy turbíny, vhodné pro střední spády. Pro malé výkony na malých spádech jsou vhodné horizontální turbíny, pro malé spády a velké výkony se stavějí turbíny vertikální. Vývoj Francisových turbín ještě není ukončen. Dosahují výkonů až 250 MW, jsou však schopny i 1000 MW výkonu a výkonů vyšších.

Vodní turbíny jsou technicky nejdokonalejší mechanické motory vůbec – dosahují 95% účinnosti. Umístění vlastní elektrárny může být různé podle tvaru teré-

nu, výškových a spádových možností a na množství vody. Existují elektrárny zabudované přímo do tělesa hráze, jinde je elektrárna vystavěna hluboko v podzemí. Voda se k ní přivádí tlakovým potrubím a odvádí se podzemním kanálem.

7.3. Hydroenergetický potenciál

Měrná energie vody má podle Bernoulliho rovnice složku potenciální, tlakovou a kinetickou vyjádřené vztahem:

$$E_H = gH + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} \quad (J.kg^{-1}) \quad (7.1)$$

H výška nad srovnávací rovinou (m)

P tlak (N/m²)

C rychlost (m/s)

ρ hustota vody (kg/m³)

Možnosti vodního díla se hodnotí podle hydroenergetického potenciálu, jehož teoretická hodnota je určena jako integrál potenciálů jednotlivých úseků vodního toku určených ze středních ročních průtoků podle vztahu:

$$E_T = g \cdot \int_0^H Q(H) dH \quad (W) \quad (7.2)$$

$Q(H)$ střední objemový průtok elementárního úseku toku (m³.s⁻¹)

H, dH geodetický spád mezi začátkem a koncem toku a jeho element (m)

Pro určení průtokového množství se provádějí dlouhodobá hydrologická měření a z nich se stanovují chronologické čáry průtoků a křivka trvání průtoků. Chronologická čára udává průměrné denní průtoky, ze kterých se statisticky vyhodnotí průměrné měsíční průtoky a z nich výslednou křivku trvání průtoků. Plocha pod čarou trvání výkonu celkové množství vody proteklé měřeným místem za rok.

Pro stanovení potenciální energie toku se využívají poměrné roční doby trvání průtoků T v hodnotách $T \in (0,25; 0,5; 0,95)$.

Z odhadu světového hydroenergetického potenciálu 3,75 TW připadá na jednotlivé světadílů:

Světadíl	Podíl (%)
Austrálie	4,5
Afrika	18,7
Amerika	34,7
Asie	35,7
Evropa	6,4

Tab. 7.1: Hydroenergetický potenciál

Technicky využitelný potenciál je menší než teoretický, využití celkového spádu je nereálné a proces přeměny na elektrickou energii je doprovázen ztrátami různého druhu. Technicky využitelný potenciál je v podmínkách České republiky asi 50% potenciálu teoretického a představuje asi 400 MW.

Stavba vodní elektrárny umožňuje:

- využití hydroenergetického potenciálu k přeměně na elektrickou energii,
- regulaci vodního toku a hospodaření s vodou,
- zajišťování splavnosti, ochrana při povodních, vznik rekreačních oblastí.

Pro hydroenergetický potenciál mezi dvěma body 1-2 vodní trajektorie platí vztah:

$$E_{1-2} = g(H_1 - H_2) + \frac{(p_1 - p_2)}{\gamma} + \frac{(c_1^2 - c_2^2)}{2} \quad (J.kg^{-1}) \quad (7.3)$$

Podstatnou složkou pro výpočet výkonu vodní turbíny je potenciální složka a proto můžeme přijmout zjednodušení:

$$E_{1-2} = g(H_1 - H_2) = gH \quad (7.4)$$

a výpočet výkonu je pak definován výrazem:

$$P_i = \rho \cdot Q \cdot E_{1-2} \eta_t \quad (7.5)$$

$\eta_t = \eta_v \eta_h \eta_m \dots$ celková účinnost vodní turbíny (0,8-0,9)

$\eta_v \dots$ objemová účinnost respektující ztrátu průtokového množství

$\eta_h \dots$ hydraulická účinnost respektující hydraulické ztráty

$\eta_m \dots$ mechanická účinnost respektující mechanické ztráty třením atp.

Základní parametry hydroenergetického díla jsou:

- průtok Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)
- instalovaný výkon P_i (W)
- spád H (m)
- účinnost η
- roční výroba elektrické energie E_r
- doba využití instalovaného výkonu $\tau_v = E_r / P_i$

Podle doby τ_v se elektrárny člení na:

τ_v (h)	typ elektrárny
4000-6500	průtočné
1500-3000	akumulační
1000-1500	přečerpávací

Tab. 7.2: Rozdělení podle doby využití instalovaného výkonu

Hlavní znaky hydroenergetického zdroje :

- spojitá obnovitelnost,
- proměnlivost průtoku vodních zdrojů,
- vysoké investiční náklady na stavbu vodních děl,
- nízké provozní náklady.

Stavba vodních elektráren přináší následující výhody:

- regulace vodního průtoku a hospodaření s vodou,
- zajišťování splavnosti toku,
- možnost využít vodu pro zavlažování,
- možnost vzniku rekreačních oblastí,
- možnost akumulace energie.

Jako nevýhody můžeme uvést následující vlastnosti:

- trvalý zásah do krajiny,
- ekologické ovlivnění okolí,
- ovlivňování spodních vod,
- tvoření úsadeb na dně.

Vodní elektrárny mají vedle vodohospodářského významu velký význam pro provoz energetické soustavy, neboť jsou provozně levným a rychlým zdrojem, který se používá pro pokrývání rychlých výkonových změn a přečerpávacích elektráren také pro vyrovnávání diagramů zatížení v oblasti nižších hodnot zatížení.

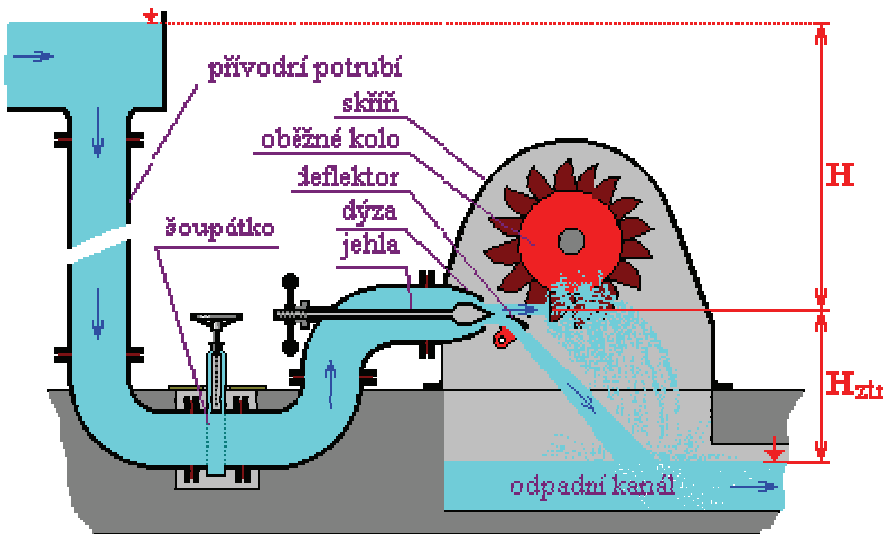
7.4. Základní typy a rozdělení vodních turbín

Voda do turbíny přitéká přívodním potrubím a stacionární rozváděcí zařízení (rozdávěcích kanálů u Kaplanovy turbíny, rozváděcích lopatek u Francisovy a dýz u Peltonovy turbíny) v nichž se buď celá (rovnotlaké) nebo jen část (přetlakové) energie mění na pohybovou. Z rozváděcích zařízení vtéká voda do obráceně zakřivených lopatek oběžných kanálů a tlakem na ně vytváří točivý moment.

Z hlediska průběhu tlaku vody při průtoku oběžným kolem se vodní turbíny tedy dělí na *rovnotlaké* a *přetlakové*. Nejvýznamnějším představitelem rovnotlakých turbín je *Peltonova turbína* (obr. 7.1), která se používá pro velké spády (maximální využívaný spád je 1771 m v hydrocentrále Reiseck – Kreuzek v Korutanech). Nejčastěji používanými typy přetlakových turbín jsou *Francisova* (obr. 7.2), *Kaplanova* (obr. 7.5) a *Deriazova (diagonální)* turbína (obr. 7.6). Pro rozlišování různých typů hydraulických turbín se vžil odvozený kritérium tzv. hydraulické podobnosti – *měrné otáčky*. Popudem k zavedení kritéria měrných otáček byla snaha výrobců vodních turbín zobecnit poznatky a zkušenosti ze stavby na nové konstrukce. Mají-li dvě turbíny s rozdílnými provozními parametry (spád H , průtok Q , otáčky n) stejné měrné otáčky, jsou si tzv. hydraulicky podobné, mají např. přibližně stejnou účinnost a tvar rychlostních trojúhelníků. Pro měrné otáčky vodních turbín platí vztah:

$$n_q = \frac{333 \cdot n \cdot \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{Y^3}} \quad (7.6)$$

- n otáčky turbíny (s^{-1})
 Q objemový průtok vody ($m^3 \cdot s^{-1}$)
 Y měrná energie vody ($J \cdot kg^{-1}$)



Obr. 7.1: Peltonova turbína

Oblasti použití základních typů turbín jsou znázorněny na obr. 7.4, dosažené účinnosti v závislosti na měrných otáčkách jsou uvedeny na obr. 7.3. Aby bylo možno beze ztráty spádu umístit vodní turbínu nad úroveň spodní hladiny vody, spojuje se výstup přetlakových turbín se spodní hladinou potrubím s rozšiřujícím se průřezem, které ústí pod spodní hladinou vody, (tzv. savka). Po zaplnění savky vodou vznikne na výstupu vody z oběžného kola podtlak, odpovídající výšce vodního sloupce ΔH_s mezi výstupem z oběžného kola turbíny a spodní hladinou vody v souladu s Bernoulliho rovnicí mezi těmito dvěma body. Rozšiřující se průřez sav-

ky navíc umožňuje snížit ztrátu výstupní rychlostí vody. Maximální možná "sací výška" turbíny nad spodní hladinou vody se určuje z rovnice:

$$H_{sg \max} = \frac{p_b - p'_w}{\rho \cdot g} - H \cdot \sigma_{kr} - \frac{\Delta Y_{zs}}{g} \quad (7.7)$$

kde

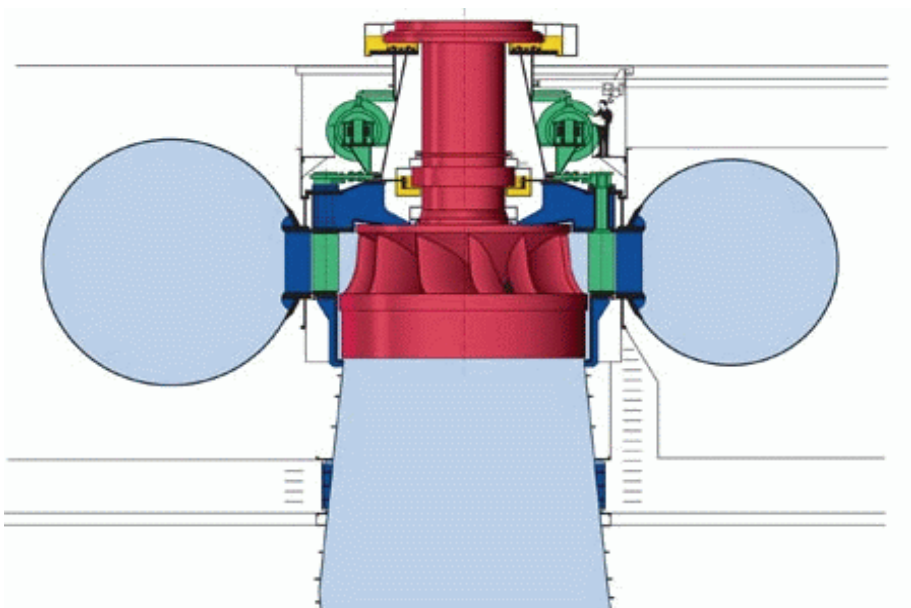
p_b barometrický tlak (Pa)

σ_{kr} Thomův kavitační součinitel (-)

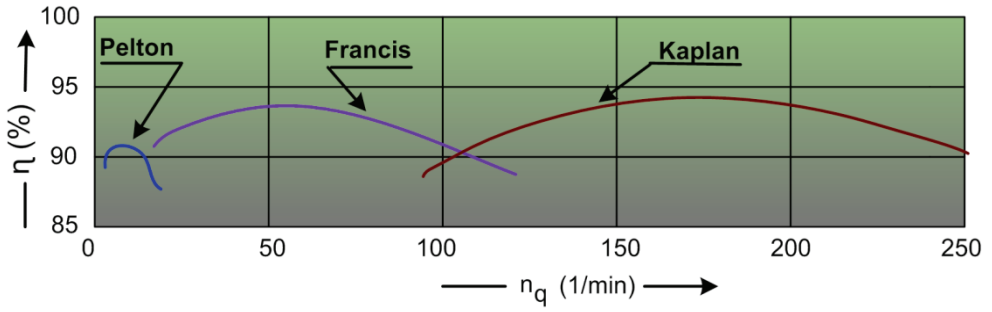
p'_w tlak nasycených par (Pa)

ΔY_{zs} ztráta savky ($J \cdot kg^{-1}$)

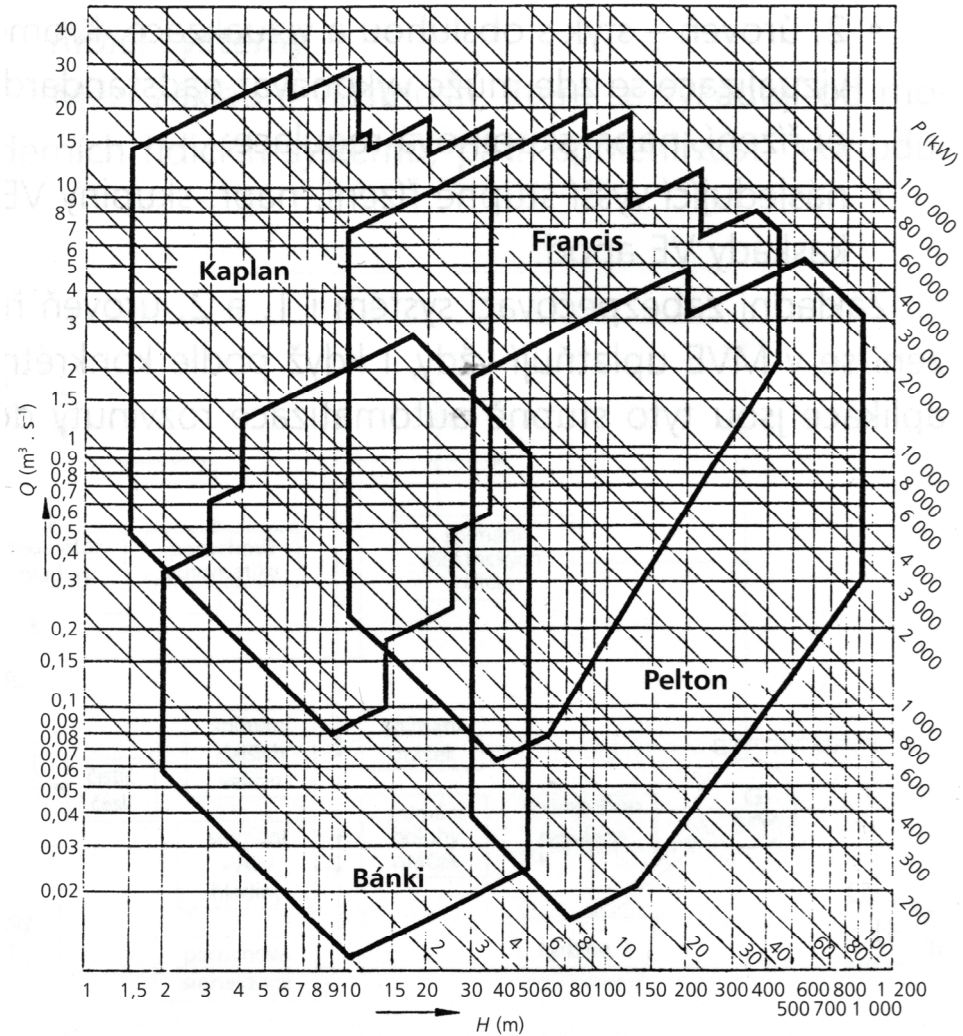
H spád (m)



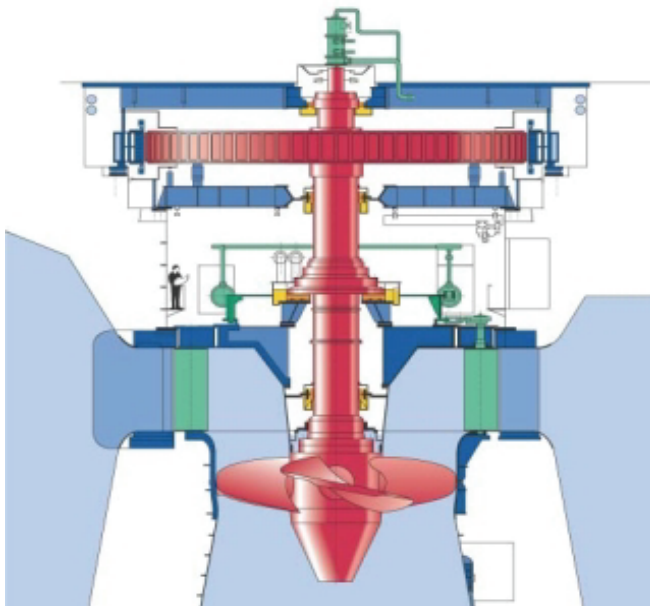
Obr. 7.2: Francisova turbína



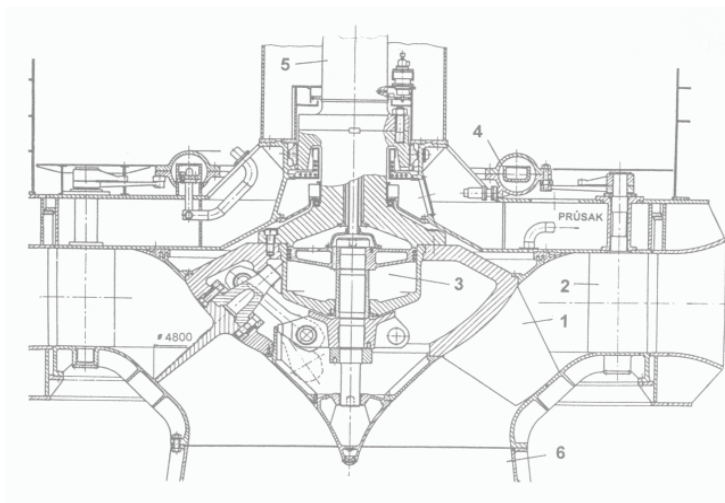
Obr. 7.3: Dosahované účinnosti základních typů turbín



Obr. 7.4: Oblasti použití základních typů turbín



Obr. 7.5: Kaplanova turbína



Obr. 7.6: Diagonální turbína (Deriazova)

7.5. Základní typy a provozní vlastnosti vodních elektráren

Vodní turbíny jsou většinou součástí hydrocentrál, kde transformují potenciální energii vody vyjádřenou měrnou energií Y ($J \cdot kg^{-1}$) respektive spádem H (m) a objemovým průtokem Q ($m^3 \cdot s^{-1}$). Vzájemná vazba provozních parametrů Q a H je

dána přírodními podmínkami v místě hydrocentrály. V horní části toku je obvykle malý průtok a větší spád, na dolním toku je obvykle velký průtok a nízká koncentrace spádu. Těmto podmínkám je nutno přizpůsobit použitý typ turbíny. Vodní turbíny dodávají prostřednictvím synchronního vícepólového generátoru elektrickou energii do sítě s konstantní frekvencí. Během krátkého regulačního pochodu vyvolaného potřebou změny výkonu turbíny se nemění spád.

Výkon turbíny:

$$P = Q \cdot H \cdot \rho \cdot \eta \quad (W) \quad (7.8)$$

Výkon lze tedy změnit pouze změnou objemového průtoku, který se obvykle řeší řízením přítoku vody, natáčením rozváděcích nebo oběžných lopatek, případně jejich kombinací.

Podle systému soustředění vodní energie (průtoku a spádu) se dělí hydrocentrály na:

Přehradní a jezové – využívají vzdouvacího zařízení (jez, přehrada). Přehradní hráze se dělí na:

- sypané,
- gravitační,
- klenbové.

Derivační – odvádí vodu z původního koryta přivaděčem a po průtoku turbínou jí opětně přivádí do koryta.

Přehradně derivační – vzdouvacím zařízením je přehrada, která soustřeďuje spád i průtok. Voda je zvláštním přivaděčem vedena k turbínám.

Přečerpávací – s horní a dolní nádrží.

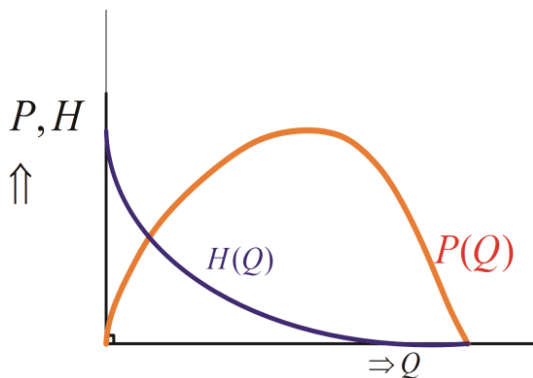
Malé vodní elektrárny – k využití potenciálu vodních toků v ČR slouží i kategorie tzv. malých vodních elektráren (zdroje elektrické energie s instalovaným výkonem do 10 MW). Většina malých vodních elektráren slouží jako sezónní zdroje. Průtoky toků, na kterých jsou zřizovány, jsou kolísavé a silně závislé na počasí a na ročním období. Vzhledem ke svému nezanedbatelnému a v současnosti stále se zvyšujícímu počtu těchto malých vodních děl zvyšují využitelnost vodní energie v ČR, jejíž potenciál pro využití vodní energie ve velkých hydrocentrálách je prakticky vyčerpán.

Dle způsobu provozu a zařazení do diagramu zatížení se můžeme vodní elektrárny rozdělit na *Průtočné* a *Regulační*.

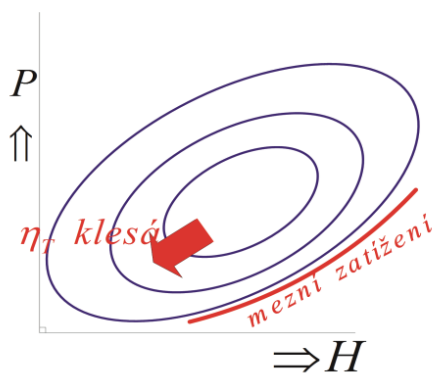
7.5.1 Průtočné vodní elektrárny.

Pracovní pásmo průtočných elektráren je v základní oblasti trvalého zatížení diagramu zatížení protože ke generaci svého výkonu využívá právě aktuální hodnotu průtoku vody řečištěm a její výkon se proto nepřizpůsobuje požadavkům odběru v soustavě. U elektráren s malým spádem se s průtokem mění i spád a dokonce při velkých hodnotách průtoku (povodně) může dojít k vyrovnání spodní a

horní hladiny s nulovým spádem. Výkon nejprve s rostoucím průtokem stoupá a po dosažení určitého maxima začne klesat až k nule.



Obr. 7.7: Závislost výkonu a spádu na průtoku



Obr. 7.8: Lasturový diagram

Závislost mezi výkonem a spádem prezentuje názorně lasturový diagram, jehož jednotlivé křivky jsou parametrizovány konstantní účinností. Diagram omezuje čára mezních výkonů, kterých turbína dosahuje při plné hltnosti turbin. Základní křivky se získávají měřením na hydraulických modelech a na reálné provedení se přepočítávají podle zákonů hydraulické podobnosti.

7.5.2 Regulační vodní elektrárny.

Pracovní pásma regulačních vodních elektráren jsou zpravidla ve špičkové nebo pološpičkové části diagramu zatížení. Ke své činnosti potřebují mít vhodný prostor umožňující akumulaci potenciální energii vody. Tento prostor může být podle přírodních podmínek realizován cestou přirozenou nebo umělou. Přirozené akumulační prostory tvoří jezera. Pro vytvoření umělých akumulací se užívá:

- prostor vzniklý zahrazením koryta řeky přehradou (údolní přehrada),

- prostor přirozené kotliny v okolí koryta řeky, který se pak spojuje s korytem řeky spojovacím (derivačním) kanálem.

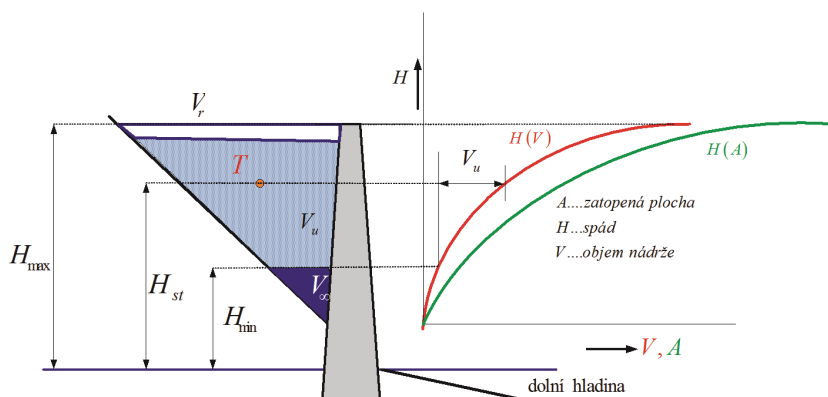
Podle vzájemného umístění nádrže a elektrárny rozeznáváme:

- horní nádrž, která je výše položena než elektrárna a je s ní spojena korytem nebo potrubím,
- vlastní nádrž, která je vytvořena přehradou elektrárny,
- dolní nádrž, která je umístěna pod regulační elektrárnou a má za úkol zajistit rovnoměrný průtok na jejím výstupu.

Objem akumulací nádrže musí zajistit akumulaci energie na dobu T , která může nabývat hodnoty den, týden, měsíc, rok nebo i více let.

Objem dále členíme na:

- V_∞ objem stálého zadržení, který je určen objemem pod nejnižší hladinou, pod kterou se voda z nádrže již neodebírá,
- V_u užitný objem, který je dán objemem mezi nejvyšší a nejnižší provozní hladinou,
- V_r ...ochranný (retenční) objem sloužící k eliminaci povodňových jevů a ochraně povodí pod akumulací nádrží.



Obr. 7.9: Znárodnění objemů akumulací nádrže

Užitný objem akumulací nádrže vodní elektrárny

Uvažme pro vysvětlení základů vlivu akumulace vody hydroenergetické dílo s dobou akumulace T , stálým přítokem do nádrže $Q_1(t)=Q_1$ a pokrývající proměnlivý diagram zatížení $P(t)$. Vazba mezi generovaným výkonem a průtokem $Q_2(t)$ je dána vztahem:

$$P(t) = k_{PQ} \cdot Q_2(t) \quad (7.9)$$

Přijmeme-li pro zjednodušení předpoklad konstantního spádu H a účinnosti η bude průtok vody turbinami obrazem diagramu zatížení $P(t)$.

$P(t)$ diagram zatížení

$Q_2(t)$ průběh odtoků

$Q_1(t) = Q_1$..průběh konstantního přítoku

$V_1(t)$ průběh přitékajícího objemu

$V_2(t)$ průběh odtékajícího objemu

Střední hodnota výkonu a průtoku:

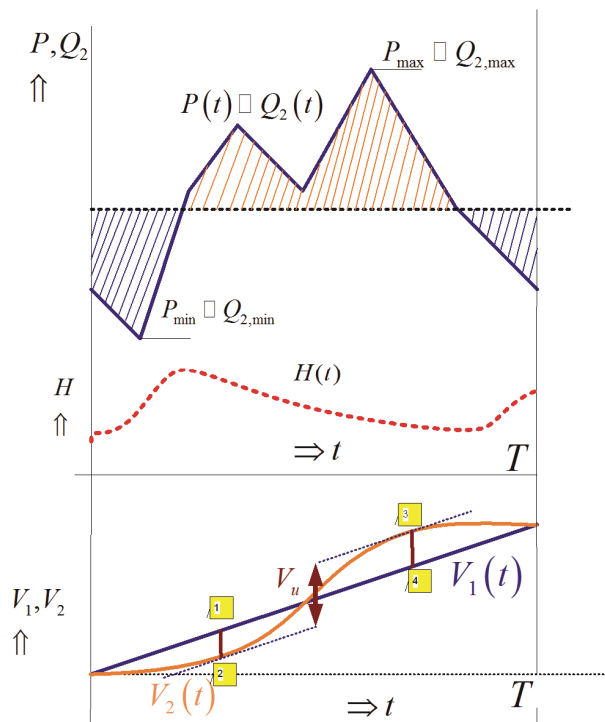
$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt, Q_s = \frac{1}{T} \int_0^T Q(t) dt \quad (7.10)$$

$$\text{objem přítoků: } V_1(t) = Q_1 \cdot t \quad (7.11)$$

$$\text{objem odtoků: } V_2(t) = \int_0^t Q_2(\tau) d\tau = \frac{1}{k_{PQ}} \int_0^t P(\tau) d\tau \quad (7.12)$$

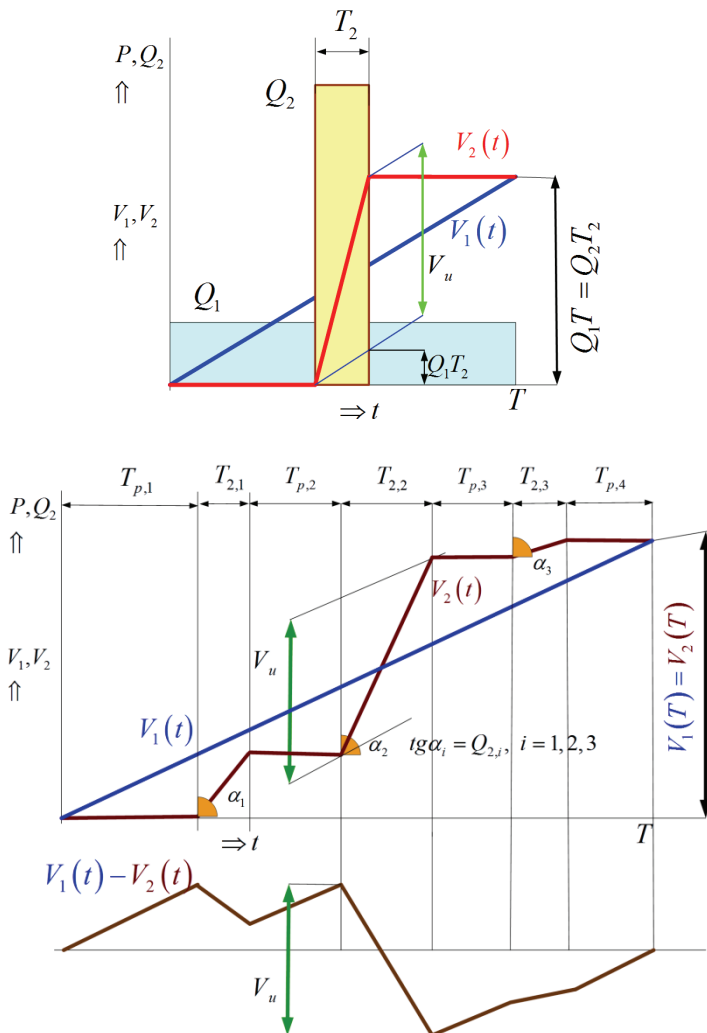
Užitný objem V_u je definován jako součet maximálních vzdáleností mezi $V_1(t)$ a $V_2(t)$ v kladných a záporných hodnotách.

$$V_u = \max \{V_1(t) - V_2(t)\} - \min \{V_1(t) - V_2(t)\} \quad (7.13)$$



Obr. 7.10: Diagram zatížení a průběhy objemů přítoků a odtoků

Provoz špičkové elektrárny



Obr. 7.11: Práce špičkové elektrárny

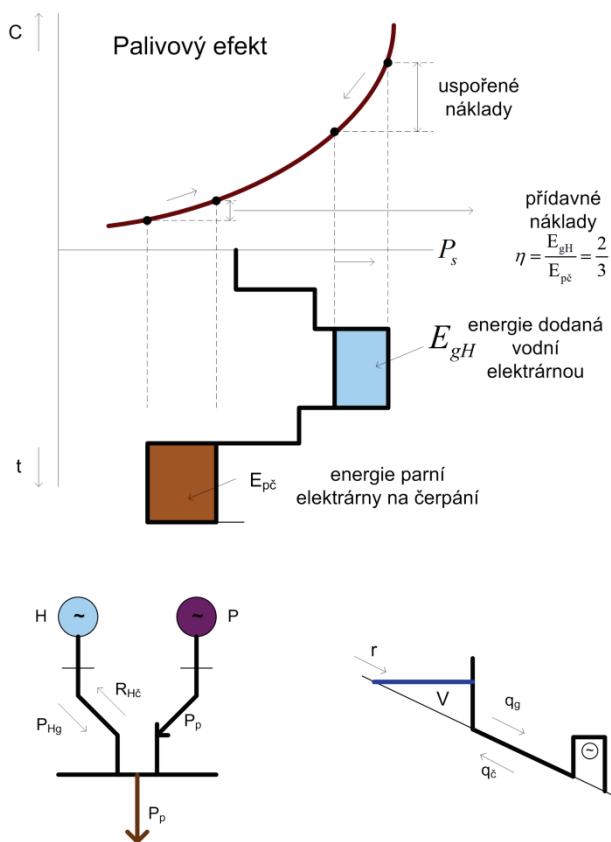
Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny (PVE) jsou příkladem regulačních elektráren, které mají nezastupitelnou roli při pokrývání špičkových zatížení a rychlých výkonových změn denního diagramu. Prakticky se využívají tato uspořádání:

- Třístrojové: sestava se skládá ze tří vertikálně uspořádaných strojů: turbina – alternátor (motor) – čerpadlo. Alternátor pracuje v čerpadlovém provozu jako motor.

- Dvoustrojové: toto vertikální uspořádání strojů obsahuje: reverzní turbínu (čerpadlo) – alternátor (motor). Turbinové oběžné kolo pracuje v čerpadlovém provozu jako čerpadlo a alternátor jako synchronní motor.

V současné době se využívá hlavně dvoustrojové uspořádání tvořené synchronním strojem a čerpadlovou turbínou. Čerpadlová Francisova či Deriazova turbína mění při změně mezi turbinovým a čerpadlovým provozem i smysl otáček. Čerpadlová Kaplanova turbína smysl otáčení zůstává zachovalý, ale natáčejí se oběžné lopatky. Přecherčpávací elektrárna pracuje v soustavě dvou nádrží umístěných nad a pod elektrárnou a spojených s elektrárnou tlakovým potrubím. V době největší spotřeby se voda v horní nádrži využívá k výrobě a v době nízkého zatížení (a tím levnější energie z parních elektráren) se voda z dolní nádrže přečerpává do nádrže horní. Situaci znázorňuje obr. 7.12. Technologie přečerpávacích elektráren je pro provoz systému perspektivní, protože vyrovnává diagram zatížení a umožňuje určitou formu akumulace energie a navíc jsou rychle nafázovatelné a zatěžovatelné. Účinnost procesu je 60-75% a na každou akumulovanou 1 kWh je nutné vynaložit asi 1,4 kWh. Znázornění rozdílů nákladů (palivový efekt) prezentuje obr. 7.12



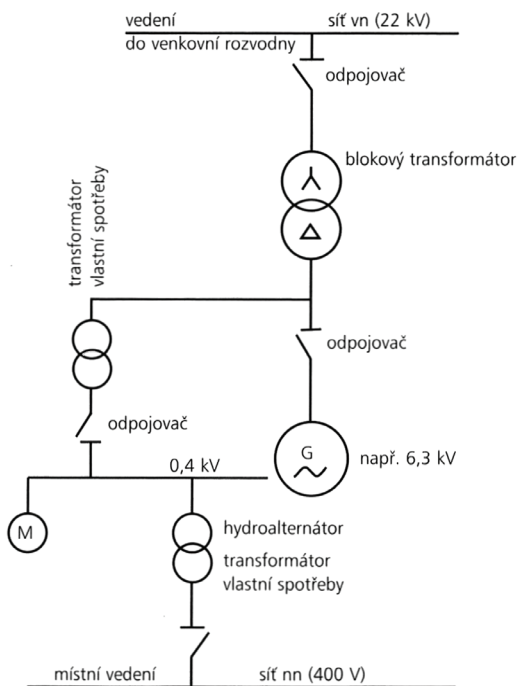
Obr. 7.12: Znázornění palivového efektu přečerpávání

7.6. Elektrotechnická zařízení vodních elektráren

Základní prvky elektrického systému MVE jsou:

- generátor,
- vývody z generátoru,
- rozvodna generátorových vývodů,
- blokový transformátor,
- vývody z transformátoru,
- venkovní rozvodna (může i nemusí být),
- transformátor vlastní spotřeby,
- elektrické motory různých zařízení (jeřáb, čerpadla),
- budiče generátorů a pomocná zařízení (odpojovače, vypínače, jističe...)

Možné hlavní elektrické schéma vodní elektrárny je vidět na obrázku 7.13.



Obr. 7.13: Schéma připojení MVE k síti

S ohledem na skutečnost, že hydroenergetický potenciál je v České republice již poměrně nízký, budeme se dále podrobněji zabývat technologiemi pro malé vodní elektrárny (MVE). Pro výstavbu elektráren malých výkonů lze s určitými omezeními, energetický potenciál vody na našem území ještě využít.

7.6.1 Začlenění MVE do energetického systému

Česká elektrizační soustava pracuje se střídavým elektrickým proudem s frekvencí 50 Hz. Napěťové úrovně se dělí následovně:

- vvn (110 až 400 kV) – dlouhá přenosová vedení,
- vn (10, 20 a 35 kV) – distribuční sítě,
- nn (do 1000 V) – místní sítě, domovní a průmyslové rozvody.

MVE pracují paralelně s elektrizační sítí. Nejmenší výkony jsou připojovány k síti nn v rámci objektu a vyrobená elektrická energie je určena pro vlastní spotřebu objektu. Případný přebytek výkonu se dodává do místní distribuční sítě. I MVE s vyššími výkony (od 300 do 1000 kW) lze připojit k distribuční síti nn. Vyšší výkony se zpravidla připojují k síti vn.

7.6.2 Elektrická zařízení MVE

Přeměnu elektrické mechanické energie zajišťuje elektrický generátor. Generátor je připojen prostřednictvím přenosového a transformačního zařízení k místu spotřeby. Vyrobenou elektrickou energii je třeba okamžitě spotřebovat (minimální možnosti akumulace).

Přenosovou cestu tvoří elektrický obvod se spínacími a jistícimi přístroji, řídicími, měřicími a zabezpečovacími obvody. Samotné uspořádání MVE závisí na použitém hydrogenerátoru.

Pro většinu provozovaných MVE jsou vhodné generátory na střídavý proud. Využívají se jak synchronní tak asynchronní generátory. Volba mezi uvedenými typy generátorů je podmíněna požadavky provozovatele distribuční sítě, k níž je MVE připojena. Na vybraném typu závisí také skladby elektrického zařízení MVE.

Synchronní generátor

Synchronní generátor má stator se střídavým trojfázovým vinutím a rotor s jednosměrným budícím vinutím. Konstrukční provedení vychází z velikosti generátoru a počtu pólů. Počet pólů spolu s frekvencí určuje synchronní otáčky generátoru:

$$n = \frac{f \cdot 60}{p}, \text{ resp. } n = \frac{3000}{p} \quad (\text{ot}^{-1}) \quad (7.14)$$

kde

n synchronní otáčky generátoru

f frekvence sítě

p počet pólových dvojic

Synchronní generátor má možnost regulovat napětí a frekvenci, kterou vyjadřuje vztah 7.14. Napětí je možno ovlivnit změnou budícího proudu. Uvedené způsoby regulace platí pro případ samostatného provozu synchronního generátoru do autonomní sítě. Provoz MVE v samostatném chodu je ale spíše výjimkou. Může být požadován v případě výpadku sítě jako náhradní zdroj nebo pro napájení ob-

jektů ve vzdálené oblasti. Častější jsou případy chodu synchronního generátoru paralelně s elektrizační sítí.

Síť je považována za výkonově silnou, tj. s pevným napětím a frekvencí, které se nedají malým výkonem uvažovaného generátoru ovlivnit. Generátor dodává do sítě jalový a činný výkon. Činný výkon je dán mechanickým výkonem vodního stroje a souvisí se zátěžovým úhlem generátoru. Jalový výkon je dán velikostí budícího proudu. K dodávce do sítě se používá regulace na konstantní jalový výkon nebo na konstantní účinník. Paralelní provoz se sítí při nízkém budícím proudu skrývá nebezpečí v podobě vypadnutí generátoru ze synchronizmu.

Připojení generátoru k síti (fázování) je jemné při synchronizaci napětí, frekvence a fáze nebo samosynchronizací, tj. připojením generátoru k síti v přibližně synchronních otáčkách v nenabuzeném stavu a následném nabuzení. Samosynchronizací vzniká proudový ráz 2,5 – 3krát větší, než jmenovitý proud.

Asynchronní generátor

Používá se především v režimu výroby a dodávky elektrické energie MVE do pevné sítě. U samostatného provozu do autonomní sítě se asynchronní generátor nepoužívá.

Stator asynchronního generátoru má trojfázové střídavé vinutí, stejně jako synchronní stroje. Rotor může být vinutý s kroužky nebo se dá použít rotor s klecovým vinutím. Při přivedení trojfázového napětí na svorky statoru vznikne točivé magnetické pole, které v rotorovém vinutí indukuje proudy, jejichž silovými účinky se rotor otáčí ve směru točení magnetického pole a stroj se chová jako motor. Když rotor dosáhne synchronních otáček s magnetickým polem, nic se neindukuje. Proto se rotor v motorovém chodu otáčí s otáčkami o něco nižšími, než jsou otáčky synchronní – pracuje se skluzem.

Při zvýšení otáček rotoru nad otáčky magnetického pole bude rotor do sítě dodávat činný výkon. Ze sítě však bude odebírat jalový výkon pro svou magnetizaci. Odběr jalového výkonu ze sítě má za následek zvýšení proudu v síti. Pro potlačení tohoto jevu se využívá kompenzace pomocí kondenzátorů, ale to přináší nebezpečí vzniku přepětí na svorkách paralelní kombinace kondenzátor – generátor, samobuzením při výpadku sítě a následném zvýšení otáček hydrogenerátoru.

Fázování generátoru se provede jednoduchým připojením generátoru k síti při dosažení přibližně synchronních otáček. Použitím asynchronního generátoru se zjednoduší ostatní elektrická zařízení, zmenšuje se jejich hmotnost, a tím se snižuje i cena. Nevýhodou je odběr jalového výkonu, neschopnost samostatného chodu a nižší účinnost při částečném výkonovém zatížení.

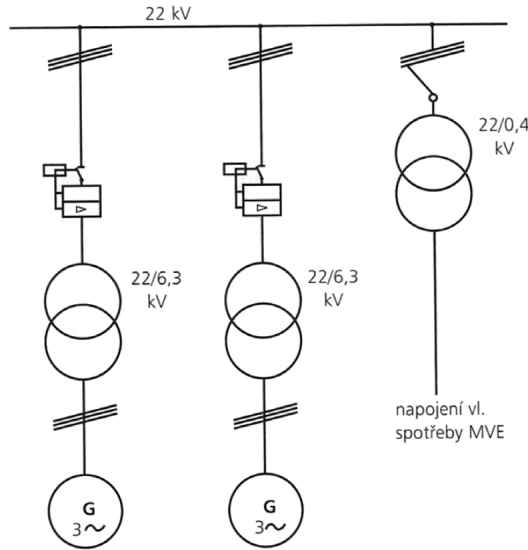
Asynchronní stroje se zpravidla dimenzují výkonově co nejbližší k maximálnímu výkonu turbíny.

7.6.3 Silnoproudá zařízení MVE

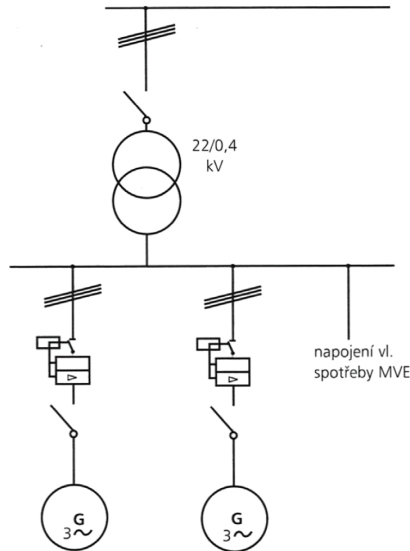
Silnoproudá zařízení jsou určena k přenosu, transformaci, spínání a jištění vyrobené elektrické energie a také k zásobování pohonů a jiných elektrických spotřebičů zahrnutých do vlastní spotřeby MVE. K přenosu výkonu z objektu MVE je

určena přípojka venkovním nebo kabelovým vedením, která je na úrovni nn ($3 \times 400 \text{ V}$) nebo při vyšších výkonech a větší vzdálenosti vn ($22 \text{ a } 35 \text{ kV}$).

Elektrická přípojka končí v hlavní skříní nebo v případě přípojky vn v rozvodně vysokého napětí. V případě, že se pro MVE použije více napěťových úrovní, musí se použít transformátor. Pro MVE se používají jednofázové nebo trojfázové transformátory. Generátory jsou k transformátoru připojeny blokově nebo je transformátor společný pro více generátorů. Uspořádání obou způsobů připojení je vidět na obrázku 7.14 a 7.15. Blokované zapojení se používá pro případ připojení vn generátorů $6,3 \text{ kV}$ k síti 22 kV . Zapojení se společným transformátorem je vhodnější ke spolupráci generátorů nn s vn sítí.



Obr. 7.14: Příklad blokového zapojení



Obr. 7.15: Příklad zapojení se společným transformátorem

7.7. Literatura

- [1] Klaus Heuck Elektrische Energieversorgung © Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010
- [2] Adolf J. Schwab Elektroenergiesysteme  Springer 2007
- [3] Victor L Streeter.: Fluid Mechanics.Mc-GrawHill 1971
- [4] Fabio Saccomano: Electric Power Systems.Wiley Interscience 2003
- [5] R.A.Zahoransky. Energietechnik. Wieweg+Teubner 2009
- [6] S. Kaplan. Power Plant Characteristics and Costs.Nova Science Publishers, Inc.2010
- [7] Juergen Schlabbach and Karl-Heinz Rofalski - Power System Engineering. 2008 John Wiley & Sons, Ltd.
- [8] P.Kundur. - Power System Analysis and Control.Mc.Graw Hill 1999.
- [9] Machowski.Power System Dynamics:Stability and Control. 2008 John Wiley & Sons, Ltd.
- [10] F. Saccomanno.Electric Power System: Analysis and Control.IEEE Press. 2003.
- [11] S.Bouček, A.Dočekal. Elektrárny II.Skripta ČVUT 1995
- [12] M.Cipra,J.Salaba,J. Šťastný .Energetická strojní zařízení. Skripta ČVUT 1981.

8. Palivové články a jejich hospodářství

Elektroenergetický systém představuje technologický proces, zahrnující výrobní zdroje elektrické energie, přenosovou a distribuční soustavu a zařízení pro spotřebu elektřiny. Již řadu let je znám princip výroby elektrické energie prostřednictvím palivových článků. Palivové články našly zprvu nezastupitelné místo ve vesmírných a vojenských projektech. Díky těmto projektům měla zmíněná technologie možnost se rychle a významně zdokonalit, což pozitivně přispělo i k rozvoji řad jiných oborů. V poslední době se však palivové články dostávají do povědomí veřejnosti spíše ve spojitosti s automobilovým průmyslem, když jsou do nich vkládány určité naděje, že by mohly do budoucna představovat alternativní zdroj energie pro dopravní prostředky. Další zajímavou a možná často opomíjenou problematikou jsou pak palivové články, nacházející uplatnění v elektroenergetice a energetice obecně.

Kapitola si proto klade za cíl informovat výhradně o uplatnění palivových článků v energetice. Nejprve bude proveden obecný úvod přibližující základní princip výroby elektrické energie prostřednictvím palivových článků. Pro vytvoření reálné představy, jak vůbec takové palivové články vypadají a jaké jsou na ně kladeny požadavky, bude popsána jejich obecná konstrukce a bude provedeno rozdělení článků podle základních parametrů. Dále zde budou poskytnuty aktuální informace o systémech, které byly ve světě v poslední době uvedeny do provozu nebo budou v nejbližší době realizovány. Kapitola také seznámí se základními možnostmi výroby a skladování vodíku, jakožto nezbytného paliva pro články.

8.1. Historie a blízká budoucnost

Historie palivového článku, od objevení základního principu, přes prototypy až po dnešní známou konstrukci, je stejně zajímavá, jak tomu bývá i u jiných takto přelomových objevů a zařízení. Jelikož historie palivových článků je opravdu velmi bohatá, budou zde proto přiblížena pouze fakta, která by mohla být považována za nejpodstatnější a mohla by být pro čtenáře přínosná vzhledem ke koncepci samotné kapitoly.

Lze konstatovat, že objevení hlavní podstaty palivového článku přímo souvisí s objevem a zkoumáním elektrolýzy. Dané problematice se v první polovině 19. století věnovalo několik odborníků, mezi nimi i Humphry Davy, respektive Christian Friedrich Schönbein, který pak princip palivového článku představil odborné veřejnosti. Obecně je nutné uvést, že literatura zabývající se historií palivových článků se v některých faktech liší [1][2][3].

Za další mezník v historii článků lze považovat provedení řady experimentů, které uskutečnil v roce 1839 sir William Robert Grove a které prokázaly možnost vyrobit elektrický proud prostřednictvím chemické reakce mezi vodíkem, kyslíkem a platinovým katalyzátorem. Samotné použití termínu palivový článek je pak často přisuzováno Ludwigu Mondovi a Charlesovi Langerovi. Ti sestrojili funkční palivové články, které využívaly vzduch a plyn ze spáleného uhlí [1][2][3].

Na jejich práci navázal i Francis Thomas Bacon, který se začal významněji zabývat samotnou konstrukcí palivových článků a v nich použitými materiály, aby v roce 1959 mohl demonstrovat 5 kW (6 kW [4]) palivový článek. Zhruba ve stejné

době i Harry Karl Ihrig zkonstruoval 15 kW palivový článek, který sloužil k pohonu traktoru [1][2][3].

V USA poté následovala užší spolupráce mezi průmyslem a Národním úřadem pro letectví a kosmonautiku (NASA). Spolupráce velkou měrou přispěla k vývoji této technologie. Konkrétně došlo k významnému rozvoji článků s polymerním elektrolytem (PEMFC) a s alkalickým elektrolytem (AFC), které byly využívány pro vesmírné programy. Ve stejnou dobu v tehdejší Sovětské svazu byl vývoj článků zaměřen zejména na vojenské využití a jejich implementaci do ponorek a následně i do vesmírných programů [1][2][3].

Počátkem sedmdesátých let docházelo k poměrně rychlému rozvoji světových velmocí. Rozvoj byl však zpomalen ropnou krizí, která nastala v roce 1973 a 1979. V té samé době již mezi jednotlivými zeměmi panovalo i určité povědomí o ochraně životního prostředí. Tyto a jiné skutečnosti pak vedly k dalšímu vývoji palivových článků, které se vyznačují relativně vysokou účinností přeměny energie a mají mírnější dopad na životní prostředí. V oblasti malých mobilních zdrojů byl vyvinut článek přímo na metanol (DMFC), který měl pomoci omezit produkci výfukových plynů a částečně řešit problematiku závislosti na ropě. Do palivových článků byly také vkládány naděje, že by mohly pracovat jako velké stacionární zdroje. S touto myšlenkou byly vyvinuty palivové články s elektrolytem ve formě kyseliny fosforečné (PAFC) či s roztavenými uhličitany (MCFC) [3].

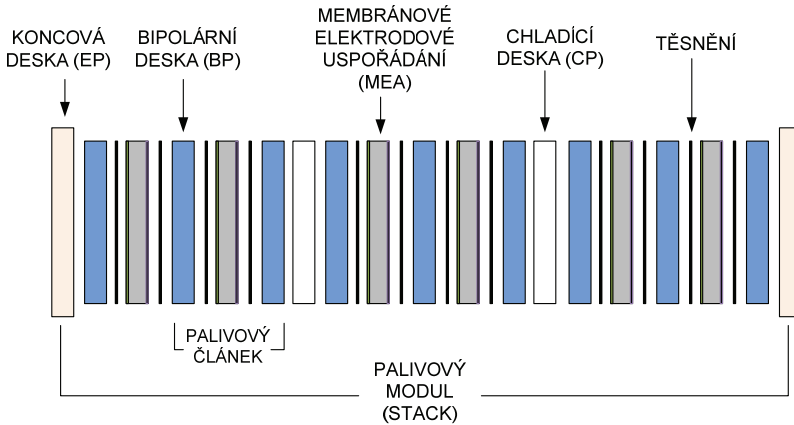
Za nejvýznamnější vývoj v osmdesátých letech lze považovat integraci palivových článků do amerických ponorek, kde články plnily funkci tichého zdroje energie pro pohon. Z hlediska energetiky jsou pak významné realizace několika velkých stacionárních zdrojů, které využívají palivové články typu PAFC, které se hodí pro kombinované výroby elektřiny a tepla. Realizované projekty však vycházely spíše jako ekonomicky nezajímavé [3].

Další vývoj se proto zaměřil na menší stacionární zdroje, které by sloužily například jako záložní zdroje a vycházely i ekonomicky přijatelněji. Tyto skutečnosti vedly v devadesátých letech k vytvoření systémů pracujících s palivovými články typu PEMFC a články s tuhými oxidy (SOFC). V tuto dobu byly tvořeny i první varianty s kogeneračními jednotkami, které měly být použity u rezidencí [3].

Z předešlého textu je zřejmé, že význam uplatnění palivových článků byl a je velmi proměnlivý. Dle nedávné minulosti by se dalo říci, že v poslední dekádě jsou palivové články opět na vzestupu. Do jisté míry tomu pomáhají jejich vhodné vlastnosti, které korespondují s aktuálními ekologickými požadavky souvisejícími s ochranou životního prostředí. Pomineme-li palivové články využívané v automobilovém průmyslu, roste význam hybridních systémů, kdy palivové články kooperují s jinými obnovitelnými zdroji elektrické energie. Obecně nejsou hybridní systémy schopny svým výkonem konkurovat konvenční výrobě elektřiny, mohou však představovat silný potenciál budoucí energetiky. Samotné hybridní systémy by se mohly více instalovat v odlehlých oblastech, na ostrovech nebo v některých rozvojových zemích. V těchto zemích by mohlo být někdy vhodnější využívat decentralizovaných zdrojů energie na místo výstavby konvenčních zdrojů a jejich infrastruktury [5]. Z historického přehledu a z aktuálního vývojového stavu palivových článků se zdá být zřejmé, že jejich role v energetice bude v blízké budoucnosti pouze ve formě doplňkových zdrojů energie.

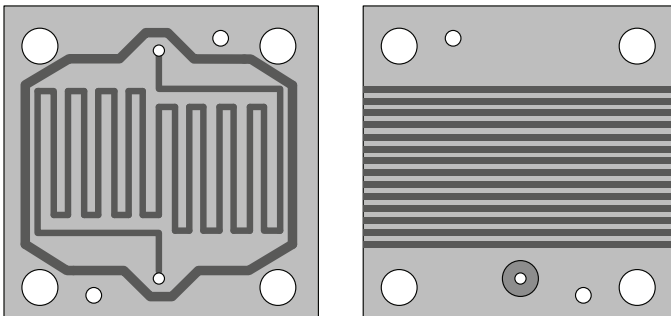
8.2. Základní princip a konstrukce palivového článku

Palivové články se řadí mezi elektrochemické zdroje energie. Díky elektrochemickým procesům v nich dochází k přímé přeměně chemické energie paliva na energii elektrickou, respektive na stejnosměrný elektrický proud. Obecná konstrukce článků je pro všechny typy podobná, jelikož vychází ze základního principu palivového článku. Princip funkce bude vysvětlen na palivovém článku typu PEMFC, který jako palivo využívá vodík H_2 a jako oxidant kyslík O_2 . Konstrukční schéma článku je uvedeno na následujícím obrázku [6][7][8].



Obr. 8.1: Řazení samostatných palivových článků do palivového modulu

Je vidět, že se jeden samostatný palivový článek skládá z plynových kanálů na bipolární desce (BP). Těmito kanály jsou palivo a oxidant (obecně plyny) přiváděny do palivového článku. Následující obrázek ukazuje možné (serpentinovité) řešení rozvodných kanálů u BP vyrobeného z grafitu, respektive z grafitových polymerů. Grafit se vyznačuje výbornou elektrickou vodivostí a dobrou odolností proti korozi. Negativní vlastností grafitu je jeho pórovitá struktura, přes kterou může docházet k únikům plynného paliva. Desky jsou proto tvořeny i další látkou, která má zajistit lepší neprůchodnost [6][7][8].



Obr. 8.2: Náhled na možné řešení bipolární desky BP

V článku jsou plyny rozváděny na elektrody, které se skládají z jímače volných elektronů (CC), respektive z difúzní vrstvy (GDL), která má zajistit rovnoměrnost

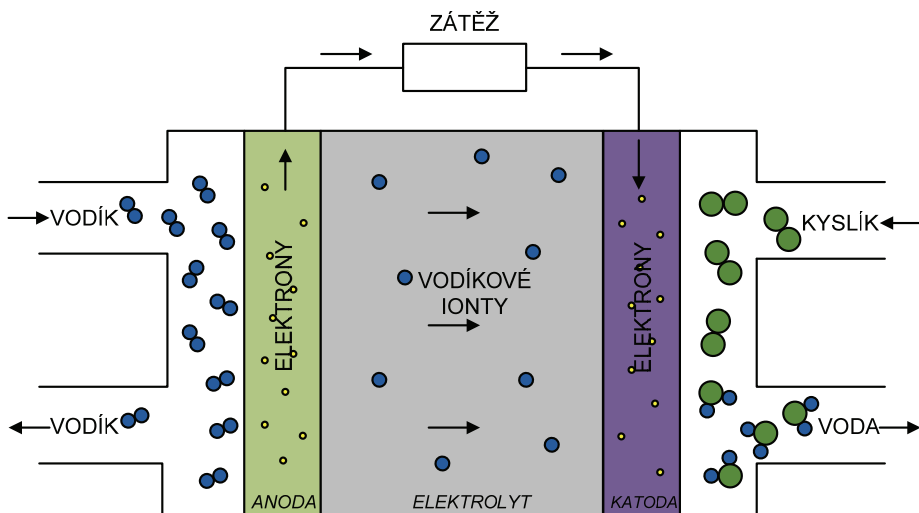
šíření plynů ke katalytické vrstvě či odvod produktů reakce od katalytické vrstvy. Vyrobena bývá z uhlíku C a teflonu (PTFE). Prostřednictvím elektrod je napájen vnější elektrický obvod připojený k zátěži [6][7][8].

Další vrstvou, která se u článků vyskytuje, je katalyzátorová vrstva. Tato vrstva v chemických reakcích plní katalytickou úlohu, to znamená, že se neúčastní reakcí, ale pouze reakce usnadňuje. Nejčastějšími katalyzátory jsou drahé kovy jako například platina Pt či palladium Pd.

Dále je článek složen z elektrolytu, který odděluje anodovou a katodovou část článku. V případě nízkoteplotního článku je elektrolyt tvořen polymerní elektrolytickou membránou (někdy též nazývaná jako iontoměničová membrána), která slouží jako přenašeč iontů a současně jako zábrana pro elektrony. Celý palivový modul (takzvaný Stack) se pak skládá ze samostatných článků zapojených do série. Mezi jednotlivé články bývají ještě vřazeny chladicí desky (CP), které umožňují proudění chladicího média. Na konci palivového modulu jsou koncové desky (EP), které plní funkci zejména mechanickou a drží jednotlivé články pohromadě [6][7][8].

Články typu PEMFC často využívají membránové elektrodové uspořádání (MEA). Obecně se dá říci, že se MEA skládá z polymerové iontoměničové membrány, na které jsou nalisované vrstvy katalytické a GDL s CC, což navzájem tvoří takzvanou plynovou difúzní elektrodu (GDE) [6][7].

Základní princip palivového článku je vysvětlen na následujícím obrázku, ve kterém jsou schematicky znázorněny i toky jednotlivých reaktantů a produktů reakcí.



Obr. 8.3: Základní princip palivového článku

Pomocí proudových kanálů jsou na elektrody přiváděny aktivní materiály (například vodík a kyslík), které jsou nezbytné pro správnou funkci palivového článku. Přiváděné palivo H_2 na anodě oxiduje za vzniku iontů vodíku H^+ a elektronů e^- . Elektrony jsou poté jímány elektrodou (anoda) a jsou přivedeny vnějším obvodem na druhou elektrodu (katoda). Ionty H^+ putují od elektrody (anody) elektrolytem

k druhé elektrodě (katodě). Na katodu je přiváděn kyslík O_2 , který reaguje společně s ionty H^+ a elektrony e^- za vzniku vody H_2O . Voda je pak z palivového článku odváděna. Tento velmi obecný a zjednodušený slovní popis lze vyjádřit i prostřednictvím následujících chemických reakcí (rovnice 8.1 – 8.3), ke kterým u článku PEMFC dochází. [9]

Reakce na anodě:



Reakce na katodě:

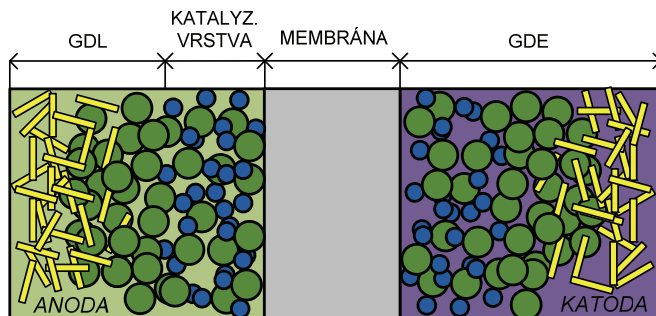


Souhrnná rovnice:



8.2.1 Požadavky na elektrody a katalyzátor

Jak bylo uvedeno výše, elektrody shromažďují elektrony e^- a nesou elektrický proud. Elektrody proto musí splňovat určitá kvalitativní kritéria. Musí mít dobrou vodivost (dobře vede proud), dobrou chemickou stabilitu vůči elektrolytu (nedochází ke korozi), dobré katalytické vlastnosti (usnadňuje reakce) a musí mít dobré mechanické vlastnosti (nejsou ovlivňovány vysokými teplotami). [7], [8]



Obr. 8.4: Detailní náhled na rozhraní elektrolyt, porézní elektroda, katalyzátor - modifikováno z [7]

Jedním z úkolů vysoké poréznosti elektrod je, aby palivo či oxidant mohl projít až k elektrolytu. Porézní elektroda má houbovitou strukturu a skládá se z drobných zrn vhodného kovu nebo uhlíku, na kterých je nanášena vrstva vhodného katalyzátoru (v případě PEMFC platina). Reakce potom probíhají na rozhraní elektroda (+katalyzátor), palivo (či oxidant) a elektrolyt, jak ukazuje následující obrázek [7][8].

Elektrody tak musí mít co možná největší účinnou plochu, na které může docházet k reakcím. Jednoduše řečeno, elektrická energie je generována tak dlouho,

dokud je do článku přiváděno palivo. Pojmem palivový článek bude dále v textu rozuměn celý palivový modul [7][8].

8.3. Základní klasifikace palivových článků

Stejně jak je tomu u jiných zařízení, i palivové články se dělí podle svých specifických provozních parametrů, které jsou přímo závislé na samotné konstrukci článků či souvisejí s elektrochemickými ději, které v nich probíhají. Za základní rozdělení palivových článků je možné považovat například dělení podle použitého elektrolytu, způsobu provozování, podle tlaku, výkonu, provozní teploty nebo použitého paliva.

8.3.1 Rozdělení podle použitého elektrolytu

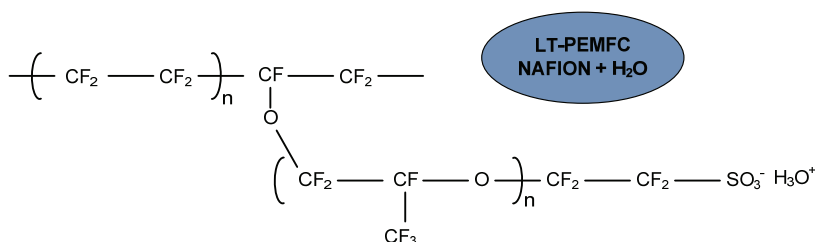
Rozdělení palivových článků podle elektrolytu svým způsobem přímo představuje základní typy jednotlivých palivových článků.

PEMFC

Články byly z počátku využívány ve vesmírných programech NASA. V současnosti je jejich vývoj zaměřen na aplikace v řádech jednotek kW. Samotný článek je klasifikován jako nízkoteplotní.

Obecně se jedná o palivový článek, který jako elektrolyt využívá pevnou polymerní iontoměničovou membránu. Samotný článek může pracovat s různými provozními teplotami. Rozsah provozních teplot článku může být až do 200°C.

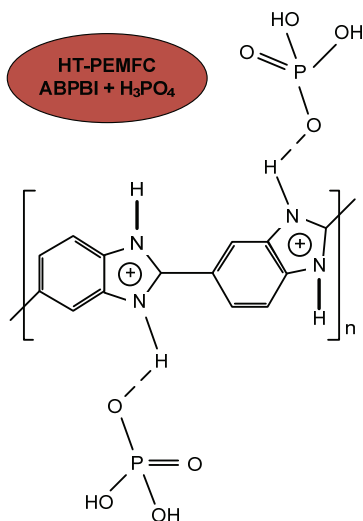
Palivové články, které dosahují provozních teplot do 100°C, se označují jako LT-PEMFC. Tyto články jsou založeny na vodní bázi a využívají membránu, která je tvořena sulfovanými fluoropolymerem (například Nafion). Při provozu musí být membrána hydratována, aby byla zajištěna její vodivost. Články se vyznačují vysokou proudovou hustotou, vysokým měrným výkonem vztaženým na jednotku objemu palivového článku, dobrou regulovatelností výkonu a možností uskutečnit studený start. Na druhou stranu potřebují pro svůj provoz velmi čisté palivo a díky nízkým provozním teplotám nejsou vhodné pro spojení s kogenerační jednotkou [10][11].



Obr. 8.5: Náhled na molekulu membrány (typ Nafion) u LT-PEMFC - modifikováno z [11]

Zmíněný problém však částečně řeší druhý typ tohoto článku, který je založen na bázi minerálních kyselin. Membrány jsou například složeny z benzimidazolových heterocyklických sloučenin. Tyto články jsou označovány jako HT-PEMFC a

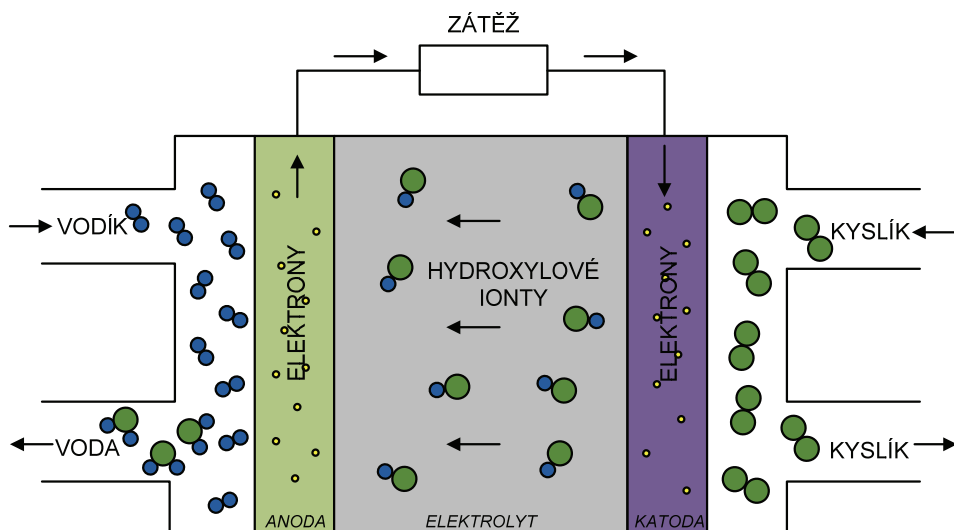
dosahují provozních teplot až 200°C. Článek je tak vhodnější pro spolupráci s kogenerační jednotkou malých výkonů. U tohoto typu je však dosaženo nižší proudové hustoty, horší regulovatelnosti výkonu a nelze provést studený start [10][11].



Obr. 8.6: Náhled na molekulu poly(2,5-Benzimidazol) membrány s označením ABPBI u HT-PEMFC - modifikováno z [11]

AFC

Články AFC používají jako elektrolyt hydroxid draselný KOH. Tyto články jsou výhradně využívány ve vesmírných programech, kde se využívá schopnosti palivového článku vyrobit elektrickou energii a vodu. Tento typ článku se vyznačuje vysokou, až 70%, účinností přeměny na elektrickou energii [9][10].



Obr. 8.7: Základní schéma palivového článku typu AFC

Následující chemické rovnice (8.4 – 8.6) popisující procesy, které probíhají na jednotlivých elektrodách [9].

Reakce na anodě:



Reakce na katodě:



Souhrnná rovnice:



Použití alkalického elektrolytu s sebou přináší jednu nevýhodu v podobě nepříznivých chemických reakcí, kdy KOH reaguje s oxidem uhličitým CO_2 za vzniku uhličitanu draselného K_2CO_3 . Tyto nežádoucí děje vedou k degradaci vlastností elektrolytu a dochází také k postupnému zanášení póru elektrod. Hovoří se pak o otravě oxidem uhličitým. Zmíněné procesy lze eliminovat použitím čistého okysličovačla ve formě kyslíku O_2 , poněvadž vzduch již CO_2 obsahuje [9].

Jako katalyzátorů se používá drahé platiny nebo cenově přijatelnějšího niklu či stříbra. To přímo souvisí s nízkými provozními teplotami, které se pohybují přibližně kolem $70^\circ C$. Nevýhodou těchto článků je pak požadavek na čisté palivo a poměrně vysoké výrobní náklady. Články nacházejí uplatnění zejména ve státních výzkumech zaměřených na vesmírné projekty či vojenské účely [9][10].

PAFC

Jedná se o palivové články, kde je elektrolyt tvořen kyselinou fosforečnou H_3PO_4 . Principiální schéma palivového článku typu PAFC je shodné se schématem

u typu PEMFC. Zmíněná koncepce je jedním z vhodných kandidátů pro realizaci středních stacionárních zdrojů energie (stovky kW). Díky své nízké provozní teplotě se i tyto články řadí mezi nízkoteplotní palivové články [9][10].

Následující chemické rovnice popisují procesy, které probíhají na jednotlivých elektrodách

Reakce na anodě:



Reakce na katodě:



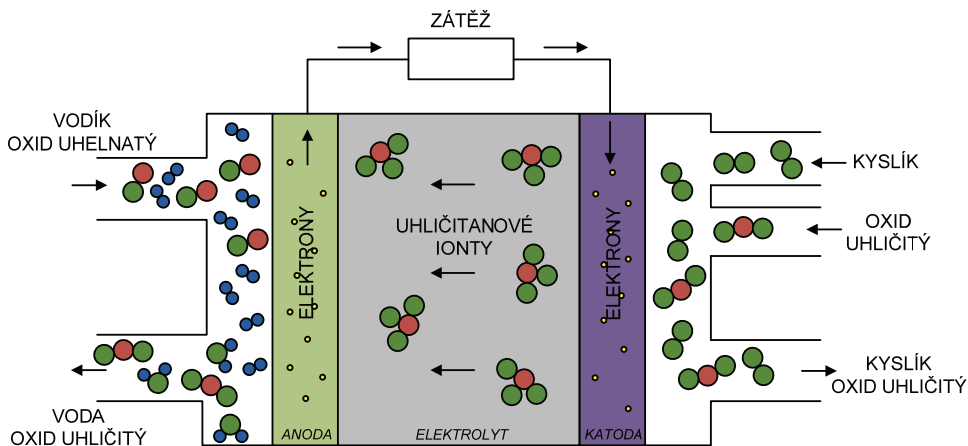
Souhrnná rovnice:



U tohoto typu článku jsou kladeny zvýšené požadavky na jeho konstrukci, respektive na použité materiály, protože koncentrace použité kyseliny fosforečné může dosahovat až 100%. Mezi výhody článku patří vyšší odolnost proti působení oxidu uhličitého, podobně jako tomu bylo u PEMFC na bázi minerálních kyselin. Na základě této vlastnosti nemusí být použito čistého paliva a napájení může být řešeno prostřednictvím reformace fosilních paliv. Provozní teploty se pohybují kolem 200°C a články jsou tak vhodné i pro výrobu tepla a pro instalaci s kogeneračními jednotkami. Spojení kombinované výroby energie je v tomto případě na místě, poněvadž se články vyznačují nižší účinností výroby elektrické energie oproti ostatním typům. Díky kombinované výrobě se však účinnost pohybuje i více než přes 80%. Konkrétní uplatnění je pak ve větších budovách, kde je potřeba i pokud možno kontinuální odběr vzniklého tepla. Jedná se tak o hotely, nemocnice či pracovní haly a další [9][10].

MCFC

Jako elektrolyt u těchto článků se využívá roztavených karbidů lithia a draslíku. Jde o prvního zástupce vysokoteplotních článků, kde vysoká teplota zajišťuje potřebné vlastnosti elektrolytu pro správnou funkci článku. V praxi se instaluje výhradně jako stacionární zdroj s výkonem v řádu MW. Při výrobě elektrické energie dosahují články účinnosti až 60%. U kombinované výroby elektřiny a tepla je účinnost ještě vyšší [9][10].



Obr. 8.8: Základní schéma palivového článku typu MCFC

Následující chemické rovnice popisují procesy, které probíhají na jednotlivých elektrodách [9].

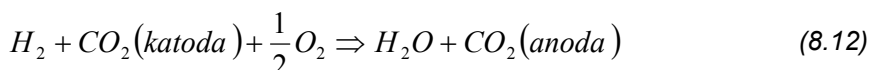
Reakce na anodě:



Reakce na katodě:



Souhrnná rovnice:

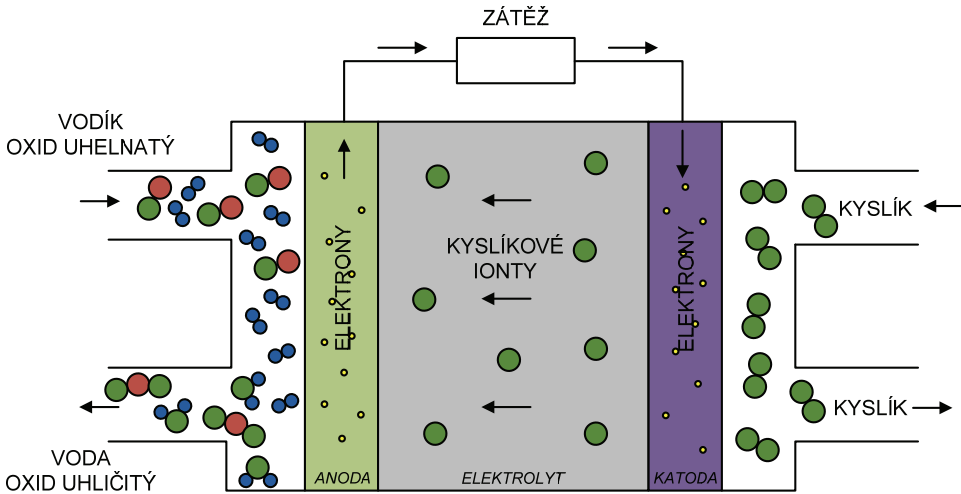


Běžná provozní teplota bývá kolem 650°C. Zmíněná vysoká teplota přisuzuje tomuto typu článků řadu výhod, zejména zlepšení reakční kinetiky. Není proto nutné hledat katalyzátor z ušlechtilých kovů. Stejně tak není nezbytně nutné využívat čisté palivo, jelikož je článek poměrně imunní vůči otravě oxidem uhličitým a vysoké teploty umožňují přímé vnitřní reformování, kdy se vodík sám separuje z CH₄ přímo na elektrodě článku, tj. rovnice reformování probíhají přímo v palivovém článku. Potom lze například využít přímo jako palivo i zemní či uhelný plyn. Na druhou stranu potřeba dosáhnout vysokých provozních teplot znemožňuje rozběh za studena a zhoršuje také rychlost výkonové regulovatelnosti článku. To je dáno faktem, že v článku musí kromě chemických reakcí probíhat ještě reakce reformování. Vysoká teplota taky zcela jistě negativně působí na použité materiály, kdy dochází k jejich rychlejší korozi a degradaci. Výčet výhod a nevýhod jednoznačně

napovídá, že jsou tyto články vhodné pro velké stacionární zdroje, které by mohly fungovat kontinuálně bez větší potřeby na změnu výkonu [9][10].

SOFC

SOFC představuje další vysokoteplotní palivový článek, kde je elektrolyt v podobě tuhého keramického materiálu (konkrétně Zr_2O dopovaný Y). Tento typ článku nachází uplatnění také díky skutečnosti, že byl od počátku vyvíjen ve dvou, respektive třech konstrukčních variantách (jako planární, koplanární a tubulární). Proto také existují malé systémy (nabíječky, jednotky W), rezidenční systémy s kogenerační jednotkou (desítky kW) nebo i velké stacionární zdroje (jednotky MW). Účinnost palivového článku je obdobná jako u předešlého vysokoteplotního typu MCFC [9][10].



Obr. 8.9: Základní schéma palivového článku typu SOFC

Následující chemické rovnice popisují procesy, které probíhají na jednotlivých elektrodách při uvažování čistého vodíku [9].

Reakce na anodě:



Reakce na katodě:



Souhrnná rovnice:



Využití elektrolytu v pevném skupenství usnadňuje návrh a konstrukci samotného palivového článku. Při konstrukci je však nutno respektovat potřebu použití

vhodných materiálů. Materiál by měl mít stálé pevnostní vlastnosti i během vysokých teplot. Dále by měl být dobrým teplotním izolantem, aby nedocházelo k tepelným ztrátám. Systémy o velkých výkonech tak mohou díky těmto požadavkům dosahovat nemalých rozměrů. Na druhou stranu díky vysokým provozním teplotám (vnitřní reformování) mohou být použita různá uhlovodíková paliva. Oproti MCFC jsou tyto palivové články odolnější i vůči malému množství síry, které se vyskytuje v použitém palivu (například zemní plyn, uhelný plyn). Provozní teploty se pohybují v rozmezí od 800°C do 1000°C, články jsou proto vhodnější pro provoz, který nevyžaduje rychlé a velké změny generovaného výkonu [9][10].

DMFC

Jde o nízkoteplotní palivový článek s běžným rozsahem pracovní teploty v rozmezí od 60°C do 120°C. Elektrolytem je membrána ze syntetického materiálu a jako katalyzátor elektrody využívají zejména ruthenium. Tento typ článku využívá jako palivo přímo plynný či kapalný metanol. Není tedy potřeba reformace vodíku. Metanol je navíc oproti vodíku podstatně levnější, lépe se transportuje a skladuje. Hlavní použití článků je však zaměřeno zejména na mobilní systémy, například u vysokozdvížných vozíků odpadá doba čekání na nabití baterií, protože se metanol během chvíle dotankuje [9][10].

8.3.2 Rozdělení podle využití palivových článků

Z předešlého textu je zřejmé, že díky rozmanitosti vlastností jednotlivých druhů palivových článků, bude mít i každý druh své specifické využití. To znamená, že například pro mobilní zdroj energie nebude použito palivového článku, který dosahuje vysokých provozních teplot a vyznačuje se nízkou dynamikou změny výkonu. Takový provoz článku by byl neefektivní a neekonomický. Od mobilních zdrojů se očekává, že budou umožňovat studený start a budou dobře reagovat na změny spotřeby elektrické energie. V praxi lze proto obecně rozdělit články do čtyř kategorií – přenosné, mobilní, speciální a stacionární. Z pohledu elektroenergetiky pak mají největší význam zdroje stacionární.

Přenosné zdroje

Jako přenosné zdroje můžeme definovat palivové články pro nejrůznější přístrojové aplikace. Tyto palivové články bývají konstruovány výhradně jako nízkoteplotní typy. Nejčastěji jde pak o články PEMFC a DMFC. Výkon článků je ekvivalentní k druhu napájené aplikace, tj. jednotky až desítky wattů. Konkrétní použití je pak pro napájení počítačů, digitální techniky nebo mohou být využity jako záložní zdroj energie (pro přenosné vysílače či jako samostatná elektrocentrála) [12].

Mobilní zdroje

Nejvýznamnější využití těchto palivových článků je v automobilovém průmyslu nebo jako pomocných energetických jednotek v průmyslu nebo v armádě. Výkonově mohou dosahovat i několik desítek kW. Nejčastější typ je PEMFC (palivo pak plynný či zkapalněný vodík) [12].

Speciální zdroje

Do této kategorie se řadí zejména AFC, respektive palivové články, které jsou využívány ve vesmírných programech a jsou vystaveny specifickým podmínkám [12].

Stacionární zdroje

Stacionární zdroje využívají vesměs všechny druhy palivových článků vyjma alkalických a metanolových. Výkonový rozsah je až stovky kW na jeden článek. Články pak tvoří celek o výkonech i několika MW. Hlavním palivem bývá zpravidla zemní plyn, který je reformovaný na využitelný vodík. Systémy o výkonu několika kW jsou koncipovány jako zdroj energie pro zajištění dodávek elektřiny a tepla do komplexních systémů (rodinné domy) či jako záložní zdroje využívající odpadní teplo vznikající provozem článku. V kombinaci s kogenerační jednotkou jsou poměrně často nasazovány v Japonsku a v Jižní Koreji. Výkonově významnější systémy (až stovky kW) jsou využity pro větší celky (velké budovy, nemocnice, skládky, čistíčky). U stacionárních zdrojů bývá využito palivových článků typu SOFC, MCFC, PEMFC a PAFC. Jejich význam jako primárních zdrojů energie roste v oblastech, kde je nízká infrastruktura distribučních služeb [12].

8.3.3 Další možnosti rozdělení palivových článků

Kromě již uvedeného členění palivových článků lze ještě provést rozdělení na základě provozních teplot pracujícího článku. Články jsou pak považovány za nízkoteplotní, nepřesáhne-li jejich teplota hodnotu 200°C. Za středněteplotní články jsou považovány ty, u kterých je provozní teplota v rozmezí od 200°C do 600°C. U teplot nad 600°C se pak hovoří o vysokoteplotních palivových člancích [8].

Palivové články lze samozřejmě rozdělit i podle paliva, které je použito pro jejich správnou funkci. Jedná se pak o články na palivo vodíkové, hydrazinové, uhlovodíkové, alkoholové, biochemické, na zemní plyn, uhelný plyn, amoniakové, biochemické a další.

Obdobné rozdělení je možné provést i na základě provozních tlaků. Jedná se o palivové články nízkotlaké (do 0,5 MPa), středotlaké (od 0,5 MPa do 1 MPa) a vysokotlaké (nad 1 MPa) [8].

8.4. Základní charakteristiky palivového článku

Základní charakteristické veličiny či elektrické vlastnosti palivového článku budou demonstrovány opět na článku typu PEMFC. V současnosti bývá využíván ve spojení s kogeneračními jednotkami a je tak v popředí zájmů výzkumníků a odborné veřejnosti obecně.

8.4.1 Základní vztahy a charakteristiky

Teorie palivového článku vychází z předpokladu, že množství energie, které je možné přeměnit na užitečnou elektrickou práci, je dáno Gibbsovou volnou energií. Tu lze vyjádřit jako

$$G = H - T \cdot S \quad (8.16)$$

kde

G Gibbsova volná energie ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ či $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)

H reakční entalpie ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ či $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)

T termodynamická teplota (K)

S entropie ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ či $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

Gibbsova volná energie není konstantní a mění se s teplotou a se stavem jednotlivých látek účastnících se reakcí. Je proto nutné respektovat změnu termodynamických podmínek a zohlednit stavové veličiny plynů (tlak, koncentrace). Obecně, lze na Gibbsovu energii pohlížet jako na stavovou termodynamickou veličinu, která charakterizuje schopnost látek vstupovat do chemických reakcí. Vyjadřuje tak skutečnost, že během reakcí dochází k tepelné výměně [13].

Změnu Gibbsovy volné energie lze vyjádřit následujícím vztahem

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (8.17)$$

kde

ΔG změna Gibbsovy volné energie chemické reakce ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ či $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)

ΔH změna entalpie ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ či $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)

ΔS změna entropie ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ či $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

Tuto změnu je možné chápat jako rozdíl Gibbsovy volné energie produktů reakce a reaktantů, jak ukazuje následující rovnice

$$\Delta G = (H_p - H_r) - T \cdot (S_p - S_r) \quad (8.18)$$

kde

H_p entalpie produktů ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ či $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)

H_r entalpie reaktantů ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ či $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)

S_p entropie produktů ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ či $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

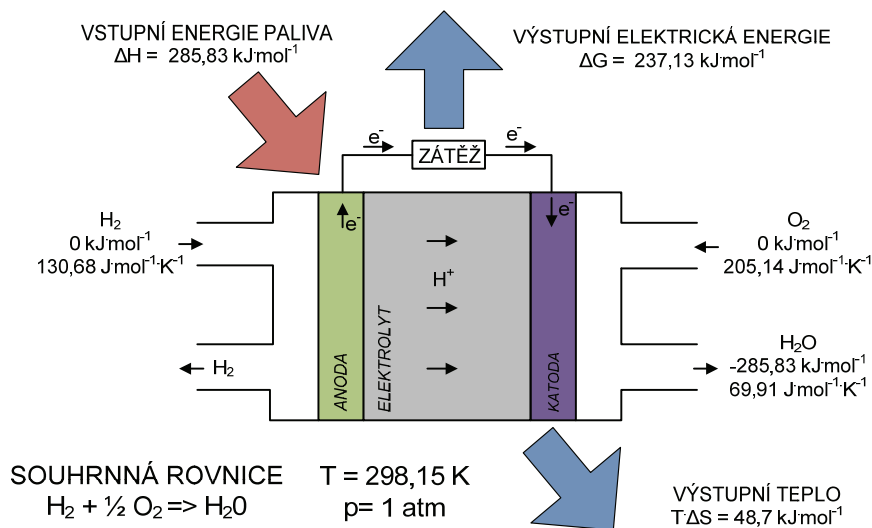
S_r entropie reaktantů ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ či $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

V případě PEMFC je produktem voda a reaktanty jsou reprezentovány vodíkem a kyslíkem, jak je uvedeno v souhrnné chemické rovnici výše. Energie je v palivovém článku získávána kombinací atomů a také snížením objemů plynů. Z termodynamických tabulek lze zjistit následující hodnoty entalpií a entropií látek účastnících se reakce [14].

Počet molů dané látky		1 H ₂	0,5 O ₂	1 H ₂ O (l)
Entalpie	($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	0	0	-285,83
Entropie	($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	130,68	102,57	69,91

Tab. 8.1: Hodnoty entalpií a entropií reaktantů a produktů pro daný počet molů při atmosférickém tlaku a teplotě 25 °C (298,15 K)

Z výše uvedených tabulkových hodnot je již jednoduché stanovit změnu entalpie $-285,83 \text{ kJ mol}^{-1}$, entropie $-163,34 \cdot 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, respektive změnu Gibbsovy volné energie $-237,13 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Jejich význam je naznačen v následujícím obrázku.



Obr. 8.10. Toky energií u ideálního palivového článku PEMFC – modifikováno z [14]

Ideální elektrická účinnost palivového článku je přibližně 83%. Často bývá označována jako poměr změny Gibbsovy volné energie a energie, která je uchována v palivu (změna entalpie) [14].

$$\eta_{ideal} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \cdot 100 \quad (8.19)$$

kde

η_{ideal} ideální účinnost palivového článku (%)

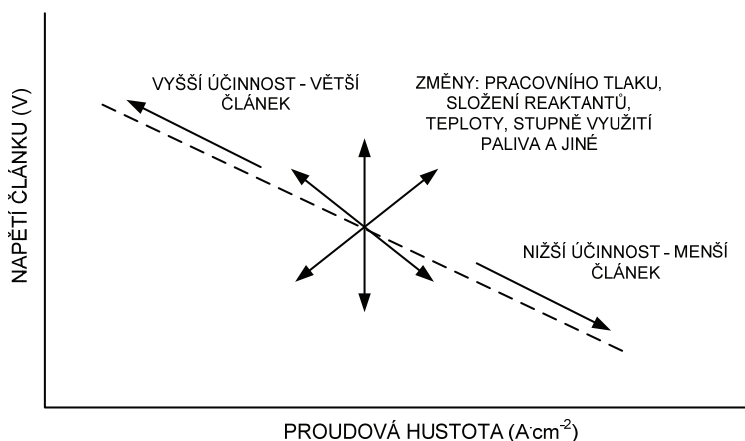
Napětí, které lze teoreticky dosáhnout na kontaktech palivového článku z jednoho molu vodíku je přibližně 1,229 V a bylo stanoveno pomocí následujícího vztahu

$$U_{ideal} = \frac{\Delta G}{n \cdot F} \quad (8.20)$$

kde

U_{ideal} ideální napětí na kontaktech palivového článku (V)

Vypočtená účinnost a napětí palivového článku je stanovena při ideálních podmínkách, tj. při konstantní teplotě a tlaku. Při reálném provozu palivového článku však teplota, tlak či koncentrace reakčních plynů nejsou konstantní, což má přímý vliv na napětí a účinnost. Je tedy důležité vědět, jakých parametrů lze dosáhnout při různých teplotách, tlacích či koncentracích plynů.



Obr. 8.11: Závislosti změn jednotlivých provozních veličin palivového článku na jeho napětí – modifikováno z [15]

Reálná účinnost palivového článku lze stanovit dle následujícího vztahu

$$\eta = \eta_{ideal} \cdot \frac{U}{U_{ideal}} \quad (8.21)$$

kde

η skutečná účinnost palivového článku (%)

U skutečné napětí palivového článku (V)

Napětí naprázdno palivového článku, lze vyjádřit pomocí Nernstovy rovnice. Ta vyjadřuje napětí naprázdno jako funkci parciálních tlaků jednotlivých reaktantů a teploty, respektive vyjadřuje závislost hodnoty potenciálu článku na složení reaktantů, které se účastní reakcí. Nernstovu rovnici je možné vyjádřit následujícím vztahem [16]

$$E_{Nernst} = N_0 \cdot \left[E_0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \ln \left(\frac{p_{H_2} \cdot \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right) \right] \quad (8.22)$$

kde

E_{Nernst} Nernstovo napětí (V)

N_0 počet článků v sérii (-)

E_0 standardní referenční napětí při standardních podmínkách (V)

Rje plynová konstanta ($J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$)

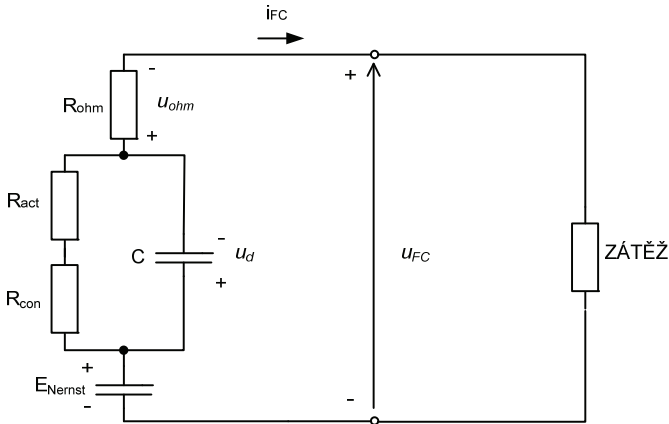
p_{H_2} parciální tlak vodíku (atm)

p_{O_2} parciální tlak kyslíku (atm)

F Faradayova konstanta ($C \cdot mol^{-1}$)

p_{H_2O} parciální tlak H_2O (atm)

Předešlá rovnice vyjadřuje změnu napětí, ovšem pro konstantní hodnoty teploty a parciálních tlaků [17]. Dynamika palivového článku je ovlivněna procesy, které se vyskytují na rozhraní mezi elektrodou a membránou. Zejména pak procesy u katody, kde se vyskytuje vysoký přenosový náboj [16]. Následující obrázek ukazuje náhradní elektrický obvod, kterým je možné vyjádřit dynamiku palivového článku [18].



Obr. 8.12: Ekvivalentní elektrický obvod charakterizující dynamiku palivového článku – modifikováno z [18]

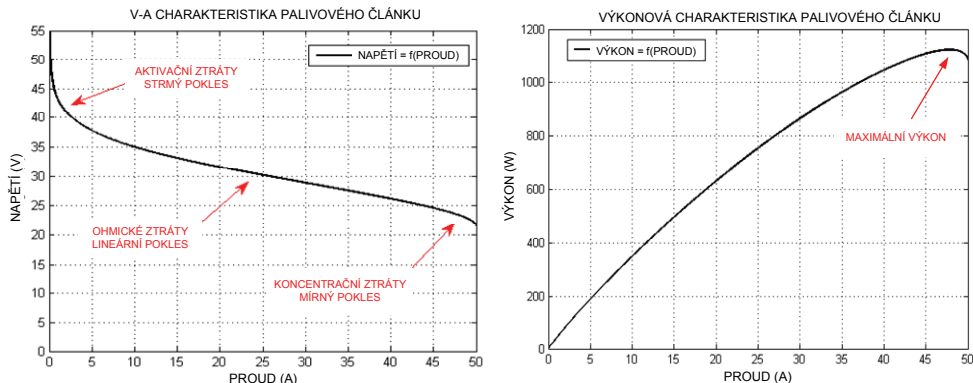
Významnost dynamického děje je závislá na velikosti dynamického napětí ekvivalentní kapacity obvodu C , respektive na velikosti časové konstanty obvodu [18].

Vliv teploty a parciálních tlaků má přímý vliv na výstupní napětí palivového článku. Při zvýšení jeho provozní teploty dochází při stejné proudové hustotě k nárůstu napětí. Lze říci, že i zvýšením provozního tlaku dochází k nárůstu parciálních tlaků jednotlivých reaktantů, což souvisí se zvýšením přenosu hmoty [15].

Parciální tlak reaktantů souvisí i se změnou jejich koncentrace a složení. Bude-li se uvažovat konstantní proudová hustota, tak při vyšším provozním tlaku bude dosaženo vyššího napětí. Při dynamickém modelování palivových článků bývají často parciální tlaky vyjádřeny jako funkce molárních toků. Tento způsob však bývá spíše aplikován u vyjádření dynamického chování vysokoteplotních palivových článků SOFC či MCFC [15][19][20][21].

V-A a výkonovou charakteristiku PEMFC palivového článku s malým výkonem lze vidět na následujícím obrázku. Napětí vyjádřené předešlou rovnicí je ve sku-

tečnosti redukováno ztrátami. Nejvýznamněji se uplatňují ztráty aktivační, ohmické a koncentrační a jsou v obrázku také naznačeny.

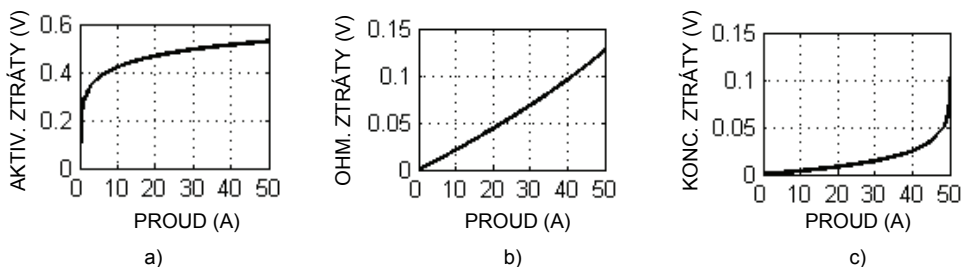


Obr. 8.13: Závislost napětí a výkonu palivového článku na jeho elektrickém proudu

8.4.2 Ztráty

Zmíněné charakteristiky jsou ovlivňovány chemickými a fyzikálními zákonitostmi, které se projevují ve formě ztrát. Ztráty se od sebe tedy liší svojí povahou. Díky odlišné povaze mají ztráty i odlišné průběhy. Průběhy jednotlivých ztrát lze vidět na následujícím obrázku 8.14.

Aktivační ztráty mají logaritmický průběh a významně ovlivní napětí palivového článku pro nízké elektrické proudy. Ztráty souvisí se změnou koncentrace u povrchu elektrody vlivem oxidace, tím dochází ke změně elektrodového potenciálu, čímž je následně narušena rovnováha mezi chemickými a elektrickými silami působícími na volné náboje. Aktivační ztráty lze stanovit dle vztahu 8.23.



Obr. 8.14: a) Aktivační ztráty vs. proud palivového článku, b) Ohmické ztráty vs. proud palivového článku, c) Koncentrační ztráty vs. proud palivového článku

$$U_{act} = \frac{R \cdot T}{\alpha \cdot n \cdot F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (8.23)$$

kde

U_{act} aktivační ztráty napětí (V)

i proud palivového článku (A)

α koeficient prostupu náboje (-)

n počet elektronů na reagující iont či molekulu (-)

i_0 výměnný proud (A)

Pro středně velké proudy (z provozního rozsahu článku) se uplatňuje lineární pokles způsobený ohmickými ztrátami, které jsou závislé na teplotě článku či obsahu vody ve článku. Ohmické ztráty lze stanovit dle vztahu [16]

$$U_{ohm} = R_{fc} \cdot i \quad (8.24)$$

kde

U_{ohm} ohmické ztráty napětí (V)

R_{fc} odpor membrány a kontaktů (Ω)

Pro velké proudy, respektive velké proudové hustoty, jsou charakteristické exponenciálně se uplatňující koncentrační ztráty. Koncentrační ztráty klesají s rostoucí teplotou a tlakem. Tyto ztráty způsobují omezení maximální proudové zatížitelnosti článku, jelikož přímo souvisí s dosažením určité kritické hodnoty přenosu hmoty. Koncentrační ztráty lze stanovit dle vztahu [16]

$$U_{con} = -\frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (8.25)$$

kde

U_{con} koncentrační ztráty napětí (V)

i_L limitní proud (A)

Limitní proud představuje maximální reakční transport reaktantů k povrchu elektrody, kde jsou všechny reaktanty okamžitě spotřebovány.

8.5. Využití palivových článků v průmyslových aplikacích

V této části textu bude prezentován aktuální stav v praxi využívaných systémů s palivovými články. Konkrétně zde budou představeny nově instalované systémy nebo systémy, které se budou v blízké budoucnosti realizovat a patří mezi do budoucna perspektivní koncepce. Lze předpokládat, že z pohledu energetiky budou narážet největší uplatnění koncepce s články typu PEMFC, MCFC, SOFC a případně i PAFC.

8.5.1 PEMFC

Palivové články bývají uplatňovány především jako záložní zdroje elektrické energie nebo bývají kombinovány s malými kogeneračními jednotkami například u hotelů či bazénů, kde je zaručen celoroční odběr tepla. Existují a připravují se i projekty, kde jsou články využity přímo jako primární zdroj elektrické energie.

Belgie 1 MW

V Belgii hodlá firma Solvay investovat více než 5 mil. euro na výstavbu 1 MW systému využívajícího palivové články typu PEMFC firmy Nedstack. Elektrárna by se skládala z 12 samostatných jednotek, každá o výkonu 84 kW. Každá jednotka se bude skládat ze 14 palivových modulů (takzvaných stacků). Projekt by měl posloužit i k výzkumným účelům, které by se měly zaměřit na zkoumání zdokonalení dynamiky výkonově velkých elektráren a měly by se zabývat možnostmi jak prodloužit životnosti palivových článků (životnost je odhadována na 15.000 hodin). Pro zajištění dynamiky elektrárny budou využity čtyři jednotky, které zároveň poslouží i k zmíněnému výzkumu. Pokud by se stavba opravdu realizovala, zařadila by se elektrárna k výkonově největším elektrárnám, využívajícím polymerní membránu. V nedaleké blízkosti stavby elektrárny se vyskytuje chemický závod, který při provozu produkuje odpadní vodík. Vodík se použije jako palivo pro elektrárnu. Touto výstavbou má být demonstrována ekonomická výhodnost projektu [22][23][24].

USA 1 MW

Společnost Ballard realizovala nebo bude realizovat několik elektráren s výkonem 1 MW. Projekt má označení CLEARgen™ a představuje modulární (jednotky po 500 kW) řešení s protonovou membránou. Elektrická účinnost se pohybuje kolem 50%. Elektrárna je provozována jako špičkový zdroj energie nebo může pracovat jako nepřetržitý zdroj energie. Elektrárna může sloužit ke generování elektřiny, ale i tepla (teplený výkon 1100 kW). Jednou z nespočetných výhod tohoto 1MW modulárního uspořádání je jeho rozměr (2,9 x 2,4 x 13,7 metrů). Palivo může být použito z reformovaného obnovitelného bioplynu produkovaného skládkami komunálního odpadu nebo může být využit vodík, který vzniká jako vedlejší produkt při chemické výrobě [25].

Německo 50 kW

V současné době v Německu vznikají nové projekty, které se zaměřují na čtenější využití vodíkových technologií. Jedná se o přímou reakci na havárii jaderné elektrárny v Japonsku, která přispěla k rozhodnutí, že Německo v blízké budoucnosti omezí provoz svých jaderných elektráren. Nutno však podotknout, že se nové projekty nemohou výkonově srovnávat s výkony jaderných elektráren. Projekty spíše dokreslují fakt, že na tyto technologie bude v blízké budoucnosti pohlíženo jako na doplňkové zdroje energie [26].

Uvažuje se o využití poměrně silné základny větrných elektráren pro výrobu vodíku v elektrolyzérech. Vodík by pak sloužil jako palivo pro články typu PEMFC. Projekt by měl být realizován ve městě Herten. Dle navrhované koncepce bude využito modulárního řešení jednotlivých subsystemů, tj. elektrolyzáru typu HySTAT™30 a palivového článku typu HyPM™ s elektrickým výkonem 50 kW.

Hlavním smyslem projektu je vytvořit zdroj, který by částečně řešil nestabilitu do-
dávky výkonu z větrných a fotovoltaických elektráren [26].

Velká Británie 10 kW

Začátkem roku 2011 byl zprovozněn hybridní systém využívající 10 kW pali-
vový článek typu PEMFC. Palivový článek slouží k výrobě jak elektrické, tak i tep-
lené energie, které je využito pro ohřev užitkové vody. Hybridní systém slouží
k napájení rezidence a je provozován jako grid-on. Skládá se z větrného zdroje
750 kW, elektrolyzáru 30 kW, zásobníků vodíku a geotermálního zdroje energie
[27].

8.5.2 MCFC

Vlastnosti těchto palivových článků předurčují jejich využití jako kombinova-
ného zdroje elektřiny a tepla pro nemocnice, univerzity, čistírny či výrobní podniky.
Tyto systémy pak dosahují velmi dobrých celkových účinností, které se mohou
pohybovat i mezi 80% až 90%.

Jižní Korea 11,2 MW, 5,6 MW a 70 MW

V současnosti výkonově největší stacionární elektrárna s palivovými články je
v Daegu City v Jižní Koreji. Využívá čtyř jednotek o výkonu 2,8 MW. Celkový výkon
elektrárny je úctyhodných 11,2 MW s elektrickou účinností kolem 47%. V tomto
projektu je použito palivových článků typu MCFC, respektive článků využívající
vnitřní reformování vodíku (DFC). Elektrárna v současnosti zaujímá plochu kolem
4 tis. m², což je přibližně 55-krát méně, než by zabírala fotovoltaická elektrárna
o stejném instalovaném výkonu [28].

V Jižní Koreji bylo navíc podepsáno memorandum s plány na vybudování
elektrárny ve městě Hwasung s výkonem kolem 60 MW. Elektrárna by měla být
dokončená v roce 2013 a měla by napájet přibližně 130 tis. domácností. Počítá se
s tím, že elektrárna výkonově pokryje 70% spotřeby domácností ve městě [29].

Do konce roku 2011 by také měla být v provozu elektrárna ve městě Busan.
Elektrárna bude mít výkon 5,6 MW [30].

USA 1,4 MW

Palivové články využije i jedna z Kalifornských firem, zabývající se chovem
dřevě. Bude zde instalována jednotka s označením DFC 1500 o elektrickém
výkonu 1,4 MW. Jako palivo se využije bioplyn. Odpad, který vzniká při provozu
dřevěžárny, bude nyní využíván v anaerobních nádržích. Zde bude díky vyhníva-
cím procesům vytvářen metan a ten bude sloužit jako palivo pro palivové články.
Teplota generovaná palivovými články bude navíc vedena zpátky do anaerobních
nádržích a urychlí vyhnívací procesy, tj. vznik metanu [31].

8.5.3 SOFC

Aktuální nasazování těchto zdrojů ve světě ukazuje, že hlavní úlohu ve vel-
kých stacionárních zdrojích budou mít články typu MCFC. Existuje několik projektů
na vybudování výkonově velké elektrárny typu SOFC. To, jestli budou tyto projekty

skutečně realizovány, ukáže až čas. V současnosti jsou jednotky instalovány výhradně jako modulární jednotky s výkonem od jednotek kW až stovek kW.

Nizozemí 100 x 1,5 kW

V Nizozemí získala firma CFCL zakázku na dodání 100 kusů kombinovaných systémů výroby elektřiny a tepla (pouze ohřev teplé vody). Tamním distributorem budou jednotky použity pro instalaci u rezidenčních či komerčních systémů. Jednotka pracuje na zemní plyn a její součástí je palivový článek typu SOFC. Výrobce uvádí, že při maximální účinnosti jednotka dodává konstantní výkon 1,5 kW, což představuje přibližně 13000 kWh nízkoemisní elektrické energie za rok. Kombinovanou výrobou lze dosáhnout účinností kolem 85%. Označení jednotky je Bleu-Gen, respektive Gennex a představuje první palivový článek akreditovaný britskou MCS (Microgeneration Certification Scheme) [32][33].

USA 1,2 MW

V americkém San Jose bylo instalováno dvanáct 100 kW jednotek pro napájení společnosti Adobe. Jednotky nesou označení ES-5000 Energy Server, jsou typu SOFC a jsou napájeny zemním plynem. Články mohou být napájeny plynými (zemní plyn) či kapalnými (nafta, benzín) uhlovodíkovými palivy. Jednotky jsou využity pro napájení kanceláří, uplatnění by však mohly najít i u rezidencí se soukromými byty. Obecně mohou být jednotky využity i jako záložní systémy. Výhodou je tichý provoz a příznivé rozměry, ty jsou přibližně jako jedno parkovací místo [34].

8.5.4 PAFC

V současnosti je většina firem zaměřena na výrobu či vývoj elektráren využívajících předešlé typy článků. Palivové články využívající kyselinu fosforečnou jsou proto instalovány spíše na americkém kontinentě. Nabízená řešení jsou však obdobná jako pro jiné typy článků a přináší také komplexní řešení, které ukazuje směr, kterým se stacionární zdroje s palivovými články vydaly.

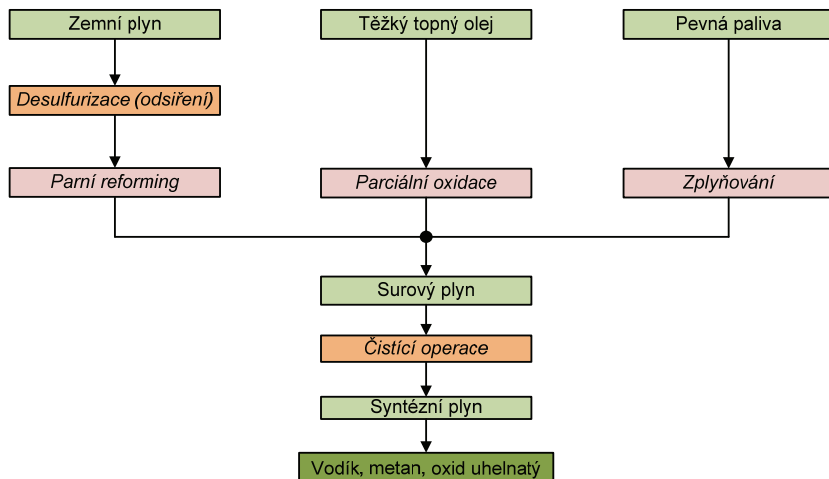
USA 400 kW

Počátkem roku 2011 byla v Roosevelt Island (New York City) do plného provozu uvedena malá elektrárna typu PAFC, která umožňuje kombinovanou výrobu elektřiny a tepla (CHP). Konkrétně se jedná o jednu jednotku s označením Pure-Cell ® System Model 400, jejíž elektrický výkon je 400 kW a tepelný výkon je průměrně 244 kW. Elektrárna pracuje na zemní plyn, který je v jednotce přeměněn na vodík, a to pomocí systému, který využívá parní reformování (FPS). Výrobní cyklus elektrárny výrobce udává 20 let, s tím, že po 10 letech je nutné provést výměnu základních komponent (palivové články, FPS) [35][36].

8.6. Výroba vodíku

V současnosti je vodík často vnímán jako ideální nosič energie, který by se mohl významněji uplatnit v budoucí energetice, protože při jeho spalování nevznikají oxidy síry nebo oxid uhličitý. Spalováním vodíku vznikají prakticky jen oxidy dusíku a voda. Obecně se proto ve vodíku nebo v kombinaci vodíku s mobilními a stacionárními palivovými články vidí čistý a do budoucna perspektivní zdroj ener-

gie. Na druhou stranu je nutné si uvědomit, že i dnešní elektrárny s palivovými články využívají vodík, který je vyráběn výhradně z fosilních paliv.



Obr. 8.15: Zjednodušené schéma základních metod výroby vodíku z fosilních paliv

Největší celkové zásoby vodíku v sobě ukrývá voda a uhlovodíkové látky (fosilní paliva). Výroba vodíku je proto poměrně rozmanitá a existuje celá řada metod, jak vodík získat. Výrobu vodíku lze tedy v podstatě rozdělit na výrobu vodíku využívající fosilní paliva a výrobu využívající vodu.

Jednotlivé metody výroby se od sebe liší základním principem získávání vodíku a použitím různých vstupních surovin. Nejrozšířenější metody využívají jako vstupní surovinu nejčastěji zemní plyn. Často využívanou surovinou je i ropa, respektive kapalné a plynné frakce, které vznikají při její těžbě. K rozšířenějším metodám patří i zplyňování uhlí [37][38][39][40][41].

V dnešní době se začíná rozšiřovat i zplyňování biomasy. V současnosti poměrně málo používanou metodou je elektrolýza. Aktuální expanze obnovitelných zdrojů energie může proto ovlivnit i budoucí pohled na výrobu vodíku. Vodík by se tak mohl začít více vyrábět prostřednictvím elektrolýzy či pomocí vysokoteplotního rozkladu vody, dále pak zplyňováním nebo pyrolýzou biomasy. Zmíněné výroby by mohly využívat právě obnovitelných zdrojů (fotovoltaické, větrné elektrárny nebo elektrárny na biomasu) pro získání energie potřebné pro tyto procesy. Z obnovitelných zdrojů by se vodík ve větší míře mohl vyrábět lokálně, tj. v místě instalace obnovitelného zdroje. Mohl by se pak stát jednou z možných alternativ akumulace energie, která by byla využitelná při regulaci elektrizačních soustav.

Vysokoteplotní elektrolýza či výroba vodíku prostřednictvím termochemických cyklů by mohla najít širší uplatnění díky kombinaci s jadernou energetikou, konkrétně pak s jadernými reaktory IV. generace [42].

8.6.1 Parní reformování

Jednu z cenově nejpříjemnějších metod jak vyprodukovat vodík je takzvané parní reformování (SMR). Parní reformování je využíváno u lehkých uhlovodíků, jako je zemní plyn, nafta či zkapalněný ropný plyn. Nejčastěji reformovanou surovinou je zemní plyn. Zemní plyn se skládá výhradně z metanu CH_4 a etanu. Dále však může obsahovat i sloučeniny síry, které v tomto procesu působí negativně a musí být redukovány. Před samotným reformováním metanu tak musí být uskutečněna úprava zemního plynu, například pomocí aktivních uhlíkových filtrů [37][40][41][43].

Pro uskutečnění potřebných chemických reakcí je nutné dosáhnout poměrně vysokých teplot z důvodu vysoce endotermických reakcí a vhodných tlaků. Teploty a tlaky jsou různé a souvisí s celkovým konceptem reformátoru a s použitými katalyzátory. Obecně se teploty pohybují ve stovkách $^{\circ}C$ (vyšší teplota znamená i vyšší výtěžek H_2) a tlaky v jednotkách MPa (vyšší tlak znamená nižší výtěžek H_2 a menší rozměry systému). V první části procesu se metan (zemní plyn) přivádí do vodní páry, kde dochází k následující chemické reakci [37][38][39].

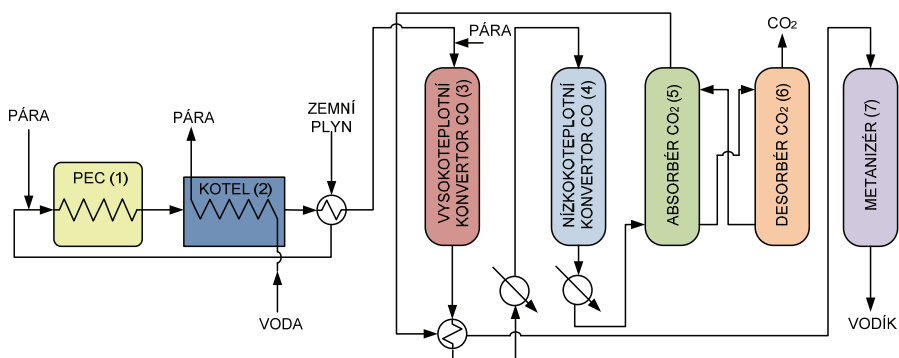


V menší míře také dochází k produkci oxidu uhličitého CO_2 dle rovnice



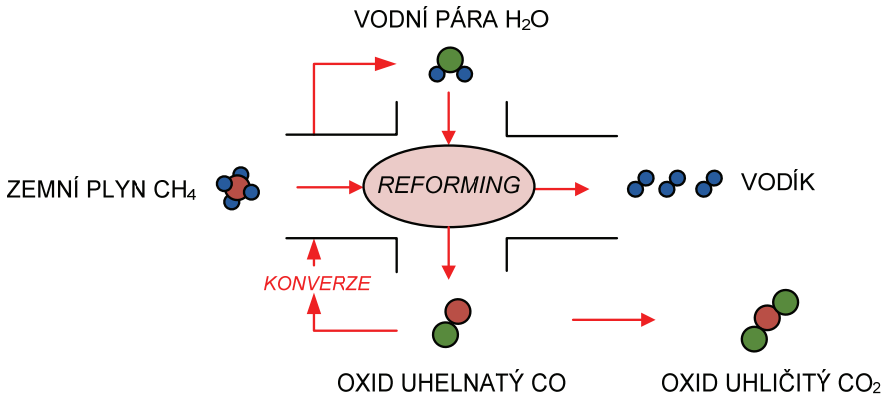
Na obrázku 8.16 je naznačeno zjednodušené schéma výroby vodíku pomocí parního reformování.

K reakcím dochází za zmíněných teplot a tlaků v trubkovém systému umístěném v peci (1), který obsahuje vhodný katalyzátor (NiO). Vznikající produkty jsou vedeny do kotle (2), kde prostřednictvím výměníku přispívají k produkci čisté páry. Jelikož nejsou další chemické reakce až tak energeticky náročné, je namíste si výrobou páry zlepšit energetickou bilanci procesu jako celku [37][39].



Obr. 8.16: Systém pro výrobu vodíku pomocí parního reformování - modifikováno z [37]

Další část procesu souvisí s navýšením množství vyprodukovaného vodíku pomocí konverzních dějů. Ochlazené produkty dále putují do konvertorů oxidu uhelnatého (3, 4). V konvertorech jsou CO a vodní pára přeměňovány na CO₂ a H₂, jak popisuje rovnice [37][39]



Obr. 8.17: Základní schéma parního reformování a následné konverze CO

Bývá využito vysokotlakého a nízkotlakého konvertoru a různě aktivních katalyzátorů. Kombinace konvertorů s různými tlaky souvisí i s eliminací siřných nečistot. Za konvertory jsou již ochlazené plynné produkty vedeny do absorbéru CO₂ (5), respektive do desorbéru CO₂ (6), kde je provedena vypírka. V metanizéru (7) jsou zbytky CO a CO₂ převedeny zpátky na CH₄. Čistý CO₂ se pak zpravidla vypouští do atmosféry či je zkapalněn. Zbylý CO a CO₂ se vede do metanizéru, kde se pomocí exotermických reakcí přemění zpátky na metan. Místo metanizéru a vypírky lze pro odstranění CO₂ a zbytků CO použít i tlakové adsorpční procesy (PSA) [37][38][39].

V současnosti představuje zemní plyn ideální zdroj vodíku zejména pro velké stacionární zdroje s palivovými články. Dnes lze díky zdokonalení technologie napájet i menších stacionárních zdrojů.

8.6.2 Parciální oxidace

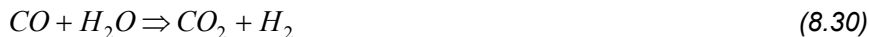
Parciální oxidace (POX) je metoda uzpůsobená pro zpracování těžkých uhlovodíků (například těžké ropné zbytky - těžký olej), ale i pro metan, propan, etanol a další. Oproti parnímu reformování se jedná o rychlejší pracovní procesy. Porovnáním základních chemických reakcí parciální oxidace a parního reformování metanu lze konstatovat, že u parciální oxidace dojde k nižší výtěžnosti vodíku [37].

Základní rovnice parciální oxidace metanu jsou tyto



Při oxidaci různých vstupních surovin se tvoří plynná směs CO, CO₂, H₂, CH₄ a H₂O a případně oxidy či sulfidy síry [37].

Konverze CO na vodík je následující



Vypírka CO₂ či metanizace jsou obdobné jako u parního reformování zemního plynu. Zbylé CO₂ je vypouštěno do atmosféry nebo je převedeno do kapalné fáze. U parciální oxidace těžkého oleje je surový produkt syntézní plyn, který je po čištění konvertován z CO a vodní páry na vodík a CO₂ [37].

8.6.3 Zplyňování

Vodík je možné vyrábět i z pevných fosilních paliv jako jsou například uhlí či koks. Tento proces je nazýván jako zplyňování, respektive zplyňování uhlí. Při procesu zplyňování je na rozžhavené uhlí přivedena vodní pára a vzduch. Díky vysokým teplotám, které mohou dosahovat až 1200°C, dojde ke vzniku směsi vodíku, dusíku, CO, CO₂ a CH₄. Jedná se ovšem o poměrně energeticky náročné procesy, protože významná část vstupujícího uhlí musí být využita pro udržení provozní teploty. Další nevýhodou je fakt, že je proces přímo závislý na fosilních palivech [42].

Alternativní řešení jsou hledána ve zplyňování biomasy. Zplyňování biomasy se děje pomocí dvou základních metod. U jedné metody dochází ke zplyňování v generátorech s pevným ložem (zplyňování při atmosférickém tlaku) a u druhé metody je biomasa zplyňována ve fluidních generátorech (vyšší tlak, jednotky MPa). Lze také konstatovat, že současné technologie pracují spíše při atmosférickém tlaku, jelikož jsou vyžadována zplyňovací zařízení malých výkonů. Základní chemická rovnice zplyňování biomasy je [44]



Chemická rovnice následné konverze CO na vodík je obdobná jako chemická rovnice konverze uvedená v odstavci zabývající problematikou parciální oxidace.

8.6.4 Elektrolýza

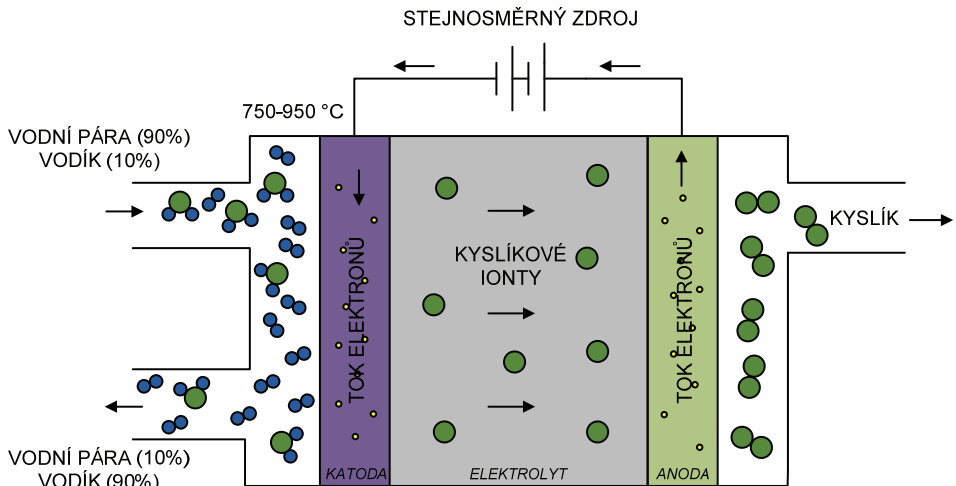
Obecně elektrolýza představuje proces, kdy vlivem průchodu stejnosměrného elektrického proudu vodným roztokem dochází ke štěpení chemické vazby mezi vodíkem a kyslíkem. Dochází tak k pohybu iontů obsažených v elektricky vodivé kapalině. Ionty dle svého náboje putují k opačně nabitým elektrodám za vzniku různých chemických reakcí. Základní rovnice elektrolýzy vycházejí z Faradayových zákonů. Ty konstatují, že elektrický proud procházející elektrolytem, respektive doba jeho působení, jsou přímo úměrné množství vyloučené látky (například vodík). Účinnost elektrolýzy je poměrně vysoká a může dosahovat hodnot blížících se 92%. Tímto způsobem lze v elektrolýzerech vyrobit velmi čistý vodík, a to i za běžných teplot a tlaků. Kromě elektrolýzérů jsou však nutné i další (pomocné) systémy, které jsou nezbytné při výrobě vodíku touto metodou. Jedná se zejména o různá čerpadla, střídače, usměrňovače, čističky vody a jiné. Výsledná účinnost systému jako celku se pak může pohybovat do 30% [42][45].

V současnosti má zmíněná metoda výroby vodíku minoritní zastoupení a pohybuje se v jednotkách procent. Na druhou stranu, výhoda metody spočívá ve faktu, že potřebujeme pouze zdroje vody a elektrické energie, abychom byli schopni vyrobit velmi čistý vodík. Širší uplatnění by mohla najít jako možný způsob akumulace energie, kdy přebytky elektrické energie vyrobené z výkonově proměnlivých obnovitelných zdrojů energie (fotovoltaické a větrné elektrárny) by byly ukládány ve formě vyrobeného vodíku. Pokud by došlo k náhlým změnám elektrického výkonu v soustavě, vodík by mohl posloužit jako palivo pro vodíkové články, které by byly schopny vyrobit část této chybějící energie.

8.6.5 Vysokoteplotní elektrolýza

U klasické elektrolýzy byla energie dodávaná pouze ve formě elektrické energie. Naproti tomu u vysokoteplotní elektrolýzy je společně s elektrickou energií přiváděna ještě energie tepelná. Tepelná energie je dodávána ve formě směsi teplé páry a vodíku. Vstupující parní směs bývá například tvořena 90-ti procenty vodní párou a 10-ti procenty vodíku. Vystupující směs pak obsahuje 90% vodíku a 10% páry. Vstupující parní směs je přiváděna na katodovou stranu elektrolyzéry, odkud poté vystupuje i obohacená (o vodík) parní směs, jak ukazuje následující obrázek [42][46].

Parní směs je vedena dále na separátory, kde dojde k oddělení vodíku. Provozní teplota elektrolyzéry, respektive parní směsi může být kolem od 750°C do 950°C a účinnost procesu může dosahovat až 50%. Stupeň obohacení vystupující parní směsi je různý a závisí na parametrech vstupní parní směsi, na konstrukci elektrolyzéry a na celkovém konceptu dané výroby vodíku. Je vidět, že tento zjednodušený popis výroby vodíku nevede k produkci skleníkových plynů. Také je omezena závislost na fosilních palivech, nebude-li se uvažovat jejich případná spotřeba pro výrobu elektrické energie [46].



Obr. 8.18: Zjednodušené schéma vysokoteplotní elektrolýzy

8.6.6 Termochemické cykly

Termochemické cykly představují další alternativu, jak být při výrobě vodíku méně závislý na fosilních palivech. Obecný princip těchto cyklů je založen na procesu termochemického štěpení vody. Rozštěpení vody na kyslík a vodík se děje prostřednictvím několika chemických dějů. K realizaci těchto dějů je však potřeba tepelná energie. Zjednodušeně by se dalo říci, že k výrobě vodíku je nutná pouze voda a vysokopotenciální teplo. Jedná se totiž o uzavřené cykly, při kterých jsou ostatní chemické látky během reakcí recyklovány a vstupují poté znovu do výrobního procesu. Koncové výstupní produkty jsou pak vodík, kyslík a také nízkopotenciální teplo. Lze také konstatovat, že s rostoucí teplotou roste i celková účinnost těchto cyklů, která dosahuje několik desítek procent. Mezi nejznámější termochemický cyklus patří siřičito-jodový (takzvaný S-I cyklus). Existují i hybridní termochemické cykly, které kromě tepelné energie využívají i energii elektrickou, například hybridní cyklus kyseliny siřové [40][42].

8.6.7 Jiné způsoby výroby

Z hlediska využitelnosti vodíku v energetice byly stručně představeny nejpoužívanější či nejvhodnější metody výroby vodíku. Mezi metody by šly zařadit i další procesy související se zpracováním biomasy, jako je například fotofermentace, anaerobní fermentace či pyrolýza. Existuje také celá řada jiných možností jak vyrobit vodík. V blízké budoucnosti však tyto metody v energetice pravděpodobně širšího uplatnění nedosáhnou (mikrobiální palivové články a jiné).

8.7. Skladování vodíku

Obecně jsou na skladovací systém vodíku kladeny zvýšené konstrukční a bezpečnostní požadavky. Vodík spolu se vzduchem tvoří hořlavou a výbušnou

směs v poměrně širokém rozsahu koncentrací. Vodík se také vyznačuje velmi malým rozměrem své molekuly, díky čemuž může snadno proniknout i pevnými materiály. Vodík je navíc bez zápachu a rychlou expanzí může dojít k jeho samovznícení. Zmíněné vlastnosti vodíku a další skutečnosti musí být proto respektovány i při jeho skladování. V dnešní době proto existuje několik způsobů jak vodík uskladnit. Mezi nejčastěji využívané způsoby patří skladování vodíku v plynném skupenství, kdy je vodík stlačen v tlakových nádobách. Vodík může být také nejprve zkapalněn a až poté skladován v tepelně izolovaných nádobách (případně i tlakových tepelných nádobách). Další možností je využití kovových hydridů či adsorpce na povrchu materiálu [43][47][48][49].

8.7.1 Plynné skupenství

Skladování vodíku v plynném skupenství představuje energeticky mnohem méně náročný proces oproti skladování v kapalném stavu. Pro uložení plynného vodíku pro stacionární aplikace se využívá tlakové lahve nebo svazku tlakových lahví. Tyto lahve bývají vyrobeny z chrommolybdenové oceli, respektive jako bezešvé lahve z nízkouhlíkaté nebo legované oceli. Časté provedení lahví je o objemu 50 litrů (vodní objem) s natlakováním 20 MPa, kdy lahev obsahuje necelých 9 m³ vodíku. Pro samotné stlačení vodíku se používá zejména pístových kompresorů [43][48][49].

V případě, že je vyžadováno větší množství vodíku, jsou jednotlivé lahve pevně spojeny do takzvaného svazku lahví. Jeden svazek je obvykle tvořen dvanácti lahvemi. Zmíněná řešení jsou však vhodnější pro menší aplikace a systémy. Pokud je vyžadováno větší množství vodíku, bývá vodík zpravidla uložen ve velkokapacitních vysokotlakých válcovitých zásobnících přímo v místě jeho spotřeby. Zásobníky mívají pracovní tlak 50 MPa a jejich uložení může být buď horizontální nebo vertikální [43].

Pro mobilní aplikace a systémy je pak možné využít tlakových lahví vyrobených z kompozitních materiálů pokrytých polymerem s objemem až 300 litrů. Existují i alternativní způsoby uskladnění plynného vodíku, a to v podobě podzemních úložišť, jako jsou vytěžené solné doly nebo místa, kde byl těžen zemní plyn [48][49].

8.7.2 Kapalně skupenství

Má-li být vodík skladován v kapalném skupenství, je zapotřebí jej ochladit na jeho kondenzační teplotu (přibližně -253°C při normálním tlaku). Toto nezbytné ochlazení a následná komprese však může představovat až 40% ztrátu energie, která je nakonec v kapalném vodíku uložena. Zkapalnění je tedy energeticky náročný proces a je k němu přistupováno, pokud mají být zajištěny vysoké hodinové spotřeby vodíku. Vysoké nároky jsou kladeny i na použité materiály zásobníků, které musí udržovat tuto nízkou teplotu a minimalizovat tepelné ztráty s okolím. Kapalně vodík je proto uložen do kryogenních zásobníků, které v praxi mohou dosahovat různých objemů. Ze zásobníků je pak čerpán jako plyn pro palivové články [47][48][49].

Nejčastější metodou výroby kapalně vodíku je ta pomocí Claudova procesu. Navíc je zde požadavek na použití čistého vodíku, proto se vodík musí čistit,

aby neobsahoval další plyny s rozdílnými teplotami varu, které by při ochlazování ztuhly nebo zkapalněly [47][48][49].

8.7.3 Pevné látky

Do této formy skladování jsou v současnosti vkládány naděje do budoucna. Prakticky existují dvě metody jak vodík na pevnou látku navázat. První metoda využívá fyzikálních principů, konkrétně separačního procesu adsorpce, kdy je plyn (vodík) hromaděn na povrchu určité pevné látky (uhlíkaté struktury). Naproti tomu existuje druhá metoda, která využívá chemických principů, kdy je vodík pomocí chemických vazeb přímo vázán do hmoty pevné látky (takzvaná nosná látka). Aby se vodík mohl navázat na daný materiál, musí dojít k chemické reakci mezi vodíkem a materiálem. Během této reakce se uvolňuje teplo a vodík je absorbován do materiálu. Pokud má být vodík následně využit, je potřeba teplo do systému opět dodat. Výhodou metody je, že po navázání vodíku není potřeba vysokých tlaků a nízkých teplot (kryogenních) [47][48].

8.7.4 Jiné způsoby skladování

Z hlediska dlouhodobého skladování vodíku je vhodnější vodík převést na některou sloučeninu (metan, amoniak), která se snadněji zkapalňuje. Existují i výzkumy, kdy je vodík uchován v takzvaných vodíkových tabletách. Tablety jsou tvořeny amoniakem, který je vázán na mořskou sůl a uvolňován pomocí speciálního katalyzátoru [49].

8.8. Literatura

- [1] BELLIS, M.. *Hydrogen Fuel Cells-Where Do We Go From Here*. [online]. c2010, poslední revize 10.3.2011 [cit. 20.11.2011]. Dostupné z: <<http://inventors.about.com/library/weekly/aa090299.htm>>
- [2] KALA, P., HICKS, M. Proposal for Fuel Cell and Other Clean Fuel Powerd Ferries for Pearl Harbor. *30th NDIA Environmental and Energy Symposium & Exhibition*, San Diego, 2004
- [3] *Fuel Cell History - Fuel Cell Today*. [online]. [cit. 29.11.2011]. Dostupné z: <<http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells/history>>
- [4] *Bacon's Fuel Cell - GHN: IEEE Global History Network*. [online]. [cit. 20.11.2011]. Dostupné z: <http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/Bacon%27s_Fuel_Cell>
- [5] PTÁČEK, M., NOVOTNÝ, J., MATOUŠEK, A. Analýza fotovoltaické části multienergetického grid- off systému s palivovým článkem. In *Proceedings of the 1st International Scientific Conference Renewable Energy Sources 2010*. Tatranské Matliare, Slovak University of Technology in Bratislava, 2010. SBN: 978-80-89402-24-3
- [6] BAKER, R., ZHANG, J. *Electrochemistry Encyclopedia – PEM fuel cells*. [online]. c2011, poslední revize duben 2011. [cit. 20.11.2011]. Dostupné z: <<http://electrochem.cwru.edu/encycl/art-f04-fuel-cells-pem.htm>>
- [7] LEROY, S. *MEA - Research Programs - NRC-CNRC*. [online]. c2009, poslední revize 28.9.2010. [cit. 29.11.2011]. Dostupné z: <<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/programs/ifci/low-temperature-fuel-cells/membrane-electrode-assembly.html>>
- [8] VANĚK, J., KŘIVÍK, P., NOVÁK, V. *Alternativní zdroje energie*. Brno: FEKT, 2006.
- [9] *Types of Fuel Cells*. [online]. [cit. 20.11.2011]. Dostupné z: <http://www.fctec.com/fctec_types.asp>
- [10] *Fuel Cell Technologies - Fuel Cell Today*. [online]. [cit. 27.11.2011]. Dostupné z: <<http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells/technologies>>
- [11] OETTEL, C., RIHKO-STRUCKMANN, L., SUNDMACHER, K., *High-Temperature PEM Fuel Cells (HT-PEMFC)*. [online]. [cit. 3.12.2011]. Dostupné z: <http://www.mpi-magdeburg.mpg.de/research/groups/pcp/PCP_INDEX/1088/PROBIO/PROBIO_OR/Poster.pdf>
- [12] *ENVIROS » Palivové články « Využití palivových článků*. [online]. poslední revize 14.9.2011 [cit. 20.11.2011]. Dostupné z: <http://www.enviros.cz/palivove_clanky/3_vyuziti_palivovych_clanku.html>
- [13] GYU-YEONG, Ch., JONG-SOO, K., HYUN-SOO, K., BYOUNG-KUK, L., WON-YONG, L. Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) modeling for high efficiency fuel cell balance of plant (BOP). *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on*. pp.271-276, 8-11 Oct. 2007
- [14] *Electrolysis of Water and Fuel Cell Operation*. [online]. poslední revize 8.6.2005. [cit. 1.12.2011]. <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/electrol.html>>
- [15] PORŠ, Z. *Palivové články*. [online]. Praha, 2002. [cit. 20.11.2011]. Dostupné z: <<http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>>
- [16] HAUBROCK, J., HEIDECK, G., STYCZYNSKI, Z. Dynamic Investigation on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems, *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, pp.1-6, 24-28 June 2007
- [17] WANG, C. Modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems, Ph.D. dissertation, Montana State Univ., Bozeman, 2006.
- [18] CORREA, J. M., FARRET, F. A., POPOV, V. A., SIMOES, M. G. Sensitivity analysis of the modeling parameters used in Simulation of proton exchange membrane

- fuel cells, *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, pp. 211-218, 2005
- [19] UZUNOGLU, M., ALAM, M. S. Dynamic modeling, design, and simulation of a combined PEM fuel cell and ultracapacitor system for stand-alone residential applications, *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, p.767-775, 2006
- [20] ONAR, O.C., M. UZUNOGLU, ALAM, M.S. Alam, Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system, *Journal of Power Sources*, Volume 161, October 2006, p.707-722, ISSN 0378-7753
- [21] EL-SHARKH, M. Y., RAHMAN, A., ALAM, M. S., SAKLA, A. A., BYRNE, P. C., THOMAS, T. Analysis of active and reactive power control of a stand-alone PEM fuel cell power plant, *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol.19, no.4, p. 2022-2028, Nov. 2004
- [22] *Renewable Energy Focus - Solvay, NedStack contract to build 1 MW PEM fuel cell power plant*. [online]. c2010, poslední revize 10.2.2011. [cit. 30.11.2011]. <<http://www.renewableenergyfocus.com/view/7191/solvay-nedstack-contract-to-build-1-mw-pem-fuel-cell-power-plant/>>
- [23] *Edit Project :: Fuel Cells 2000 Web*. [online]. c2011, poslední revize 27.4.2011. [cit. 30.11.2011]. Dostupné z: <<http://www.fuelcells.org/db/project.php?id=1284>>
- [24] MAGNUS, R. Solvic Lillo. Elektronická prezentace. [online]. c2011, poslední revize 12.10.2011. [cit. 21.11.2011]. <http://www.pro-h2.de/tl_files/proh2/vortraege/PRO%20H2%20Technologie%20Forum%202011_Vortrag%20Magnus.pdf>
- [25] *Ballard - CLEARgen fuel cel.1MW*. [online]. Specifikace produktu. [cit. 21.11.2011]. Dostupné z: <http://www.ballard.com/files/PDF/Distributed_Generation/CLEARgen_Spec_Sheet.pdf>
- [26] *Hydrogenics Chosen for Wind Energy Storage Solution in North Rhine Westphalia*. [online]. c2011, poslední revize 12.10.2011. [cit. 22.11.2011]. Dostupné z: <<http://www.fuelcelltoday.com/news-events/news-archive/2011/october/hydrogenics-chosen-for-wind-energy-storage-solution-in-north-rhine-westphalia>>
- [27] *Edit Project :: Fuel Cells 2000 Web*. [online]. c2011, poslední revize 30.9.2011. [cit. 22.11.2011]. Dostupné z: <<http://www.fuelcells.org/db/project.php?id=1315>>
- [28] *FuelCell Energy Ships First 2.8 Megawatts to Korea*. [online]. c2011, poslední revize 9.11.2011. [cit. 19.11.2011]. Dostupné z: <<http://www.fuelcelltoday.com/news-events/news-archive/2011/november/fuelcell-energy-ships-first-28-megawatts-to-korea>>
- [29] *60 MW Fuel Cell Power Plant Planned for South Korean City*. [online]. c2011, poslední revize 12.4.2011. [cit. 19.11.2011]. Dostupné z: <<http://www.fuelcelltoday.com/news-events/news-archive/2011/april/60-mw-fuel-cell-power-plant-planned-for-south-korean-city>>
- [30] *Busan to Get 5.6 MW Fuel Cell Power Plant*. [online]. c2011, poslední revize 14.4.2011. [cit. 1.12.2011]. Dostupné z: <<http://www.fuelcelltoday.com/news-events/news-archive/2011/april/busan-to-get-56-mw-fuel-cell-power-plant>>
- [31] *FuelCell Energy Sells 1.4 Megawatt Fuel Cell Power Plant to Provide Renewable Power From Biogas*. [online]. c2010, poslední revize 17.8.2011. [cit. 1.12.2011]. Dostupné z: <<http://www.fuelcelltoday.com/news-events/news-archive/2010/august/fuelcell-energy-sells-14-megawatt-fuel-cell-power-plant-to-provide-renewable-power-from-biogas>>
- [32] *Ceramic Fuel Cells Receives Order for 100 BlueGen Units from Netherlands Distributor*. [online]. c2011, poslední revize 27.9.2011. [cit. 4.12.2011]. Dostupné z: <<http://www.fuelcelltoday.com/news-events/news-archive/2011/september/ceramic-fuel-cells-receives-order-for-100-bluegen-units-from-netherlands-distributor>>
- [33] *Ceramic Fuel Cells Limited / Blue Gen*. [online]. Specifikace produktu. [cit. 4.12.2011]. Dostupné z: <http://www.bluegen.info/Assets/Files/BlueGen_Brochure_

%28ENG_GER%29_April_2010.pdf>

- [34] *12 Bloom Energy Servers installed at Adobe Systems*. [online]. c2010, poslední revize 28.9.2010. [cit. 5.12.2011]. Dostupné z: <<http://www.fuelcelltoday.com/news-events/news-archive/2010/september/12-bloom-energy-servers-installed-at-adobe-systems>>
- [35] *UTC Power – Model 400 PureCell System*. [online]. Specifikace produktu. [cit. 5.12.2011]. Dostupné z: <<http://www.utcpower.com/files/PRMAN69600D.pdf>>
- [36] *Pressroom|Press Release|Read Online - UTC Power*. [online]. c2011, poslední revize 27.5.2011. [cit. 5.12.2011]. Dostupné z: <<http://www.utcpower.com/pressroom/pressreleases/first-fuel-cell-to-power-residential-building-in-new-york>>
- [37] BLAŽEK, J., RÁBL, V. *Základy zpracování a využití ropy*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. Str. 107. ISBN 80-7080-619-2
- [38] *HyFLEET:CUTE :: Technology :: Hydrogen Production :: reforming*. [online]. [cit. 3.12.2011]. <<http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/Technology/HydrogenProduction/reforming>>
- [39] *Petroleum.cz, Výroba vodíku parním reformováním*. [online]. [cit. 3.12.2011]. Dostupné z: <<http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>>
- [40] SOMOLOVÁ, M. DLOUHÝ, P. *Hytep.cz | Česká vodíková technologická platforma*. [online]. c2007, poslední revize 9.5.2007. [cit. 30.11.2011]. Dostupné z: <<http://hytep.cz/?loc=article&id=6>>
- [41] LEE, S. H. D., APPLGATE, D. V., AHMED, S., CALDERON, S. G., HARVEY, T. L. Hydrogen from natural gas: part I - autothermal reforming in an integrated fuel processor, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 30, Issue 8, July 2005, Pages 829-842, ISSN 0360-3199
- [42] DOUCEK, A., TENKRÁT, D., DLOUHÝ, P. Vodíkové hospodářství a možnosti využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie. *Paliva*, 2011, s.1-7. ISSN:1804-2058. [online]. [cit. 30.11.2011]. Dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/data/clanky/36_vodikove_hospodarstvi_a_moznosti_vyuziti_vodiku_k_regulaci_obnovitelnych_zdroju_energie.pdf>
- [43] TUČEK, V., DVOŘÁKOVÁ, L., HANZAL, J. *Vodík [online]. Odborná spolupráce ČATP, PS - 4. Česká asociace technických plynů, 2004-07, rev. 2005-04-12, [cit. 2011-11-29]. Dostupné z: <<http://www.catp.cz/publikace/vodik.pdf>>*
- [44] BRANDEJSKÁ, E., PROKEŠ, O., TENKRÁT, D. *Získávání vodíku z obnovitelných zdrojů*. [online]. Energie z biomasy V – odborný seminář: Brno, 2006, s.7 [cit. 2011-11-29]. <http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_v/papers/08-Brandejska.pdf>
- [45] BAČA, P. Akumulace energie z OZE - vodíkové hospodářství. *TZB- info*, 2011, roč. 2011, č. 2, s. 1-10. ISSN: 1801- 4399. [online]. [cit. 20.11.2011]. Dostupné z: <<http://energie.tzb-info.cz/7134-akumulace-energie-z-oze-vodikove-hospodarstvi>>
- [46] *Green Car Congress: INEEL High-Temperature Electrolysis Demo Produces Hydrogen for Record 1,000 Hours* [online]. poslední revize 6.3.2006. [cit. 30.11.2011]. <http://www.greencarcongress.com/2006/03/ineel_hightempe.html>
- [47] VOJTĚCH, D., ŠERÁK, J., MICHALCOVÁ, A., MORŤANIKOVÁ, M. Absorpce vodíku na kovových nanočásticích připravených selektivním loužením. [online]. *Metal 2009*. Hradec nad Moravicí, ČR. ISBN 978-80-87294-03-1. [cit.20.11.2011]. Dostupné z: <<http://www.nanocon.cz/data/metal2009/sbornik/Lists/Papers/045.pdf>>
- [48] *Hytep.cz | Česká vodíková technologická platforma*. [online]. [cit. 20.11.2011]. Dostupné z: <<http://hytep.cz/?loc=article&id=8>>
- [49] ŠVÁB, M. *Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství*. [online]. Praha: ČEA, 2006. 85 s. [cit. 30.11.2011]. Dostupné z: <<http://www.mpo-efekt.cz/dokument/01.pdf>>

9. Zpětné vlivy OZE na distribuční soustavy

Elektrizační soustava je historicky navrhovaná a provozovaná tak, aby umožnila a řešila transport velkého množství elektrické energie ze zdrojů elektrické energie přes přenosové a distribuční systémy ke koncovým spotřebitelům. Distribuční soustavy (DS) jsou tradičně pasivní a navrženy k provozu s jedním směrem toku energie, a to ke spotřebitelům, na rozdíl od přenosových systémů, které jsou navrženy pro obousměrný tok výkonů/energie [21]. Uvedené schéma je spojeno s centralizovanou výrobou elektrické energie v jednotkách velkých výkonů. Naproti tomu, obnovitelné zdroje elektrické energie typicky představují zdroje s řádově menšími výkony v rozsahu od stovek wattů do přibližně deseti megawatt, v závislosti na typu OZE (viz předchozí kapitoly). Pomineme-li jejich aplikace jako zdrojů elektrické energie ve zcela nezávislých elektrických sítích a budeme uvažovat paralelní provoz s elektrizační soustavou, pak vzhledem k instalovaným výkonům a dalším provozně-technickým záležitostem jsou vyvedeny/připojeny do distribučních soustav a to rozptýleně, buď přímo, nebo přes sítě/instalace spotřebitelů [16].

Se zavedením rozptýlené výroby, která je také označovaná přívlastkem disperzní či distribuovaná, a vyvedením jejich výkonu do distribučních soustav se distribuční soustavy stávají aktivními, nejen se spotřebou, ale také s výrobou elektrické energie. Základní myšlenkou obnovitelných zdrojů elektrické energie je poskytovat elektřinu zákazníkům s ohledem na životní prostředí, a ve spojení s distribuovanou výrobou, s nižší cenou a efektivněji, při nižších celkových ztrátách spojených v klasickém schématu s přenosem a distribucí elektrické energie, s využitím lokálních zdrojů, atd. Distribuovaná výroba může mít významný vliv na tok výkonů, profil napětí v sítích, stabilitu napětí, kvalitu elektrické energie, chránění elektrických sítí, spolehlivost a bezpečnost, atd., a to jak v pozitivním tak převážně negativním smyslu, v závislosti na mnoha faktorech určených především typem a provedením/parametry zdroje elektrické energie a distribuční soustavy do které je zdroj připojen [16].

Energie z obnovitelných zdrojů je čerpána ve formách popsanych v kapitole 1.1.2 [19], které zároveň určují i v návaznosti na lokální podmínky její dostupnost a vydatnost v čase. Zatímco například geotermální energie či biomasa, v závislosti na logistice, patří z pohledu běžného časového měřítka mezi spolehlivé a stabilní zdroje energie, spolehlivost a stabilita většiny z ostatních je dána řadou deterministických ale i v podstatě stochastických faktorů/jevů. Mezi deterministické jevy patří roční, denní či jiné cykly a za náhodné jevy považujeme například mezisezónní změny či výkyvy počasí. Následná konverze na elektrickou energii je realizovaná v jednom až třech hlavních konverzních stupních (kapitola 1.5), v závislosti na charakteru/druhu vstupní energie (chemická, tepelná, mechanická) obnovitelného zdroje a procesech, které jsou při této konverzi využity. Podstatné jsou vlastnosti a parametry technických prostředků použitých pro jednotlivé transformační kroky, kterými jsou například kotle, sluneční kolektory, spalovací motory, turbíny (plynové, parní, vodní), větrné motory, termoelektrické generátory, palivové články, fotovoltaické generátory, synchronní a asynchronní generátory a elektronické výkonové měniče. I když je v mnoha ohledech rozhodující celá technologie konverze

energie, včetně vlastností a parametrů vstupní energie, významný vliv na provoz, řízení a chránění distribučních sítí s distribuovanou výrobou má ta část technologického celku tvořící rozhraní s distribuční soustavou, resp. s elektrickým systémem. Typicky je to synchronní generátor, asynchronní generátor, nebo polovodičový výkonový měnič [17]. V neposlední řadě je rozhodující místo připojení a síťové poměry, respektive topologie sítě a parametry jednotlivých prvků distribuční soustavy [21].

Zpětné vlivy OZE na DS se vztahují k jejich připojení a provozu a ovlivňují tak kvalitu elektrické energie [20], [19] v distribuční soustavě a tím i samotné zařízení sítí, či elektrická zařízení odběratelů elektrické energie. Každý zdroj energie připojený do DS může v závislosti na svém výkonu měnit/zvyšovat velikost napětí v místě připojení a tedy i rozložení velikosti napětí v jednotlivých uzlech sítě. Připojení zdroje je obvykle doprovázeno přechodným dějem se skokovou změnou těchto napětím, jejíž velikost je dána především technologií (provedením a řízením) generátoru, který tvoří rozhraní s DS. Fluktuace injektovaného výkonu typická pro větrné elektrárny a fotovoltaické elektrárny nebo i kogenerační jednotky spalující biopaliva může způsobit kolísání či změny napětí v síti, které vedou na rušivé blikání světelných zdrojů - flickr. Generátory připojené přes výkonové měniče, či přímo připojené rotační generátory nevhodné konstrukce mohou do napájecí sítě injektovat proud neharmonického průběhu a tím způsobovat dodatečné harmonické zkreslení napětí v DS. OZE mohou být pro napájecí síť i zdrojem meziharmonických proudů vznikajících v důsledku: PWM modulace u střídačů, řídicího schématu generátorů a měničů, intermodulace dvou měničů pracujících přes DC obvod s rozdílnou fundamentální frekvencí. Jestliže je frekvence PWM řízení střídačů nad 9 kHz (střídače FVE typicky do 25 kHz) proniká do DS rovněž rušení středofrekvenční. Propagace všech uvedených a dalších rušivých jevů v DS závisí na impedanční charakteristice sítě v místě připojení [21], která může být afektována rezonancemi zařízení výroby s ostatními zařízeními DS na určitých frekvencích a rezonanční efekt tak může nežádoucí projevy připojení OZE ještě zesílit.

Vznikem, šířením a regulací nízkofrekvenčního rušení šířeného po vedení se zabývá soubor mezinárodních harmonizovaných standardů ČSN EN 61000-X-Y, který rovněž řeší či předkládá kompatibilní úrovně určující přípustnou míru rušení v napětí, pro koordinaci elektromagnetické kompatibility ve veřejných distribučních soustavách i průmyslových sítích. Každému odběrateli je ve smyslu energetického zákona [1] a vyhlášky [3] o kvalitě dodávek elektřiny zaručen standard kvality elektrické energie resp. kvality napětí. Kvalita napětí je definovaná charakteristikami napětí [21], [22], které jsou vyjádřeny maximálními přípustnými odchylkami napětí od ideálních parametrů. Konkrétní hodnoty a související záležitosti pro veřejné distribuční soustavy návazně řeší Pravidla provozování distribučních soustav (PPDS) v Příloze 3 [6], která je odvozena od standardu ČSN EN 50160 [8].

Provoz OZE paralelně s DS tedy nesmí v žádném bodě DS způsobit zhoršení kvality napětí nad dovolené meze ([6], resp. [8]). Některé státy včetně ČR přitom v souladu s plánováním rozvoje soustav stanovují specifické limity rušivých/nežádoucích vlivů zdrojů připojovaných paralelně k elektrické soustavě.

Obecně je při zřizování vlastní výroby zapotřebí dbát na platná nařízení a předpisy, na to, aby byla vhodná pro paralelní provoz se sítí provozovatele (v tomto případě) distribuční soustavy (PDS) a aby bylo vyloučeno rušivé působení na síť

nebo zařízení dalších odběratelů. Při zřizování a provozu výroben je nutné dodržovat vztahující se platné zákony a předpisy, především [1] a [2], platné normy ČSN, PNE, případně podnikové normy provozovatele distribuční soustavy, ale také nařízení a směrnice, které v této souvislosti vydal. Provozovatel distribuční soustavy může ve smyslu energetického zákona [1] požadovat změny a doplnění na zřizovaném nebo provozovaném zařízení, pokud je to nutné z hlediska bezpečného a bezporuchového provozu, nebo též z hlediska zpětného ovlivňování distribuční soustavy [7]. Při posuzování vlivu jakéhokoliv zdroje elektrické energie/výrobní na DS a chování v DS vychází PDS z rozsahu sledovaných parametrů jejich mezí z Přílohy 4 PPDS [7]. PPDS Příloha 4 se vztahuje na plánování, zřizování, provoz a úpravy výroben elektrické energie, připojených k síti nn, vn nebo 110 kV. Zároveň platí, že provozem výrobní nesmí v místě připojení k DS ani v jiném předávacím místě DS dojít ke zhoršení kvality napětí hodnocené charakteristikami napětí elektrické energie podle PPDS Příloha 3 [6], resp. ČSN EN 50160 [8].

9.1. Podmínky pro připojení OZE do DS z hlediska jejich chování a zpětných vlivů dle PPDS

V následující kapitole je uveden stručný výtah zásadních částí pravidel provozování distribučních soustav a především přílohy č. 4, kde jsou definována pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí. Sledovanými veličinami, jimiž je hodnocena míra ovlivnění DS a chování výroben v DS, jsou zejména velikost a změny napětí, dlouhodobý flickr, proudy harmonických a meziharmonických, míra ovlivnění HDO.

9.1.1 Chování výroben v síti

Výrobní zařízení musí být schopna se při dodávce do sítě podílet na udržování napětí. Přitom se rozlišuje mezi statickou a dynamickou podporou sítě. Požadované hodnoty a charakteristiky pro podporu sítě udává PDS. Dodržování zadaných hodnot zajišťuje automatické řízení ve výrobě. Detailní provedení je specifikováno ve smlouvě o připojení.

Statické udržování napětí v síti je udržování napětí ve smluvně stanovených mezích za normálního provozu v síti při pomalých změnách napětí. Pokud to vyžadují podmínky v síti, a PDS tento požadavek uplatní, musí se výrobní zařízení na statickém udržování podílet.

Dynamickou podporou sítě se rozumí udržování napětí při poklesech napětí v síti vvn a zvn, zamezující nežádoucímu odpojení výkonu napájecích sítě vn a rozpadu sítě. Proto se musí i výrobní v sítích vn a 100kV podílet na dynamické podpoře sítě. To znamená, že musí být technicky schopné zůstat připojené i při poruchách v síti (Toto se týká všech druhů zkratů (jedno-, dvou-, i třífázových). Při dynamické podpoře je zapotřebí dodržet následující meze:

- Při poklesu napětí mezi 100% a 70% dohodnutého napájecího napětí U_n v přípojném bodě s trváním do 0,7 s (déle než druhý časový stupeň síťové ochrany) musí výrobní zůstat připojená v síti.
- Při poklesu napětí pod 30% s trváním do 150 ms musí výrobní zůstat připojená v síti; pokud to není technicky možné, může v dohodě s PDS dojít k nezpožděnému odpojení.

Jde-li o připojení do sítě s OZ, pak k odpojení musí dojít v průběhu beznapěťové přestávky. PDS stanoví, které výroby se podle jejich předpokládaných technických možností musí podílet na dynamické podpoře sítě. To se děje zadáním nastavení pro rozpadovou síťovou ochranu. Zařízení uživatelů s výrobny, které při poruchách v napájecí síti přejdou pro pokrytí vlastní spotřeby do ostrovního provozu, musí se až do odpojení od sítě PDS podílet na podpoře sítě. Zamýšlený ostrovní provoz je zapotřebí odsouhlasit s PDS v rámci požadavku na připojení.

Přizpůsobení činného výkonu

Všechny výroby připojené do DS musí být schopné snižovat činný výkon automaticky v závislosti na kmitočtu v síti f_s a podle poměrů v síti i podle povelů z řídicího dispečinku PDS nebo se automaticky odpojit od DS.

Všechny výroby připojené do DS, které se automaticky neodpojí, musí být schopné při kmitočtu nad 50,2 Hz snižovat okamžitý činný výkon gradientem 40% na 1 Hz (Obr. 9.1), kde:

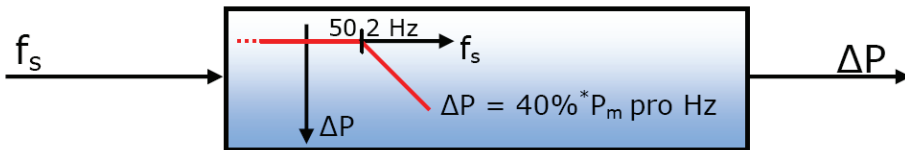
$$\Delta P = 20P_m \cdot \frac{50,2\text{Hz} - f_s}{50\text{Hz}} \quad \text{při } 50,2\text{Hz} < f_s < 51,5\text{Hz} \quad (9.1),$$

kde P_m je okamžitý výkon, ΔP je snížený výkon a f_s označuje frekvenci sítě.

V rozsahu f_s :

$$47,5\text{Hz} < f_s < 50,2\text{Hz} \quad \text{žádné omezení} \quad (9.2),$$

$$f_s \leq 47,5\text{Hz} \text{ a } f_s \geq 51,5 \quad \text{odpojení od sítě} \quad (9.3).$$



Obr. 9.1: Snižování činného výkonu obnovitelných zdrojů při nadfrekvenci

Výrobna musí být provozovatelná se sníženým činným výkonem. PDS je ve smyslu [1] oprávněn ke změně činného výkonu v následujících stavech sítě:

- potenciální ohrožení bezpečného provozu systému (např. při předcházení stavu nouze a při stavech nouze),
- nutné provozní práce popř. nebezpečí přetížení v síti PDS,
- nebezpečí vzniku ostrovního provozu,
- ohrožení statické nebo dynamické stability,
- vzrůst frekvence ohrožující systém,
- údržba nebo provádění stavebních prací.

V těchto případech má PDS právo vyžadovat automaticky působící přechodné omezení dodávaného činného výkonu nebo odpojení zařízení. PDS nezasahuje do řízení výroby, nýbrž zadává požadovanou hodnotu.

Snížení dodávaného výkonu na hodnotu požadovanou PDS v přípojném bodě sítě (např. na 60, 30 a 0% instalovaného výkonu u fotovoltaických elektráren (FVE) a 100, 75 a 50% u bioplynových stanic (BPS)) musí být neprodlené, maximálně v průběhu jedné minuty. Přitom musí být technicky možné snížení až na hodnotu 0 % bez automatického odpojení výroby od sítě.

Činný výkon může být opět zvyšován teprve po návratu kmitočtu na hodnotu $f_s \leq 50,2$ Hz, pokud aktuální kmitočet nepřekročí 50,2 Hz. Rozsah necitlivosti musí být do 10 mHz.

Řízení jalového výkonu v závislosti na provozních podmínkách

Způsob řízení jalového výkonu závisí vždy na konkrétním místě distribuční soustavy a určuje ho PDS po konzultaci s výrobcem.

Zdroje připojované do sítí nn - Zdroje do 16A/fázi včetně

Účinník zdroje za normálních ustálených provozních podmínek při dovoleném rozsahu tolerancí jmenovitého napětí musí být podle [8] mezi 0,95 kapacitní a 0,95 induktivní za předpokladu, že činná složka výkonu je nad 20% jmenovitého výkonu zdroje.

Zdroje připojované do sítí nn – FVE do 4,6 kVA/fázi včetně

U fotovoltaických elektráren do výkonu 4.6 kVA/fázi se kompenzace účinníku nepožaduje.

Zdroje připojované do sítí nn – Ostatní zdroje

Účinník zdroje za normálních ustálených provozních podmínek při dovoleném rozsahu tolerancí jmenovitého napětí musí být mezi 0,95 kapacitní a 0,95 induktivní za předpokladu, že činná složka výkonu je nad 20% jmenovitého výkonu zdroje.

U výrobců druhé kategorie podle [3] musí být při dodávce činného výkonu do DS a při dovoleném rozsahu tolerancí jmenovitého napětí účinník v předávacím místě mezi 0,95 kapacitní a 0,95 induktivní za předpokladu, že činná složka výkonu je nad 20% jmenovitého proudu (transformátoru proudu) předávacího místa. Hodnotu účinníku v předávacím místě výroby s DS určuje PDS.

Zdroje připojované do sítí vn a 110kV

Jalový výkon výroby musí být od instalovaného výkonu 100 kVA říditelný. Dohodnutý rozsah jalového výkonu musí využitelný v průběhu několika minut a libovolně často.

Při dodávce činného výkonu je nastavení jalového výkonu zadáváno PDS buď pevnou hodnotou, nebo když to provoz sítě vyžaduje dálkově nastavitelnou žádanou hodnotou.

Žádaná hodnota je buď:

- pevná hodnota zadaného účinníku $\cos \varphi$,
- hodnota účinníku $\cos \varphi = f(P)$,
- zadaná hodnota jalového výkonu,
- zadaná hodnota napětí,
- charakteristika $Q(U)$.

Pokud je PDS zadána charakteristika, musí být automaticky nastavena odpovídající hodnota jalového výkonu:

- pro charakteristiku $\cos \varphi = f(P)$ v průběhu 10 s,
- pro charakteristiku $Q(U)$ nastavitelně mezi 10 s a jednou minutou (udá PDS).

Stejně jako zvolený způsob řízení, tak i žádané hodnoty zadává PDS podle potřeb provozu sítě individuálně pro každou výrobnu. Při zadávání vychází PDS také z technických možností dané výrobní.

U kompenzačního zařízení zdrojů je zapotřebí přihlížet ke způsobu provozu vlastní výrobní a z toho vyplývajících zpětných vlivů na síťové napětí. Při silně kolísajícím výkonu pohonu (např. u některých typů větrných elektráren) musí být kompenzace jalového výkonu automaticky a dostatečně rychle regulována. Kompenzační kondenzátory nesmějí být připínány před zapnutím generátoru. Při vypínání generátoru musí být odpojeny současně.

Provoz zdrojů může vyžadovat opatření k omezení napětí harmonických a pro zamezení nepřijatelného zpětného ovlivnění HDO. S PDS je proto zapotřebí odsouhlasit výkon, zapojení a způsob regulace kompenzačního zařízení, případně i hrazení harmonických nebo frekvence HDO vhodnými indukčnostmi.

Pro jednoznačné přiřazení pásem účinníku slouží tabulka 9.1. Pro předcházení rozporům při hodnocení účinníku se přitom doporučuje používat jednotně spotřebičovou orientaci.

<i>Příklad</i>	<i>Zdrojová orientace</i>	<i>Spotřebičová orientace</i>
<i>Synchronní generátor (přebuzený)</i>	$P > 0$ a $Q > 0$ $0^\circ < \varphi < 90^\circ$	$P < 0$ a $Q < 0$ $180^\circ < \varphi < 270^\circ$
<i>Asynchronní generátor</i>	$P > 0$ a $Q < 0$ $270^\circ < \varphi < 360^\circ$	$P < 0$ a $Q > 0$ $90^\circ < \varphi < 180^\circ$
<i>Synchronní motor (přebuzený)</i>	$P < 0$ a $Q > 0$ $90^\circ < \varphi < 180^\circ$	$P > 0$ a $Q < 0$ $270^\circ < \varphi < 360^\circ$
<i>Asynchronní motor</i>	$P < 0$ a $Q < 0$ $180^\circ < \varphi < 270^\circ$	$P > 0$ a $Q > 0$ $0^\circ < \varphi < 90^\circ$

Tab. 9.1: Pásma účinníku

Jiná výkonová omezení

Minimální výkon, od kterého je nutné připojení k síti vn nebo 110 kV a maximální výkon, do kterého je možné připojení do sítě nn, resp. vn závisí na druhu a způsobu provozu vlastní výroby, stejně jako na síťových poměrech PDS.

U fotočládkových zařízení připojovaných do sítě nn je omezen výkon při jednofázovém připojení v jednom přípojném bodě na 4,6 kVA na fázi, nesymetrie u fázových vodičů nesmí za normálního provozního stavu překročit 4,6 kVA.

Maximální výkon na výstupu střídače (maximální 10-minutová střední hodnota) musí být omezen na nejvýše 110% jmenovitého výkonu.

9.1.2 Podmínky pro připojení

K zabránění zavlečení zpětného napětí do sítě PDS je zapotřebí zajistit technickými opatřeními, aby připojení vlastní výroby k síti PDS bylo možné pouze tehdy, když jsou všechny fáze sítě pod napětím.

Zvýšení napětí

Zvýšení napětí vyvolané provozem připojených výroben nesmí v nejnepříznivějším případě (přípojném bodu) překročit 2% pro výroby s přípojným místem v síti vn a 110 kV ve srovnání s napětím bez jejich připojení, současně nesmí být překročeny limity napětí v předávacím místě zdroje podle [8] $\Delta u_{vn,110} \leq 2\%$, pro výroby s přípojným místem v síti nn nesmí překročit 3%, tedy $\Delta u_{nn} \leq 3\%$.

Úroveň napětí musí být posouzena s ohledem na výši skutečné hodnoty napětí v předávacím místě. Pokud je v síti nn a vn jen jedno přípojně místo, je možné uvedené podmínky posoudit jednoduše pomocí zkratového poměru výkonů [11].

Změny napětí při spínání

Změny napětí ve společném napájecím bodě, způsobené připojováním a odpojováním jednotlivých výroben, nevyvolávají nepřijatelné zpětné vlivy, pokud nejvyšší změna napětí pro výroby s předávacím místem v síti nn nepřekročí $\Delta u_{\max,nn} \leq 3\%$, pro výroby s předávacím místem v síti vn platí $\Delta u_{\max,vn} \leq 2\%$.

Toto platí, pokud spínání není častější než jednou za 1,5 minuty. Při velmi malé četnosti spínání, např. jednou denně, může PDS připustit větší změny napětí, pokud to dovolí poměry v síti.

Pro výroby v síti 110 kV platí pro omezení změny napětí vyvolané spínáním:

- a) normální provoz, spínání jedné výrobní jednotky (např. jednoho generátoru větrné turbíny): $\Delta u_{\max,110kV} \leq 0,5\%$
- b) normální provoz, spínání celého zařízení (např. větrného parku): $\Delta u_{\max,110kV} \leq 2\%$
- c) poruchový provoz, pro změnu napětí při spínání celého zařízení platí: $\Delta u_{\max,110kV} \leq 5\%$

Připojování synchronních generátorů

U synchronních generátorů je nutné takové synchronizační zařízení, se kterým mohou být dodrženy následující podmínky pro synchronizaci:

- rozdíl napětí $\Delta U < \pm 10\% U_n$
- rozdíl frekvence $\Delta f < \pm 0,5 \text{ Hz}$
- rozdíl fáze $< \pm 10^\circ$.

V závislosti na poměru impedance sítě k výkonu generátoru může být nutné k zabránění nepřípustných zpětných vlivů na síť stanovit pro spínání užší meze.

Připojování asynchronních generátorů

Asynchronní generátory rozbíhané pohonem musí být připojeny bez napětí při otáčkách v mezích 95% až 105% synchronních otáček. U asynchronních generátorů schopných ostrovního provozu, které nejsou připojovány bez napětí, je zapotřebí dodržet podmínky spínání jako pro synchronní generátory.

Připojování výroben se střídači, event. měniči kmitočtu

Střídače smějí být spínány pouze tehdy, když jejich střídavá strana bez napětí. U vlastních výroben se střídači, schopných ostrovního provozu, které nejsou spínány bez napětí, je zapotřebí dodržet podmínky zapnutí platné pro synchronní generátory.

Zvláštní požadavky na výrobní s obnovitelnými zdroji s výkonem nad 15 MW připojované do sítí 110 kV

Cílem těchto požadavků je nejen zamezit výpadku zdrojů při napěťových poklesech, ale naopak napětí určitým způsobem podporovat, tak jako je tomu u klasických synchronních generátorů. Dalším cílem je reagovat na nárůst frekvence snížením dodávaného činného výkonu ještě předtím, než by došlo k jejich odpojení při nadfrekvenci.

Jmenovitý výkon výrobní ve smyslu těchto ustanovení se určí ze součtu jednotlivých výrobních jednotek v jednom přípojném bodě sítě. Podle toho se např. u větrných elektráren pohlíží na instalovaný výkon celého parku jako na jmenovitý výkon.

Činný výkon výrobních jednotek s OZE musí být říditelný podle pokynů provozovatele PS a DS, aby mohl působit proti ohrožení nebo poruše rovnováhy v systému. Přitom musí být výstupní výkon v každém provozním stavu a z každého provozního bodu redukovatelný na maximální hodnotu výkonu (zadanou hodnotu) udanou provozovatelem sítě. Tuto zadanou hodnotu udává pro přípojný bod provozovatel sítě a odpovídá procentní hodnotě vztahené k přípojnému výkonu zdroje. Snížení dodávaného výkonu na signalizovanou hodnotu musí činit minimálně 10% přípojného výkonu za minutu, aniž by došlo k odpojení zařízení od sítě. Všechny výrobní z obnovitelných zdrojů musí za provozu řídit činný výkon v závislosti na frekvenci sítě podle kapitoly 9.1.1.

Výrobní s obnovitelnými zdroji mohou být zproštěny povinnosti primární regulace. Podle schopnosti konvenčních výrobních zařízení při vzniku náhlé výkonové nerovnováhy v důsledku rozdělení sítí, vytvoření ostrovů a k zajištění obnovy provozu, musí výrobní s obnovitelnými zdroji užívat takové řídicí a regulační charakteristiky, které odpovídají současnému stavu techniky.

Všechny výrobní s obnovitelnými zdroji se musí při výměně jalového výkonu chovat následovně. Dodávky jalového výkonu musí po několika minutách odpovídat hodnotě zadané provozovatelem sítě. Pracovní bod pro výměnu jalového výkonu v ustáleném stavu se stanovuje podle požadavků sítě. Hodnota jalového výkonu se zadává jedním ze tří způsobů: účinník ($\cos \varphi$), hodnota jalového výkonu Q (MVar), hodnota napětí U (kV) - příp. s tolerančním pásmem.

9.1.3 Zpětné vlivy na napájecí síť

Aby nebyla rušena zařízení dalších odběratelů a provozovaná zařízení PDS, je zapotřebí omezit zpětné vlivy místních výroben. Pro posouzení je třeba vycházet ze zásad pro posuzování zpětných vlivů a jejich přípustných mezí [11], [12], [13].

Bez další kontroly zpětných vlivů mohou být výrobní připojeny, pokud poměr zkratového výkonu sítě S_{KV} ke jmenovitému výkonu celého zařízení S_{rA} je větší než 500.

Pokud výrobce nechá své zařízení ověřit v uznávaném institutu, pak lze do posuzování připojovacích podmínek zahrnout příznivější činitel S_{KV}/S_{rG} (<500), kde S_{rG} je zdánlivý výkon generátoru/výrobní jednotky. Pro větrné elektrárny je zapotřebí předložit certifikát, zkušební protokol apod. o očekávaných zpětných vlivech.

Pro individuální posouzení připojení jedné nebo více vlastních výroben v jednom společném napájecím bodu je třeba vycházet z následujících mezních podmínek.

Změna napětí

Dovolená změna napětí pro společný napájecí bod v síti nn je $\Delta u_{\max,nn} \leq 3\%$, a pro společný napájecí bod v síti vn a 110 kV je $\Delta u_{\max,vn} \leq 2\%$. Tyto hodnoty platí za předpokladu dodržení mezí napětí podle [7].

Kolísání napětí (Flikr)

Pro posouzení jedné nebo více výroben v jednom předávacím místě je zapotřebí se zřetelem na kolísání napětí vyvolávající flikr dodržet ve společném napájecím bodě nn a vn mezní hodnotu dlouhodobé míry vjemu blikání $P_{fl} \leq 0,46$ a ve společném napájecím bodě 110 kV mezní hodnotu $P_{fl} \leq 0,37$.

U výrobní s více jednotlivými zařízeními je zapotřebí vypočítat P_{fl} pro každé zvlášť a výslednou hodnotu pro flikr ve společném napájecím bodě určit podle následujícího vztahu:

$$P_{fl, res} = \sqrt{\sum_i P_{fl,i}^2} \quad (9.4).$$

Harmonické a mezipharmonické proudy

Harmonické a mezipharmonické vznikají především u zařízení se střídači nebo měniči frekvence, ale i u jiných generátorů tvořících rozhraní zdroje s elektrickou sítí. Harmonické a mezipharmonické proudy emitované těmito zařízeními musí udat výrobce, např. zprávou o typové zkoušce.

Výrobný v síti nn

Pokud výrobný splňuje požadavky na velikosti emise harmonických proudů I_v s řádem harmonické v podle [9] třída A (tabulka 9.2), resp. [10] (tabulka 9.3 a 9.4), lze považovat vliv emitovaných harmonických proudů na síť DS za přípustný. Pokud nejsou meze těchto norem dodrženy, je možné pro posouzení připojitelnosti bez přidavných opatření použít následující jednoduchá kritéria pro mezní hodnoty harmonických proudů:

$$I_{vnn} = i_{vnn} \cdot \frac{S_{kV}}{\sin \psi_{kV}} \quad (9.5).$$

kde i_v je vztažný proud uvedený v tabulce 9.2 a $\sin \psi_{kV}$ je sinus úhlu impedan-
ce soustavy v místě připojení. Tento výpočetní postup nemůže být použit, pokud je společný napájecí bod v síti vn (např. větrná elektrárna).

Řád harmonické $v (-)$	Mezní vztažný proud $i_{vnn} (A/MVA)$	Řád harmonické $v (-)$	Mezní vztažný proud $i_{vnn} (A/MVA)$
3	3	$25 < v < 40$ liché	$0,15 \cdot 25/v$
5	1,5	sudé	$1,5/v$
7	1	$v < 178^{1)}$	$4,5/v$
9	0,7	¹⁾ Celočíselné a neceločíselné násobky v v pásmu šířky 200 Hz od střední frekvence. Měřeno podle ČSN EN 61000-4-7	
11	0,5		
13	0,4		
17	0,3		
19	0,25		
23	0,2		
25	0,15		

Tab. 9.2: Vztažné proudy harmonických pro výpočet maximální emise výroben připojených do sítí nn

Výrobný v síti vn

Pro pouze jediné předávací místo v síti vn lze určit celkové v tomto bodě přípustné harmonické proudy ze vztažných proudů i_{vnn} z tabulky 9.3, násobených zkratovým výkonem ve společném napájecím bodě:

$$I_{vnn} = i_{vnn} \cdot S_{kV} \quad (9.6).$$

Pokud je ve společném napájecím bodu připojeno několik zařízení, pak se určí harmonické proudy přípustné pro jednotlivá zařízení násobením poměru zdánlivého výkonu zařízení S_A k celkovému připojitelnému nebo plánovanému výkonu S_{AV} ve společném napájecím bodu

$$I_{vn} = i_{vn} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_A}{S_{AV}} \quad (9.7).$$

U zařízení sestávajících z jednotek stejného typu lze za S_A dosadit ΣS_{nE} . To platí též pro větrné elektrárny. U zařízení z nestejných typů jde pouze o odhad.

Celkově přípustné harmonické proudy pro síť vn, vztažené na zkratový výkon, které jsou vyvolány zařízením přímo připojeným do této sítě, jsou uvedeny v tabulce 9.3. Pro harmonické s řády násobků tří platí hodnoty v tabulce 9.3 pro nejbližší řád, a to pouze, pokud se nulová složka proudů z výroby neuzavírá do sítě. Pokud podle tohoto výpočtu dojde k překročení přípustných harmonických proudů, pak v zásadě připojení není možné, pokud podrobnější výpočet neprokáže, že přípustné hladiny harmonických napětí v síti nejsou překročeny.

Řád harmonické $\nu (-)$	Přípustný vztažený proud i_{vn} (A/MVA)		
	Síť 10 kV	Síť 22 kV	Síť 35 kV
5	0,115	0,058	0,033
7	0,082	0,041	0,023
11	0,052	0,026	0,015
13	0,038	0,019	0,011
17	0,022	0,011	0,006
19	0,016	0,009	0,005
23	0,012	0,006	0,003
25	0,010	0,005	0,003
>25 nebo sudé	0,06/ ν	0,03/ ν	0,017/ ν

Tab. 9.3: Vztažené proudy harmonických pro výpočet maximální emise výroben připojených do sítě vn

Výroby v síti 110 kV

Pro tyto sítě udává mezní hodnoty vztažných harmonických proudů pro zařízení připojená do jedné transformovny nebo do jednoho vedení 110 kV následující tabulka 9.4. Tyto hodnoty se vztahují ke zkratovému výkonu v předávacím místě výroby. Limitní hodnoty harmonických proudů se vypočtou ze vztahu:

$$I_{\nu 110kV} = i_{\nu 110kV} \cdot S_{kV} \quad (9.8).$$

Řád harmonické $\nu (-)$	Přípustný vztažený proud harmonických $i_{\nu 110kV}$ (A/GVA)
5	2,60
7	3,75
11	2,40
13	1,60
17	0,92
19	0,70
23	0,46
25	0,32
>25 a sudé	5,25/ ν

Tab. 9.4: Vztažené proudy harmonických pro výpočet maximální emise výroben připojených do sítě 110 kV

Přípustné proudy harmonických jednoho výrobního zařízení se získají pak pro harmonické do řádu 13 takto:

$$I_{v100kV} = i_{v10kV} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_A}{S_0} \quad (9.9).$$

a pro harmonické řádů vyšších než 13

$$I_{v100kV} = i_{v10kV} \cdot S_{kV} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_0}} \quad (9.10).$$

kde S_0 je referenční výkon. Proudů harmonických a meziharmonických řádů vyšších než 13 se nemusí respektovat, když je výkon největšího dodávajícího měniče menší než 1/100 zkratového výkonu sítě v přípojném bodě. Pro harmonické řádu násobku tří se mohou vzít za základ hodnoty pro nejbližší vyšší řád. Proudů harmonických řádů vyšších než 13 se nemusí respektovat, když je výkon největšího dodávajícího měniče menší než 1/100 zkratového výkonu sítě v přípojném bodě. Dodržení přípustných harmonických proudů lze prokázat měření v předávacím místě nebo výpočtem z proudů jednotlivých připojených zařízení. Měření proudů harmonických a meziharmonických se musí provádět podle ČSN EN 61000-4-7 ed.2. Limity pro meziharmonické proudy viz [7].

Vliv na zařízení HDO

Zařízení hromadného dálkového ovládání (HDO) jsou obvykle provozována na vymezených frekvencích v rozmezí 183,3 až 283,3 Hz. Místně použitou frekvenci HDO je zapotřebí zjistit u PDS. Vysílací úroveň je obvykle 1,6% až 2,5% U_n .

Ovlivnění zařízení HDO způsobují převážně výroby a zařízení pro kompenzaci účinníku. Tato zařízení připojená do přípojnice, do níž se vysílá signál HDO, ovlivňují přidávným zatížením vysílače HDO, které plyne z:

- vlastního zařízení výroby,
- zvýšeného zatížením sítě, které je v důsledku výroby k síti připojeno.

V těchto případech se posuzuje vliv výroby na zatížení příslušného vysílače HDO. Vychází se z informace o jeho zatížení, kterou poskytne PDS. Pokud je toto blízké maximu, je připojení bez opatření nepřípustné. Pokud tomu tak není, je přípustné následující zvýšení zatížení vysílače:

- do 5A u vysílače do 110 kV,
- do 2A u vysílače do vn.

Výroby připojované k síti mimo přípojnic, do níž se vysílá signál HDO, smí způsobit snížení úrovně signálu HDO maximálně o 5% za předpokladu, že i po tomto snížení bude dodržena minimální přípustná úroveň signálu HDO určená týdenním měřením. Tato úroveň musí být zaručena i při mimořádných zapojeních sítí. Pro frekvence 183 – 283,3 Hz platí následující minimální úrovně signálu HDO: nn sítě – 150% U_f , vn sítě - 190% U_f , 110 kV sítě - 200% U_f , kde U_f je náběhové napětí přijímače, které obvykle bývá v rozmezí 0,8 – 0,9% U_n [14].

Kromě omezení poklesu hladiny signálu HDO nesmí být též produkována ne-

žádoucí rušivá napětí. Obecně platí, výrobnou vyvolané rušivé napětí, jehož frekvence odpovídá místně použité frekvenci HDO nebo leží v její bezprostřední blízkosti, nesmí překročit 0,1% U_n . V předchozím uvedená napětí, jejichž frekvence je o 100 Hz pod nebo nad místně použitou frekvencí HDO, nesmějí v přípojném bodu překročit 0,3% U_n . Hodnoty 0,1% U_n resp. 0,3% U_n vycházejí z předpokladu, že v síti nn nejsou připojeny více než dvě vlastní výrobní. Jinak jsou zapotřebí zvláštní výpočty [14].

Bez posouzení je možné připojit k síti výrobní, nepřesáhne-li jejich výkon v přípojném bodu a výkon v celé síťové oblasti (včetně výroben již připojených) hodnoty uvedené v tabulce 9.5.

Napětíová úroveň	Celkový výkon výrobních zařízení	
	V přípojném uzlu	V síťové oblasti
0,4 kV	5 kVA 20 kVA (FVE)	10kVA 40 kVA (FVE)
VN	500 kVA	1 MVA
110 kV	5 MVA	10 MVA

Tab. 9.5: Podmínky pro připojení výrobní bez posouzení vlivu na signál HDO

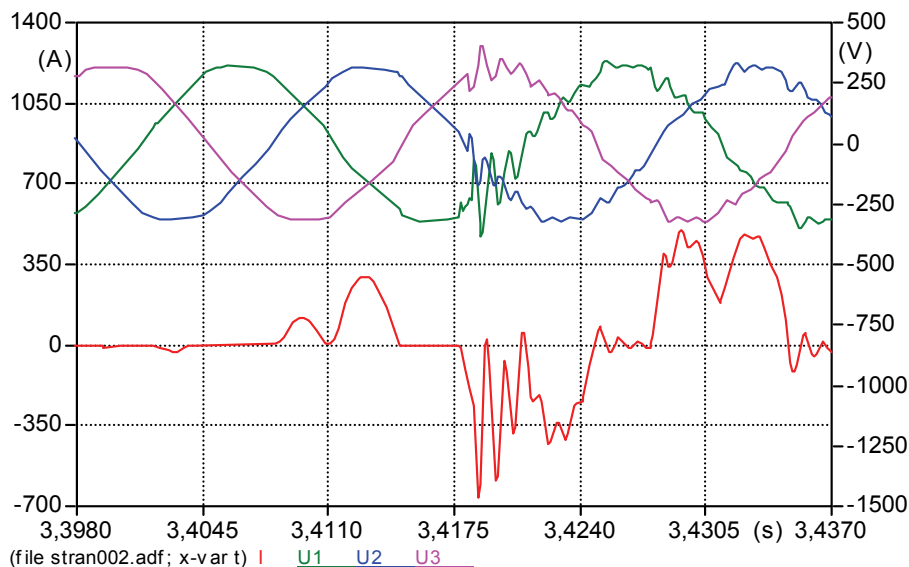
Výrobní zařízení, která mají z hlediska impedancí na frekvenci HDO charakter točivých strojů (větrné výrobní, kogenerace, turbogenerátory atp.) připojované k sítím vn PDS, musí být od instalovaného výkonu 1 MW výše paušálně vybavena hradicím členem. Výjimka je možná pouze na základě výpočtu zpracovaného v přípojovací studii a následného měření jejich vlivu na HDO.

9.2. Praktická analýza vlivu větrných elektráren na síť

9.2.1 Analýza systémů řízení VTE s asynchronními generátory ve spolupráci s frekvenčními měniči

V současné době je většina větrných elektráren v České republice vybavena asynchronními generátory jako zdroji elektrické energie. Pro větrné elektrárny malých a středních výkonů cca do 300 kW jsou nejčastěji používány asynchronní generátory s kotvou nakrátko s připojením k distribuční soustavě přes tyristorový spouštěč (softstart), popř. asynchronní generátory s přepínáním počtu pólů. Výhodou uvedených systémů je jejich poměrně jednoduchá konstrukce a s tím vyplývající malá náročnost na údržbu. Jejich nevýhodou je především malá účinnost systému při nižších rychlostech větru, jelikož dodávka činného výkonu je podmíněna nadsynchronními otáčkami asynchronního generátoru. Mezi další nevýhody patří nedostatečná kompenzace jalového výkonu, která je ve většině případů řešena jako stupňovitě spínaná, a nežádoucí přechodné děje, které souvisejí se spínáním asynchronního generátoru k distribuční soustavě, resp. s připojením kompenzačního zařízení. Na obrázku 9.2 je na ukázkou uveden detail připojení systému s asynchronním generátorem s kotvou nakrátko s připojením k distribuční soustavě přes tyristorový spouštěč (150 kW, 400 V, zapojení D). Pokud je jako spínací zařízení využito tyristorový spouštěč, je možné změnou řídicího úhlu polovodičových prvků optimalizovat proudový ráz provázející připojení, což je z obrázku 9.2 zřejmé. Pokud však dojde v okamžiku připojení větrné elektrárny k distribuční soustavě

k prudké změně momentu na hřídeli větrného motoru vlivem výrazné turbulence větrného proudění, řídicí systém není schopný reagovat na tuto změnu a připojení není plně optimalizováno. To se projeví deformací průběhu proudu stroje a tomu odpovídající deformaci napětí v místě připojení větrné elektrárny (viz Obr. 9.2). Deformace napětí a proudu je dále umocněna, pokud je výkon z větrné elektrárny vyveden do přípojného bodu distribuční soustavy dlouhým kabelovým vedením. Pokud je přípojný bod větrné elektrárny zvolen jako koncový v paprskovém uspořádání distribuční soustavy, může být ovlivnění napětí soustavy v daném bodě taktéž výrazné.

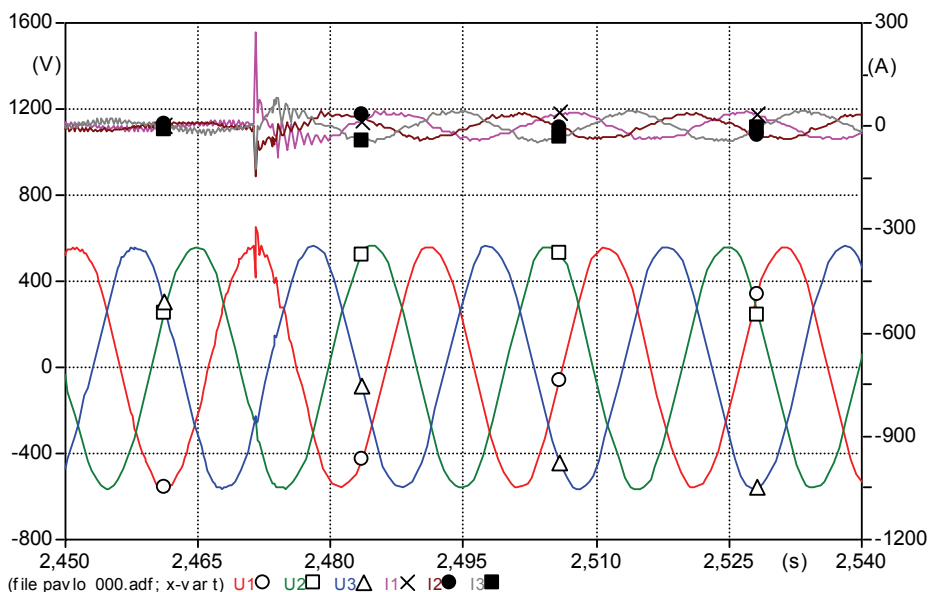


Obr. 9.2: Detail připojení systému s asynchronním generátorem s kotvou nakrátko, průběh fázového napětí U_1 , U_2 , U_3 , (V) (pravá osa) a proudu jedné fáze statorovým vinutím I (A) (levá osa).

Pro větrné elektrárny velkých výkonů (850 kW, 2 MW) jsou v současnosti nejvíce využívány systémy řízení s asynchronními generátory s vinutým (kroužkovým rotorem), které využívají spolupráci frekvenčního měniče s rekuperační jednotkou. Jedná se o systém v tzv. kaskádním zapojení. S využitím řídicího systému větrné elektrárny s frekvenčním měničem je možné lépe využít energii větrného proudění a zajistit tak stabilnější dodávku elektrické energie do distribuční soustavy.

Pokud systém pracuje v kaskádě, je stator generátoru přímo připojen do elektrizační soustavy (přes NN/VN transformátor) a vinutý rotor generátoru je napájen z frekvenčního měniče. Chod tohoto zařízení je zabezpečován multiprocesorově. Systémem řízení je vyhodnocována rychlost větru a otáčky větrného motoru a tomu je přizpůsobena momentová charakteristika stroje. Průběh napětí a proudu na rotoru generátoru je tedy řízen tak, aby docházelo k maximálnímu využití větrné energie za předpokladu minimálních negativních vlivů na distribuční soustavu. Výkon řízený frekvenčním měničem je vzhledem k výkonu generátoru zlomkový, a proto mohou být jeho vlivy na distribuční síť nepatrné. Řídicí systém dále zabezpečuje připojování do sítě s minimálním proudovým rázem v generátorickém chodu a

bez výrazných přepětových dějů. Na obrázku 9.3 je zobrazen detail připojení systému větrné elektrárny s asynchronním generátorem s kroužkovou kotvou v tzv. kaskádním zapojení (2MW, 690V, zapojení D). Z obrázku je zřejmá optimalizace připojení větrné elektrárny k distribuční soustavě bez vysokofrekvenčního přechodného děje s proudovým rázem odpovídajícím maximálně 1/3 jmenovitého proudu generátoru. U moderních větrných elektráren je pro omezení proudových rázů dále využito přepínání statorového vinutí Y-D.



Obr. 9.3: Detail připojení systému s asynchronním generátorem s kroužkovou kotvou v kaskádním zapojení, průběh fázového napětí U_1 , U_2 , U_3 , (V) (levá osa) a proudů statorových vinutí I_1 , I_2 , I_3 (A) (pravá osa).

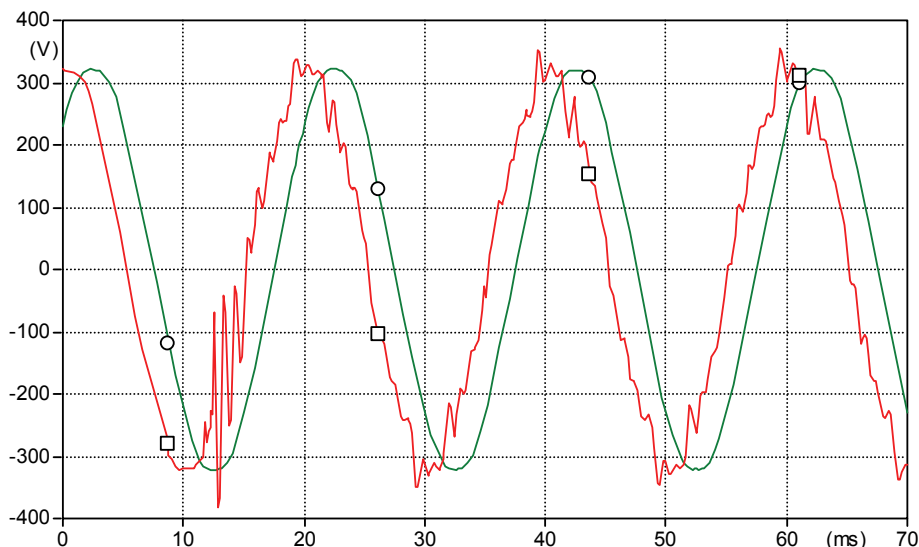
Speciální rotorové vinutí je napájeno přes kroužky z rekuperačního měniče frekvence. Pro vyhlazení průběhů napětí a proudu jsou mezi měničem a rotorovým vinutím umístěny tlumivka a sinusový filtr.

Pro spínání, resp. připojování VE k soustavě, je definován tzv. činitel proudového rázu. Ten je dán poměrem proudového zapínacího rázu ku jmenovitému proudu generátoru a je roven 4 pro asynchronní generátory připojované s 95 až 105% synchronních otáček.

Prioritou pro provozovatele distribuční soustavy je maximální eliminace nežádoucích vlivů provozu větrných elektráren na distribuční soustavu. Tyto vlivy jsou dány především způsobem připojení generátoru větrné elektrárny k distribuční soustavě, parametry přípojného bodu distribuční soustavy (zkratový výkon) a volbou měřicího a řídicího zařízení. Způsob připojení k distribuční síti stanoví příslušný provozovatel distribuční soustavy na základě daných síťových poměrů, výkonu a způsobu provozu vlastní výroby. Důležitá je vhodná volba samotného spínacího zařízení. Při spínání může docházet ke krátkodobé změně napětí, povolená tolerance dle [6] je $\leq 3\%$ jmenovitého napětí pro elektrárny s připojovacím místem v síti NN, pokud spínání není častější než jednou za 90 sekund. Pro větrné elektrárny s

asynchronními generátory může při připojování dojít vlivem vnitřních přechodných dějů ke vzniku krátkodobých poklesů. Takový pokles smí dosáhnout dvojnásobku jinak přípustné hodnoty (cca 6% pro NN), pokud netrvá déle než 2 periody. Pro větrné elektrárny platí speciální činitel spínání závislý na poměrech soustavy, jímž se hodnotí jejich spínání, a který také respektuje zmíněné velmi krátké přechodné děje.

Pro srovnání je na obrázku 9.4 zobrazen průběh okamžitých hodnot fázového napětí v přípojném bodě větrné elektrárny pro systém s asynchronním generátorem s kotvou nakrátko (150 kW, 400 V, zapojení D) a systém s asynchronním generátorem s kroužkovou kotvou v kaskádním zapojení (2 MW, 690 V, zapojení D) v okamžiku připojení větrné elektrárny k distribuční soustavě (čas 12 ms). Z obrázku je opět zřejmé, že pokud je optimalizován proces připojení větrné elektrárny k distribuční soustavě s využitím řízení rekuperačního měniče frekvence (U1f Obr. 9.4), nedojde k výraznému přechodnému ději a jeho superpozici na ustálený průběh napětí soustavy. Pokud je větrná elektrárna připojena k distribuční soustavě prostřednictvím tyristorového spouštěče, je omezen proudový ráz, avšak může dojít ke vzniku přepětí (U1f Obr. 9.4).



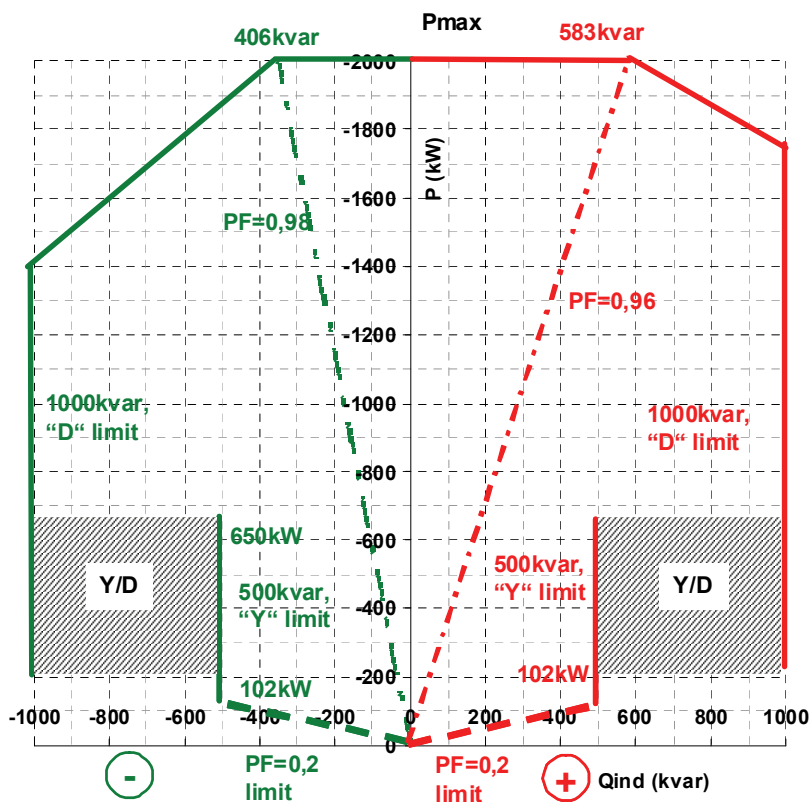
Obr. 9.4: Průběh okamžitých hodnot fázového napětí v přípojném bodě větrné elektrárny pro systém s asynchronním generátorem s kotvou nakrátko a systém s asynchronním generátorem s kroužkovou kotvou v kaskádním zapojení.

Zdroje elektrické energie větrných elektráren musí být dle [6] vybaveny pro některý z následujících režimů řízení jalového výkonu:

- udržování zadaného účinníku,
- udržování zadané hodnoty jalového výkonu (odběr/dodávka) v rámci provozního diagramu stroje,

- udržování napětí v předacím místě (výstup generátoru, za blokovým transformátorem).

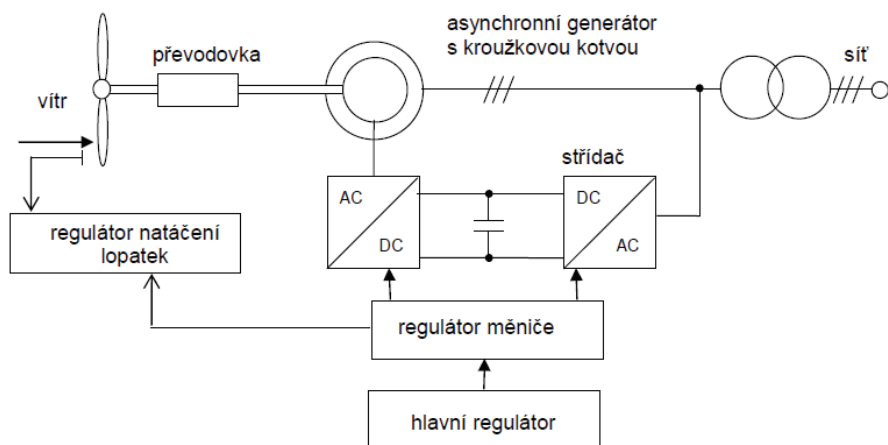
Generátor musí být schopen dodávat výkon v rozmezí účinnků 0,85 (dodávka jalového výkonu induktivního charakteru) až po -0,95 (dodávka jalového výkonu kapacitního charakteru) při dovoleném rozsahu napětí na svorkách generátoru a při kmitočtu v rozmezí 48,5 až 50,5 Hz. U kompenzačního zařízení zdrojů je zapotřebí přihlížet ke způsobu provozu vlastní výroby a z toho vyplývajících zpětných vlivů na napětí soustavy. Při silně kolísajícím výkonu pohonu větrných elektráren musí být kompenzace jalového výkonu automaticky a dostatečně rychle regulována. Jak již bylo zmíněno v úvodní části textu, nedostatečná kompenzace při kolísavém výkonu je nevýhodou především systémů s asynchronními generátory s kotvou nakrátko, která je řešena jako stupňovitě spínaná. Uvedenou nevýhodu řeší využití frekvenčního měniče, který umožňuje 4kvadrantový provoz, účinník systému řízení se pak většinou pohybuje v rozmezí 0,96 induktivního charakteru až 0,98 kapacitního charakteru. U strojů napájených z frekvenčních měničů s vektorově orientovaným řízením je tedy možné dosáhnout optimálního řízení magnetického toku a snížení potřebné jalové energie.



Obr. 9.5: Provozní diagram systému s frekvenčním měničem v kaskádním zapojení (2 MW, 690 V, zapojení D)

Na obrázku 9.5 je zobrazen PQ diagram systému větrné elektrárny s frekvenčním měničem (2 MW, 690 V, zapojení D). Obr. ukazuje, že pomocí systému s frekvenčním měničem v kaskádním zapojení je možné regulovat dodávku činného výkonu s konstantním účínkem (resp. činitelem výkonu) v režimu dodávky jalové energie induktivního charakteru (červená křivka na Obr. 9.5), resp. dodávky jalové energie kapacitního charakteru (zelená křivka na Obr. 9.5). Po dohodě s provozovatelem distribuční soustavy, do níž je větrná elektrárna připojena, je ovládacím systémem větrné elektrárny vymezena oblast provozu dle PQ diagramu.

V následující části bude provedena analýza kvality dodávky elektrické energie systému řízení větrné elektrárny s asynchronním generátorem (2 MW, 690 V, zapojení D) s kroužkovou kotvou v kaskádním zapojení s frekvenčním měničem napěťového typu dle blokového schéma naobrázku 9.6.



Obr. 9.6: Blokové schéma systému s frekvenčním měničem v kaskádním zapojení

Jak již bylo výše zmíněno, při provozu větrné elektrárny lze předpokládat vliv na parametry distribuční soustavy. Interakce mezi distribuční soustavou a analyzovanou větrnou elektrárnou je definována v tzv. společném napájecím bodě.

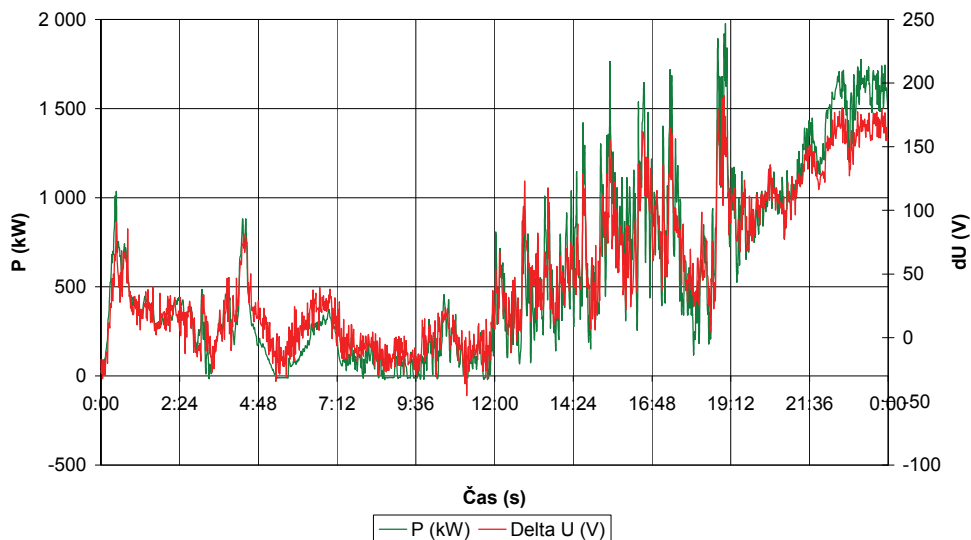
Pro provozovatele distribuční soustavy je prioritou zajištění stabilní dodávky elektrické energie pokud možno s neměnnými systémovými parametry.

Z hlediska kvality dodávané energie je třeba sledovat zejména:

- Změny napětí.
- Flicker – kolísání napětí.
- Ovlivnění zařízení hromadného dálkového ovládání.

Dle [6] je dáno, že změna napětí vyvolaná dodávkou výkonu z připojených zdrojů, v našem případě větrných elektráren nesmí přesáhnout 2 % z U_N pro větrné elektrárny připojené do sítě VN. V našem případě jsou větrné elektrárny připojeny do sítě 22 kV, tzn. fázové napětí je cca 12,7 kV, potom maximální povolené zvýšení napětí je o 254 V. Jak ukazuje graf na obrázku 9.7, změna napětí ΔU kopíruje změnu dodávaného výkonu. Při maximálním dodávaném výkonu 2 MW v době

okolo 19:12 došlo ke zvýšení napětí maximálně o cca 200 V, což vyhovuje podmínce definované pravidly provozování distribučních sítí.



Obr. 9.7: Vliv dodávaného výkonu z větrných elektráren na změnu napětí v místě připojení

Flikr je definován jako lidským okem postřehnutelné kolísání světelného toku světelných zdrojů v důsledku periodického kolísání či poklesů/změn napětí. Tyto změny napětí jsou obecně způsobeny změnami zatížení u odběratelů nebo změnami při generování výkonu. Pokud analyzujeme teoretické možnosti vzniku flikru, který provází provoz větrných elektráren, je možné určit dvě základní příčiny jeho vzniku: vliv poryvů větru a vliv tubusu větrné elektrárny.

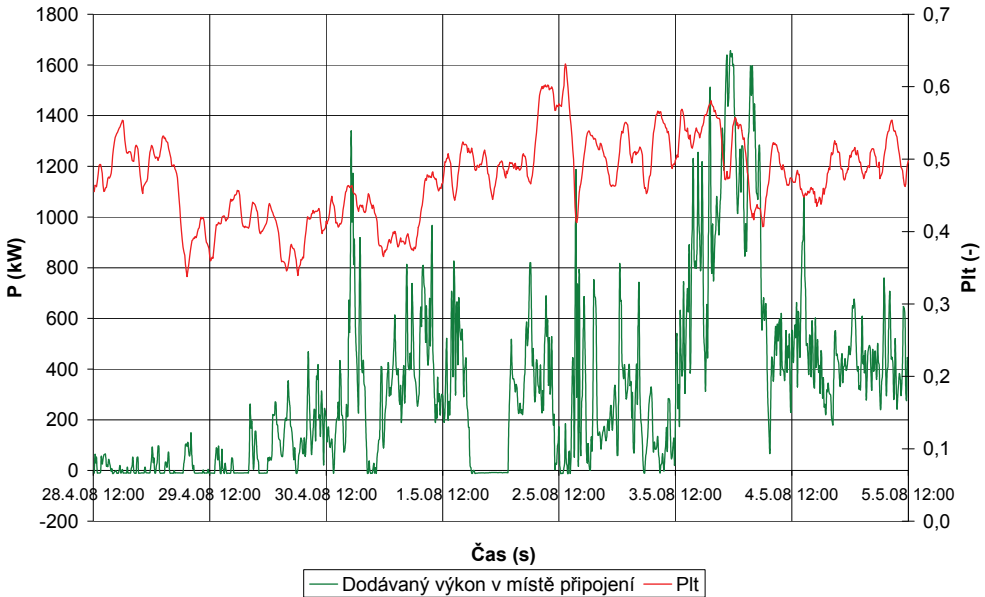
Vliv poryvů větru se při krátkodobých odchylkách rychlosti větru od její střední hodnoty eliminuje vlastní setrvačností rotačních částí větrné elektrárny, vliv silnějších poryvů více či méně eliminuje výkonové řízení turbíny. Vliv tubusu větrné elektrárny (stožáru) se potlačuje mnohem hůře. Tubus pro proudící vítr představuje překážku, která ho zpomaluje. Jako parametr určující flikr se však nepoužívá přímo úbytek napětí způsobený flikrem, ale veličina nazývaná emise flikru nebo také míra vjemu flikru. Rozlišujeme krátkodobou (short term) emisi flikru P_{st} , měřenou nebo počítanou v časovém intervalu deset minut a dlouhodobou (long term) emisi flikru P_{lt} , určenou pro interval dvou hodin.

Obecně platí, že čím více listů má větrná turbína, tím je emise flikru menší. Systémy s měničem kmitočtu ve většině případů vykazují menší emise než systémy s asynchronním generátorem zapojeným přímo.

Pravidla provozování distribuční soustavy opět definují maximální povolené hodnoty dlouhodobé míry vjemu flikru P_{lt} a to tak, že nesmí překročit hodnotu 0,46. Hodnotou 0,46 je míněn příspěvek k celkovému P_{lt} způsobený zdrojem, tzn. větrnou elektrárnou. Pro místo připojení byla zjištěna hodnota 95% percentilu $P_{lt} = 0,587$ (průměrná hodnota ze tří fází: 0,581, 0,604, 0,577), tzn., že po 95% času monitorování (jeden týden) byla hodnota dlouhodobého flikru mešší než uve-

dená. Vzhledem k tomu, že norma [7] respektive [5] stanovuje přípustnou hodnotu 95% percentilu P_{It} rovno 1, můžeme konstatovat, že místo připojení splňuje požadavky dané normou.

Jak ukázalo provedené měření, jehož výsledky jsou zobrazeny v grafu na obrázku 9.8, nelze prokázat vliv velikosti dodávaného výkonu na míře vjemu flickru P_{It} . Na obrázku můžeme vidět průběh P_{It} v období jednoho týdne, kde se hodnota P_{It} pohybuje od 0,338 až po 0,631. Vzhledem k povolené hodnotě $P_{It} = 1$ a námi zjištěné nejvyšší 95% hodnotě $P_{It} = 0,604$ lze vyvozovat, že VTE nepřekračuje povolený příspěvek 0,46 z celkové hodnoty P_{It} a námi je zjištěnou hodnotu 0,604 je nutno brát spíše jako pozadí sítě.

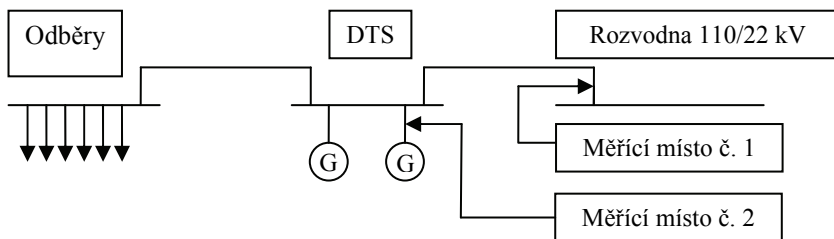


Obr. 9.8: Vliv výkonu dodávaného z větrné elektrárny na P_{It}

9.2.2 Vliv provozu větrné elektrárny na parametry napájecí soustavy VN rozvodny

Pro zjištění zpětných vlivů připojených větrných elektráren bylo realizováno měření výkonové bilance paprsku distribuční sítě, na který jsou sledované větrné elektrárny připojeny, zjednodušené schéma připojení VE je zobrazeno na obrázku 9.9.

Měřicí místo č. 1 bylo na vývodu sledovaného paprsku distribuční sítě v rozvodně 110/22 kV. Měřicí místo č. 2 bylo umístěno v distribuční trafostanici (DTS), tzn. v místě připojení větrných elektráren k distribuční síti. Měření bylo realizováno pouze pro jednu větrnou elektrárnu. Oba měřicí přístroje byly časově synchronizovány a byly měřeny veličiny U , I , $\cos \phi$ ve všech třech fázích.



Obr. 9.9: Zjednodušené schéma připojení větrných elektráren k paprsku

Při vyhodnocení naměřených dat byly zjištěny tři stavy výkonové bilance a to:

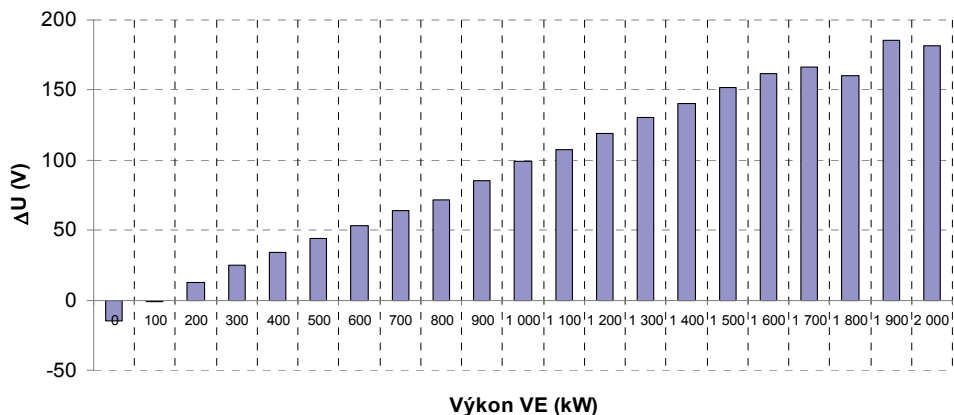
- stav – připojené větrné elektrárny pokryjí spotřebu odběratelů připojených ke sledovanému paprsku a navíc větrné elektrárny dodávají přebytečný výkon do distribuční sítě přes nadřazenou rozvodnu 110/22kV.
- stav – připojené větrné elektrárny přesně pokryjí svou výrobou spotřebu odběratelů připojených ke sledovanému paprsku (jedná se o vyrovnanou výkonovou bilanci, do nadřazené rozvodny ani z rozvodny neteče žádný výkon)
- stav – připojené větrné elektrárny nepokryjí spotřebu odběratelů připojených ke sledovanému paprsku, je proto nutné dodávat chybějící výkon z rozvodny, ke které je sledovaný paprsek připojený.

Velikost dodávaného výkonu má přímý vliv na velikost napětí U_1 v místě připojení tzn. v DTS. Dle našeho měření neexistuje přímá souvislost mezi dodávaným výkonem a kolísáním napětí U_2 v nadřazené rozvodně 110/22 kV, do které je sledovaný paprsek připojený.

Lze však na základě tohoto označení napětí definovat odchylku napětí ΔU jako rozdíl napětí v místě připojení U_1 a napětí v rozvodně U_2 , matematicky vyjádřeno vztahem:

$$\Delta U = U_1 - U_2 \quad (9.11),$$

Závislost výkonu dodávaného větrnou elektrárnou na odchylce napětí je možné vidět na obrázku 9.10, kde je patrné, že v situaci, kdy větrná elektrárna dodává do sítě výkon v rozmezí od 0 do 100 kW, je napětí v rozvodně vyšší než v místě připojení, což je způsobeno úbytkem napětí na vedení. V případě, že větrná elektrárna dodává výkon větší než 100 kW, napětí v místě připojení vzroste natolik, že odchylka napětí ΔU se dostává ze záporných hodnot a postupně se zvyšujícím se dodávaným výkonem a v důsledku toho i napětí U_1 v místě připojení větrných elektráren roste. Tento nárůst má lineární charakter. Odchylky od lineárního trendu nárůstu jsou s největší pravděpodobností způsobeny malým počtem naměřených hodnot pro sledovanou velikost dodávaného výkonu.



Obr. 9.10: Závislost odchytky napětí na výkonu

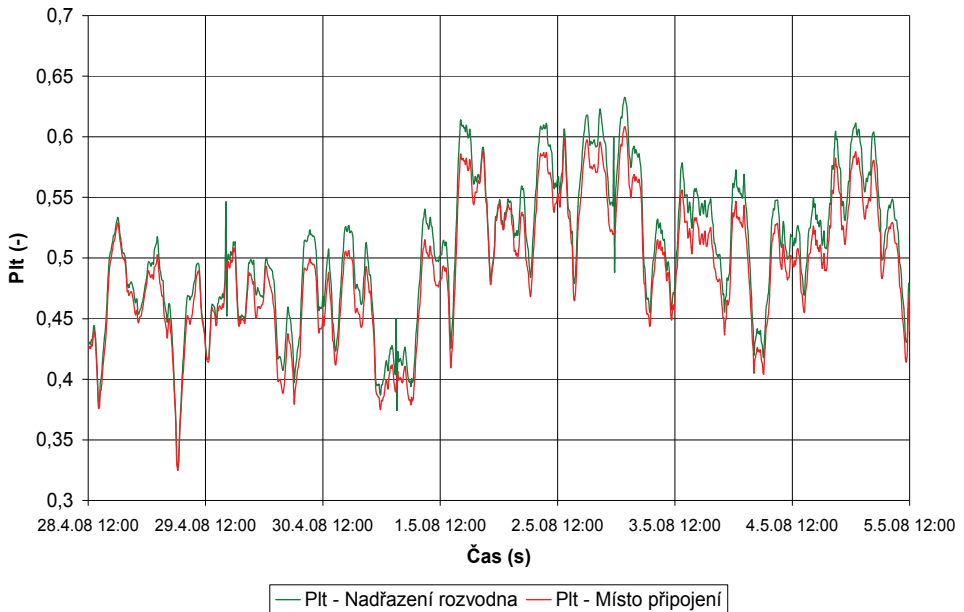
Z vyhodnocení naměřených dat dále vyplývá, že provoz větrné elektrárny nijak znatelně neovlivňuje dlouhodobou míru vjemu flikru, jak v místě připojení, tak v nadřazené rozvodně. Pro jednotlivé fáze jsou hodnoty 95% percentilů P_{it} zobrazeny v tabulce 9.6.

	1 fáze	2 fáze	3 fáze
Místo připojení	0,581	0,604	0,577
Nadřazená rozvodna	0,603	0,631	0,598

Tab. 9.6 Hodnoty P_{it} pro jednotlivé fáze v místě připojení VTE a nadřazené rozvodně

V grafu na obrázku 9.11 je možno vidět srovnání průběhu P_{it} ve sledovaném období, zeleně je zobrazen průběh P_{it} v nadřazené rozvodně, červeně potom průběh P_{it} v místě připojení. Jak je z grafu patrné, je P_{it} v nadřazené rozvodně vyšší, což potvrzuje správnost úvahy, že příspěvek VTE k celkové hodnotě P_{it} je v podstatě zanedbatelný oproti pozadí sítě.

Při analýze celkového harmonického zkreslení napětí $THDu$ také nebyla shledána žádná souvislost se změnami dodávaného výkonu z větrné elektrárny a činitel celkového harmonického zkreslení se pohyboval okolo hodnoty 0,6% s ojedinělými odchylkami do 1,8% v místě připojení větrné elektrárny. V nadřazené rozvodně byla naměřena průměrná hodnota celkového harmonického zkreslení napětí $THDu = 0,7%$ s ojedinělými nárůsty až do 2,2%. Avšak časová souslednost mezi nárůsty $THDu$ v místě připojení větrných elektráren a v nadřazené rozvodně nebyla prokázána.



Obr. 9.11: Srovnání P_{It} nadřazené rozvodny a místa připojení VTE

9.3. Spolehlivost dodávky elektrické energie z OZE

Jak již bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, kvalita elektrické energie není dána pouze kvalitou napětí, ale také spolehlivostí dodávky elektrické energie, v tomto případě spolehlivostí výroby z OZE. V této souvislosti je důležitým kritériem plánování výroby a spotřeby elektrické energie.

Některé druhy obnovitelných zdrojů, zvláště ty, které nevyžadují pro svůj provoz nějaký druh paliva, se vyznačují velkou nerovnoměrností dodávek energie. Z tohoto důvodu jsou úvahy o nahrazení významné části spotřeby elektřiny těmito zdroji problematické. Jednou z možností, jak posoudit realizovatelnost využití obnovitelného potenciálu, je porovnat celkový výkon těchto zdrojů v různých obdobích s diagramem spotřeby energie.

Fotovoltaické elektrárny

Tento typ zdrojů je charakteristický velmi rychlými změnami výroby energie, jelikož tato závisí nejen na denním období, ale také na pokrytí oblohy oblačností, změny výkonu o desítky procent jsou možné v řádu desítek, někdy i jednotek minut. U fotovoltaických článků rozptýleně instalovaných na rodinných domcích a jiných budovách, které disponují výkonem v řádu kW, není vliv na síť příliš výrazný, neboť se část energie spotřebuje v místě výroby. Problémy mohou nastat, pokud je vysoký počet těchto malých zdrojů připojen na síť 0,4 kV napájenou z jednoho transformátoru 22/0,4 kV, př. na vesnici. Při plném slunečním svitu pak může docházet k přetoku energie na vyšší napětovou hladinu, pokud není dostatečný odběr domácností ze sítě, což mohou vyhodnotit chybně ochrany vedení vn. Velké fotovoltaické elektrárny o výkonu řádově až MW mají na elektrizační soustavu již

větší vliv, rychlé změny výkonu mohou mít za následek kolísání napětí v místě připojení (většinou vn), větší počet těchto elektráren v oblasti s výhodnými podmínkami pak bude vyžadovat stavbu nových vedení, která nebudou po většinu času vytížená, v případě vyšších výkonů i posilování stávajících rozveden (110/22 kV). Výkyvy výroby způsobené přechodnou oblačností jsou náhodné a tudíž je malá pravděpodobnost, že by na celém území došlo v jedné chvíli k markantnímu poklesu nebo zvýšení produkce elektrické energie z FVE.

Na základě uvedených skutečností lze říci, že vzhledem k velké diskontinuitě mezi dodávkou z FVE a spotřebou je tento typ výroben nutné chápat jako doplňkový zdroj energie s celkovým instalovaným výkonem maximálně ve stovkách MW, aby bylo možné výkyvy výroby regulovat stávajícími zdroji i při splnění kritéria N-1.

Větrné elektrárny

Situace u větrných elektráren je podobná jako u slunečních, v několika aspektech se však liší. Především je to jiný tvar denního diagramu výroby, protože vítr fouká i v noci, i když ne tak často jako ve dne, jinak je průběh výroby prakticky nahodilý bez výrazných závislostí. Další odlišností od fotovoltaických elektráren je pomalejší kolísání výkonu, pokles či vzrůst výroby o více než 50 % je otázkou hodiny, či více. Tato výhoda je však vlastností spíše moderních velkých strojů o výkonech v řádu MW, neboť tyto mají větší hmotnost točivých hmot a tím větší setrvačnost.

Nynější instalovaný výkon VTE v naší republice je přibližně 1 GW, rozdíl oproti fotovoltaice je ve větší koncentraci v určitých oblastech a ve větším jednotkovém výkonu – větrné farmy. Problémem těchto větších zdrojů je fakt, že příznivé podmínky pro využití větru jsou většinou v místech, kde je málo rozvinutá síťová infrastruktura, neboť je zde řídké osídlení a málo průmyslu (Krušné hory, Jeseníky, Českomoravská vrchovina). Pro vyvedení výkonu bez omezení je proto třeba stavět nová vedení (většinou 22 kV) o délce často desítky km do vhodné rozvodny. Vedení 110 kV jsou však díky těmto zdrojům v některých oblastech na hranici své kapacity a transformační výkon do přenosové soustavy je také místy vyčerpán, stejně jako zkratová odolnost rozveden [23], množí se proto požadavky investorů na připojení do přenosové soustavy přímo. Instalovaný výkon těchto zdrojů není zatím příliš vysoký, nevyskytují se tedy větší problémy se zálohováním a větrné farmy jsou poměrně rozptýlené, nedochází tedy k nárazovému zatěžování přenosové soustavy v určitém směru, jak je tomu v Německu.

Odhad využitelného potenciálu větrné energie na území ČR je přibližně 2500 MW, přičemž byla vzata v úvahu místa nevhodná, jako chráněná území, ochranná pásma různých technologií, kulturní památky, místa s nedostatečnou kapacitou sítě apod. Tento výkon již podstatně ovlivní přenosovou soustavu, uváží-li se průběh odběru v letních měsících, představuje výkon generovaný větrnými elektrárnami podstatnou část spotřeby. Nastane-li pak situace, kdy např. přechází studená fronta obvykle doprovázená silným větrem (někdy i v nočních nebo brzkých ranních hodinách), pak většina větrných zdrojů v dané oblasti či v celé republice pracuje s nadpolovičním nebo téměř plným výkonem. S tímto náhlým zvýšením produkce přichází nutnost regulace výkonu již pracujících elektráren, což by mohlo znamenat odstavení všech vodních a většiny uhelných elektráren.

Distribuce elektrické energie do zahraničí může být teoreticky až 2,5 GW, v letním období se ovšem reálně pohybuje kolem 1 až 1,5 GW (údaje ERÚ za rok 2008), takže pokud není uvažována regulace jaderných elektráren a výkon větrných elektráren bude kolem 2 GW, zbývá pouze 1-1,5 GW dodávaný ostatními zdroji.

Případná kumulace většího počtu větrných farem v jedné oblasti může též přinášet potíže v době, kdy je kapacita vedení a transformačních stanic vyčerpána, např. pokud je přenosová soustava v severních Čechách zatížena náhlým zvýšeným výkonem z německých větrných elektráren a současně začnou dodávat do sítě elektrinu farmy v Krušných horách. Je tedy zřejmé, že tak masivní výstavba větrných elektráren není při stávajících podmínkách uskutečnitelná, pouze při značném posílení přenosové a distribuční soustavy a výstavbě dalších, rychle startujících záloh či přečerpávacích elektráren. Jinou variantou je možnost odpojování větrných farem nebo snižování jejich výkonu v případě potřeby z dispečinku provozovatele distribuční soustavy (do 110 kV), což ovšem vyžaduje odpovídající možnosti regulace elektrárny a možnost dálkové komunikace s řídicím software.

Předpovědi rychlosti větru na 24 hodin dopředu jsou sice již poměrně spolehlivé, přesto se vyskytují odchylky od skutečnosti až o desítky procent, částečná záloha tedy musí být k dispozici stále. Při velkém instalovaném výkonu v těchto nestabilních zdrojích musí být k dispozici stejný výkon i v jiných, většinou fosilních zdrojích, neboť nastávají i delší minimálně větrná období, kdy výkon VTE klesá téměř k nule, při rychlosti větru $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je dodávaný výkon asi 10% jmenovitého. Ekonomika těchto zálohových zdrojů je pak dosti špatná a opakované najíždění a odstavování fosilních zdrojů také příliš nepřispívá k tolik proklamované ekologii.

Elektrárny na biomasu

Ve srovnání s výše uvedenými zdroji závislými na rozmarech počasí jsou elektrárny využívající biomasu poměrně spolehlivými zdroji nezatěžujícími síť častým kolísáním výkonu. Přesto se mohou vyskytnout a vyskytují se neplánované výpadky výroby elektřiny způsobené různými faktory. Jedním z nich je kvalita a ověřenost použitých technologií při stavbě stanice, neboť některé části zařízení nebývají dlouhodobě vyzkoušené a při provozu mohou způsobovat výpadky. Dalším faktorem je kvalita dodávané biomasy.

Důvodem pro přerušení výroby může být pochopitelně i nedostatek surovin pro zpracování, ať už pro bioplynové stanice nebo elektrárny spalující biomasu, pokud například provozovatel nenasmlouvá dodávky nebo není možné dopravit palivo kvůli nepřízní počasí (v zimě). S uvedenými potížemi souvisí často i předimenzování jednotek, zařízení pak pracuje jen část dne, po zbytek dne dodává teplo z akumuláčnických nádrží. Tato situace nastává především v létě, kdy je odběr tepla jen asi třetinový, bez něj není provoz KJ ekonomický, dojde tedy k odstavení celé elektrárny, případně je v provozu např. jedna ze dvou jednotek.

Z hlediska lokálního významu, mohou jednotky s vyšším instalovaným výkonem (MW) ovlivnit distribuční síť 22 kV, do které jsou většinou připojovány. Protože při poruchovém odstavení náhle klesne výkon dodávaný do soustavy na nulu, dojde k poklesu napětí v bodě připojení, případně i v uzlu, který byl předtím napájený ze dvou stran, je třeba regulovat též na straně nn. Pokud k výpadku dojde v době vysokého odběru elektrické energie, může také nastat problém s nedostatkem

transformačního výkonu v rozvodnách 110/22 kV, naopak v případě najetí v době malého odběru může nastat přetok do vyšší napěťové hladiny, což vyžaduje přenastavení ochrany atd. Při plánovaných odstaveních, např. z důvodu nedostatku paliva, malém odběru tepla apod., lze těmto negativním vlivům částečně předejít včasným ohlášením dispečinku provozovatele DS.

Vodní elektrárny

Co se týká vlivu na síť, jsou vodní elektrárny veskrze přínosné, neboť na rozdíl od jiných zdrojů umožňují rychlé přifázování do sítě v řádu minut (nejrychlejší plynové turbíny mají cca 15 min.). Avšak regulace se zúčastňují pouze velké elektrárny ovládané z centrálního dispečinku, kdežto malé zdroje o výkonu do 10 MW jsou většinou řízeny přímo na místě (v některých případech je možnost řízení z dispečinku provozovatele DS). Malé vodní elektrárny tedy mohou v určitých případech působit na elektrizační síť i negativně, ale vzhledem k jejich jednotkovému výkonu je vliv omezen na distribuční soustavu, kam se obvykle připojují. Jelikož jsou tyto zdroje instalovány většinou na horních nebo menších tocích, průtok bývá značně kolísavý, elektrárny tedy často pracují v akumulačním režimu, dochází k regulaci výkonu nebo odstavení, což může nepříznivě ovlivnit např. napěťové poměry v síti nn i vn (např. při vyvedení výkonu ve stovkách kW do nn), podobně jako u jiných významných zdrojů, kolísání výkonu ale není tak časté jako u větrných el. nebo fotovoltaiky. Ovšem stejně jako u jiných zdrojů, v případě najetí MVE při nízkém odběru ze sítě může nastat přetok výkonu do vyšší napěťové hladiny. U průtočných elektráren se jedná především o sezónní výkyvy, např. v letním suchším období je malý průtok, stejně jako v zimě, někdy tok zamrzne úplně a elektrárna se musí odstavit.

K okamžitému odstavení může dojít například při povodních, pokud hrozí poškození turbíny, jak se to stalo na Vltavské kaskádě v roce 2002, kdy bylo nutné na pokrytí výpadku spustit přečerpávací elektrárny, nebo v zimě, když se ledové kry hromadí na česlích a blokují průtok vody a samozřejmě také při poruše zařízení. Poruchovost je ale u těchto elektráren poměrně nízká, neboť jsou relativně jednoduché.

Celkový instalovaný výkon vodních elektráren v naší republice (včetně přečerpávacích) je přibližně 2,2 GW (dle ERÚ), z toho jen asi 300 MW připadá na malé vodní elektrárny. Výhodou je, že jsou tyto malé zdroje celkem rovnoměrně rozmístěné, nezpůsobují tak nárazy výkonu v jedné oblasti, jako např. větrné farmy, a kolísání výkonu je také víceméně náhodné, takže nároky na zálohování nejsou tak velké jako u ostatních obnovitelných zdrojů. Technický potenciál MVE je vyčerpán již téměř z poloviny a zbývající lokality nejsou většinou pro investory lákavé z důvodu malých spádů, sporů s ekologií apod., nelze tedy očekávat bouřlivý rozvoj, ač z hlediska spolehlivosti dodávky a vlivu na síť patří mezi nejvýhodnější obnovitelné zdroje.

9.4. Literatura

- [1] Zákon č. 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích (Energetický zákon) v platném a novelizovaném znění
- [2] Vyhláška ERÚ č. 51/2006 Sb. o podmínkách připojení k elektrizační soustavě ve znění vyhlášky č. 81/2010 Sb.
- [3] Vyhláška ERÚ č. 540/2005 Sb. o kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elektroenergetice
- [4] Vyhláška ERÚ č. 541/2005 Sb. o Pravidlech trhu s elektřinou, zásadách tvorby cen za činnosti operátora trhu s elektřinou, ve znění pozdějších předpisů
- [5] Pravidla provozování distribučních soustav, 2011. 84 stran.
- [6] Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 3: Kvalita elektřiny v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení, 2011, 43 stran.
- [7] Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 4: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy, 2011, 71 stran.
- [8] ČSN EN 50160 ed3:2011. Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí
- [9] ČSN EN 50438:2008. Požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí.
- [10] ČSN EN 61000–3–2 Ed.2. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 3 - 2: Meze pro emise harmonického proudu (zařízení se vstupním fázovým proudem do 16 A včetně)
- [11] ČSN EN 61000-3-12. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 3-12: Meze harmonických proudu způsobených zařízením se vstupním fázovým proudem >16 A a ≤75 A připojeným k veřejným sítím nízkého napětí
- [12] PNE 33 3430-1: Parametry kvality elektrické energie - Část 1: Harmonické a meziharmonické.
- [13] PNE 33 3430-0: Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav
- [14] PNE 33 3430-2: Parametry kvality elektrické energie - Část 2: Kolísání napětí
- [15] PNE 33 3430-6: Parametry kvality elektrické energie - Část 6: Omezení zpětných vlivů na hromadné dálkové ovládání
- [16] Baggini, A. et al. *Handbook of Power Quality*. John Wiley & Sons Ltd: England, 2008, 644 pp., ISBN: 978-0-470-06561-7
- [17] Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., Beaty H.W. *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill: NY, USA, 2002, 2nd ed., 525 pp., ISBN: 0-07-138622-X
- [18] Strzelecki, R., Benysek, G. *Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks*. Springer-Verlag: London, UK, 2008, 422 pp., ISBN: 978-1-84800-317-0
- [19] Bollen, M.H.J., Gu, I.Y.H. *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. IEEE Press, John Wiley & Sons Inc.: Canada, 2006, 881 pp., ISBN: 978-0-471-73168-4
- [20] Janíček, F. et al. *Renewable Energy Sources 1*. Renesans, s.r.o.: Slovak Republic, 2009, 184 pp., ISBN 978-80-89402-05-2
- [21] Tlustý, J. a kol. *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*. ČVUT v Praze: 2011, 250 stran, ISBN 978-80-01-04939-6
- [22] Toman, P. a kol. *Provoz distribučních sítí*. ČVUT v Praze: 2011, 260 stran, ISBN 978-80-01-04935-8
- [23] Motlítko, P., Ptáček, J.: *Současný stav a očekávaný rozvoj větrných elektráren v Evropě a v ES ČR, jejich vliv na rozvoj soustavy*

10. Akumulace elektrické energie

10.1. Úvod

Tato kapitola se bude snažit čtenáři přiblížit problémy spojené s akumulací elektrické energie, ale také utvořit představu o současných možnostech na poli poznání o systémech uskladňující velmi potřebnou formu energie. Kapitola nemá za cíl vytvořit kompletní univerzální matematický aparát pro použití s jakoukoliv aplikací. Tento úkol je nutné tvořit vždy s konkrétním umístěním instalace a jednotný návod proto neexistuje. Čtenář by měl po přečtení získat základních představu a uvažování o akumulačních systémech jako celku, pochopit jejich problematiku a být schopen samostatně posoudit vhodnost použití akumulátorů na konkrétní instalace.

Otázka ukládání elektrické energie je stejně stará jako sám objev elektřiny. Již od dob Alessandra Volty a Andrého M. Ampéra probíhaly různé pokusy s akumulací elektrické energie. Důležité si je na úvod uvědomit, že není vhodné zaměňovat slova baterie a akumulátor, protože se tyto výrazy významově liší. Několikrát během tohoto textu se bude skloňovat slovo akumulace, akumulátor nebo akumulační baterie. Obvykle je slovo baterie vnímáno jako galvanický článek nebo elektrochemický akumulátor, vhodný do ručních svítilen apod. Zde se slovo baterie může objevit ve významu akumulačního prostředku, popřípadě akumulačních prostředků (baterie je vlastně souprava několika článků). Nebude-li uvedeno jinak.

Pojem akumulace elektrické energie lze přeložit jako hromadění či zásoba elektrické energie nebo jako uchování energie pro její pozdější využití ve vhodné kvalitě a kvantitě. V současné době je nejrozšířenějším akumulačním médiem olověný akumulátor. Většina z nás ho zná především v automobilech. Někdy se můžeme setkat také s pojmem primární baterie. Tím je myšlena skutečnost, že článek je schopen dodávat energii bez prvotní disociace – tzv. suché články (klasicky známé monočlánky). Naopak sekundární druh potřebuje prvotní nabití. V následujících pasážích se budeme věnovat pouze sekundárním druhům.

Akumulační systémy jsou z hlediska výroby a spotřeby elektrické energie nezastupitelné. Elektřina je komodita z principu velice problematická a jakékoliv snahy o její distribuci naráží na problém okamžité poptávky a nabídky. Akumulátory, respektive skladiště energie, jsou v současné době stále ve vývoji. Nicméně máme možnosti, jak elektřinu s poměrně dobrou účinností skladovat.

Problematika akumulace je v současné době skloňována především s řešením v oblasti eliminace diskontinuity dodávky elektrické energie z obnovitelných zdrojů a vychází z principů jednotlivých alternativních zdrojů energie a z problémů spojenými s časově proměnlivým výkonem těchto zdrojů.

V současné době je tedy akumulace důležitá ze dvou důvodů:

- optimálně začlenit OZE do sítě,
- připravit se na tzv. chytré sítě (smart grid), které v budoucnu převzou funkci dnešních sítí.

10.2. Rozdělení akumulčních systémů

Akumulční systémy lze rozdělit do několika skupin a podskupin, dle atributů, které popisují jejich vlastnosti a určují jejich použití. Tyto atributy jsou uvedeny níže. Akumulční systémy je možné rozdělit i na další skupiny, které již však nejsou tak významné pro energetiku.

Akumulace velkých objemů elektrické energie je dnes v převážné většině uskutečňováno pomocí přečerpávacích elektráren. Přečerpávací elektrárny jsou velkým akumulátorem a pro dnešní energetiku v podstatě jediným možným řešením. Jestliže někdo namítá, že tato funkce je vcelku zbytečná a drahá, že stačí např. v nočních hodinách snížit výkon elektráren, ten není obeznámen s problematikou energetiky, zejména pak s fyzikálními podmínkami najíždění a odstavování turbosoustrojí.

Na základě uvedených skutečností můžeme konstatovat, že akumulace je jedním ze základních problémů dnešní energetiky. Pokud je již celkem uspokojivě vyřešena výroba energie tzn. její výroba v normálním zatížení vzhledem k dennímu diagramu zatížení, pak zejména špičkový provoz a náhlé propady (výkyvy) spotřeby – dodávky, stále představují problém, který je nutné urychleně vyřešit.

Naše elektrizační soustava je propojena s evropskou. Její zkratka je ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity). V rámci propojených elektrizačních soustav funguje tzv. solidárnost, což znamená, že v době špiček, tzn. v náhlých propadech nebo nárustech spotřeby energie si jednotlivé elektrizační soustavy vypomohou krátkou stimulací. Zde se fakticky dostáváme do konfliktu s ekonomickou stránkou věci, neboli cena za 1 MWh energie v záskoku je přibližně 2x až 3x vyšší než běžná cena za elektrickou energii.

Akumulční soustavy můžeme rozdělit podle:

- a) Požadovaného výkonu
 - Okamžitý
 - Záložní
- b) Akumulční kapacity
 - Malá
 - Střední
 - Velká
- c) Fáze přeměny při akumulaci
 - Homogenní
 - Heterogenní
- d) Počtu cyklů
 - Denní
 - Týdenní
 - Celoroční
 - Nepravidelná

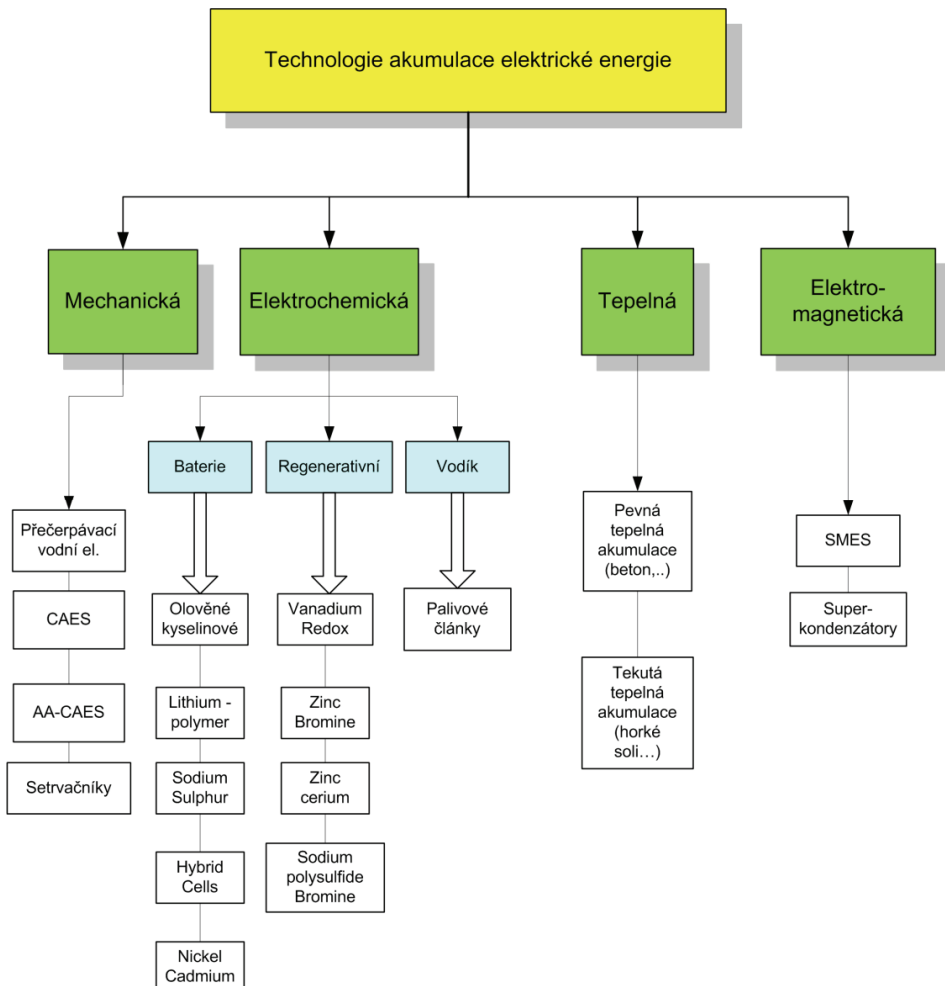
e) Formy ukládání energie

- Přímou
- Nepřímou

f) Rychlosti a reakční rychlosti u nabíjení a vybíjení

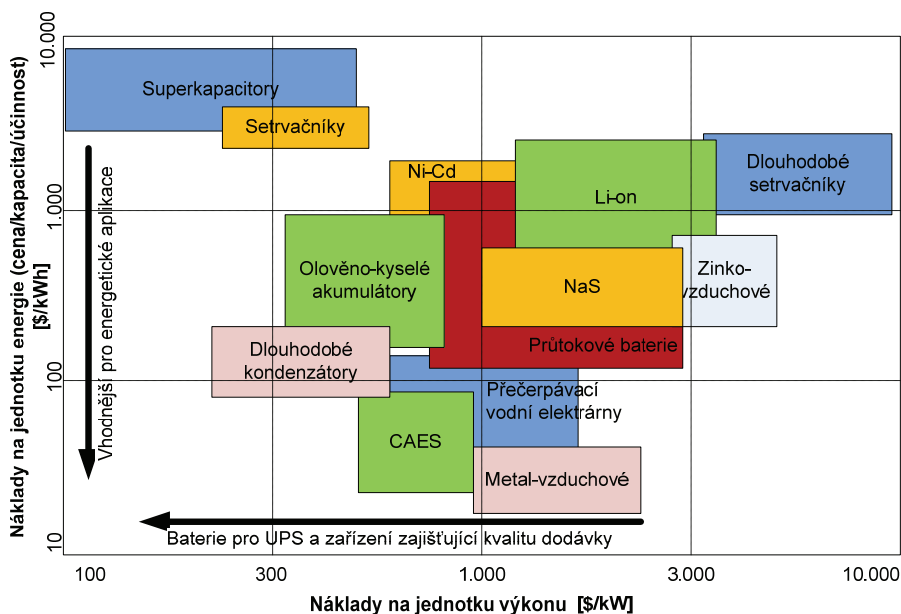
- Pomalá
- Rychlá

Akumulační systémy lze také dělit na primární a sekundární. Primární mohou dodávat energii ihned, sekundární až po polarizaci elektrod (prvotně se musí nabít). Technologické rozdělení můžeme vyjádřit blokovým diagramem (obrázek 10.1).

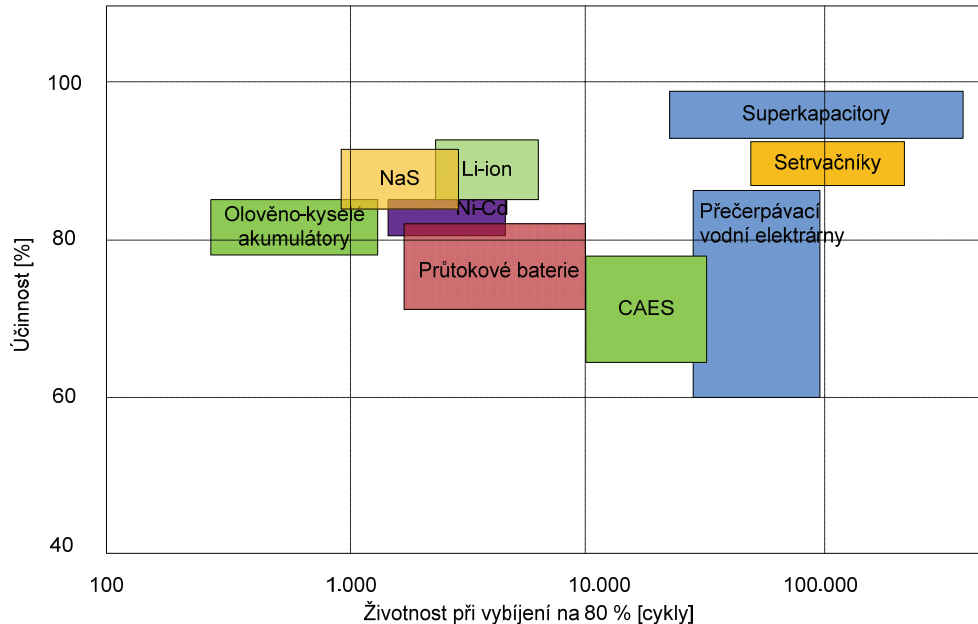


Obr. 10.1: Rozdělení akumuláčních soustav [2]

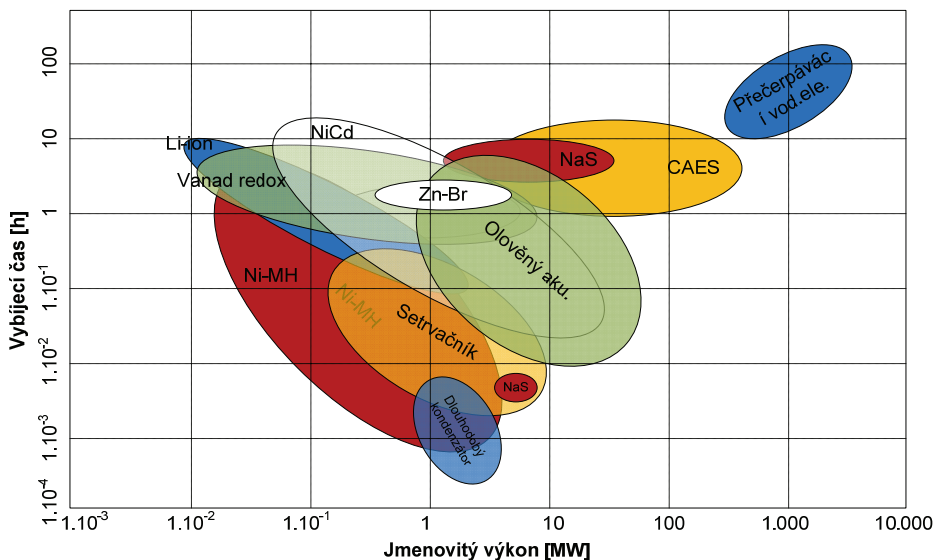
Na dalších obrázcích (Obr. 10.2 až 10.4) je znázorněno rozdělení akumuláč-
ních systémů z hlediska ekonomického, popřípadě z požadavků aplikace na kon-
krétní soustavu.



Obr. 10.2: Rozdělení systémů podle nákladů na jednotku energie [1]



Obr. 10.3: Životnost a účinnost akumuláčních systémů [1]



Obr. 10.4: Výkonové požadavky na akumulční systémy [1]

10.3. Akumulační systémy a jejich podrobnější popis

10.3.1 Požadovaný výkon

Potřeba dostatečného výkonu je dána aktuálním rozložením spotřeby elektrické energie a její výrobou při náhlých výpadcích velkých zdrojů. Pro tento případ je rozhodujícím členem právě požadovaný výkon a schopnost ho rychle poskytnout.

Okamžitým záložním výkonem se rozumí stav, kdy je potřeba elektrická rezerva do 5 minut. Ideální pro pokrytí touho požadavku jsou vhodné právě akumulční systémy na principu setrvačnicků nebo kondenzátorových baterií (pro menší výkony – řádově do desítek kW), nebo přecherřavácí vodní elektrárny (pro větší výkony – řádově desítky až stovky MW).

Rychlé, popřípadě pomalé zálohy (časový úsek mezi 5 až 30 minutami a nad 30 minut) mohou převzít baterie, které jsou složitějších konstrukcí, a které budou popsány dále. U pomalých záloh je možno počítat už s nasazením elektráren, zejména na zemní plyn a studených záloh.

10.3.2 Akumulační kapacita

Akumulační schopnost neboli kapacita akumulátoru se udává obvykle jako náboj v ampérhodinách nebo jako akumulční energie ve watthodinách. Je stejně důležitým pojmem jako požadovaný výkon. Je to doslova schopnost (vlastnost) daného uspořádání nahromadit v sobě elektrické náboje. Někdy se jí také říká jímavost akumulátoru.

S kapacitou akumulátoru se budeme setkávat v textu velice často, protože dle této kapacity můžeme rozhodnout o vhodnosti pro konkrétní instalace.

10.3.3 Počet cyklů

Počet cyklů je termín, který je vhodné zmínit v souvislosti s dlouhodobou akumulací, kde se předpokládá časté střídání režimů. Naopak pro akumulaci záložní (tzv. zálohové akumulátorovny v jaderných elektrárnách), je počet nabíjecích a vybíjecích cyklů zásadní. Zde se uplatňují jiné aspekty, zejména spolehlivost a dostatečný výkon v relativně krátkém okamžiku.

10.3.4 Rychlost a reakční rychlost u nabíjení a vybíjení

Rychlost nabíjení versus vybíjení není ničím jiným, než schopností baterie dosáhnout plné kapacity nabití (vybití) během specifického časového úseku. Kupříkladu kondenzátory mají jiné parametry než olověné baterie.

Dalším sledovaným údajem je reakční rychlost změny mezi nabíjením a vybíjením. Tedy schopnost se přizpůsobovat aktuálním požadavkům kladených na akumulátory. Údaje o rychlosti změny nabíjení nebo vybíjení jsou důležité pro obnovitelné zdroje energie, jejichž výroba je obtížně predikovatelná. Tato rychlost se může pohybovat od řádů desetin milisekund až po desítky minut.

10.3.5 Fáze přeměny

Fázi přeměny můžeme definovat pro homogenní a heterogenní systémy.

Homogenní systémy:

Homogenním systémem nazýváme systém, kde podoba je ukládání a odběr energie řešen shodným principem přeměny energie. Mluvíme-li o elektrické energii, potom za homogenní systém lze považovat uskladnění ve formě magnetického nebo elektrostatického pole. V současné době na těchto principech pracují cívky (SMES) nebo kondenzátory (Super nebo ultra kapacitory).

Heterogenní systémy:

Heterogenním systémem můžeme nazývat systém, kde podoba ukládání a odběr energie je řešena odlišným principem (i částečným) přeměny energie.

Tímto způsobem jsou řešeny všechny ostatní druhy akumulačních systémů (chemické vazby, mechanické, tepelné aj.).

10.3.6 Mechanické akumulační systémy

Kinetická energie

Setrvačníky (Flywheel)

Setrvačnick je historicky známé zařízení. Jeho přednosti jsou zejména v jednoduchosti a mnohostranném použití. Moderní setrvačníky dosahují běžně rychlosti otáčení přes 20.000 min^{-1} (i přes 50.000 min^{-1}) Samozřejmě je i použití magnetických ložisek. Rotor se točí ve sníženém tlaku okolního média (blíží se vakuu). Speciální konstrukční prvky snižují mechanické ztráty na minimum a zaručují vysokou účinnost [14].

Akumulační systémy se setrvačníky by mohly v budoucnu nahradit některé ze starších typů baterií, většinou založených na principu Ni-Cd. Vůči bateriím dosahují tyto systémy poměrně značných výhod, protože množství cyklů není omezeno chemickými pochody. Proto se životnost setrvačnicků může pohybovat řádově v 10^5 cyklů, respektive několik let. Záleží pouze na předepsané údržbě (většinou se problém týká ložisek, má-li stroj nějaké a dále uže docházet k únikům chladiva, popřípadě ztrátě vakua).

Těleso setrvačnicku je tvořeno uhlíkovými vlákny, které mají velkou pevnost a při poruše se mohou snadno rozštěpit na malé úlomky s malou kinetickou energií.

Účinnost setrvačnicku je vysoká, dosahuje hodnoty přes 90%. Následně, jak uvádí literatura [5], jsou pro výpočet energetického potenciálu setrvačnicků nutné následující aspekty.

Setrvačníky můžeme dělit na:

- ideální jednorozměrný setrvačnick (obrázek 10.5),
- ideální dvojrozměrný nebo vícerozměrný setrvačnick (obrázek 10.6).

a) Energie v jednorozměrném setrvačnicku je dána rovnicí:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(r\omega^2) = \frac{1}{2}mr^2\omega^2 \quad (10.1)$$

kde

- E energie (J)
- m hmotnost (kg)
- v rychlost ($m \cdot s^{-1}$)
- ω úhlová rychlost ($rad \cdot s^{-1}$)
- r poloměr (m)

Odstředivá síla:

$$F = mr\omega^2 \quad (10.2)$$

kde

- F síla (N)

Důležitá veličina je též pnutí ve struně, která definuje bezpečnost a je:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (10.3)$$

kde

- A průřez (m^2)
- σ síla (Pa)

b) Energie v dvojrozměrném setrvačnicku je dána:

Vycházíme z polárního momentu setrvačnosti:

$$J = \frac{1}{2} m r_0^2 = \frac{1}{2} \pi \rho r_0^4 \quad (10.4)$$

kde

J moment setrvačnosti ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

ρ hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Potom:

$$E_{in} = \frac{1}{2} J \omega_{\max}^2 \quad (10.5)$$

Energie setrvačnicku:

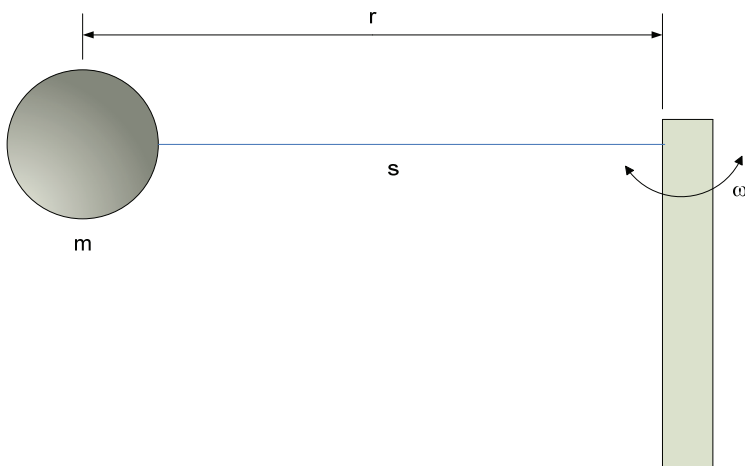
$$E_{out} = \frac{1}{2} J \omega_{\max}^2 \left[1 - (1/k)^2 \right] \quad (10.6)$$

kde

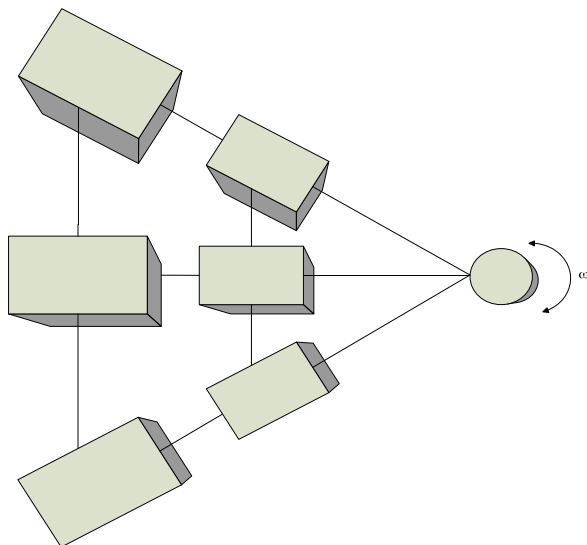
k koeficient

Energie předaná do zátěže je:

$$E_{out} = \eta \frac{1}{2} J \omega_{\max}^2 \left[1 - (1/k)^2 \right] \quad (10.7)$$



Obr. 10.5: Jednorozměrný setrvačnick



Obr. 10.6: Dvojměrný setrvačník

Hustota energie v setrvačníku:

$$\frac{E}{m} = \frac{1}{4} (r_0 \omega_{\max})^2 \left[1 - (1/k)^2 \right] \quad (10.8)$$

A pnutí v materiálu:

$$\sigma = \rho \frac{3 + \nu}{8} (r_0 \omega)^2 \quad (10.9)$$

Na základě vlastností vyjádřenými vztahy 10.8 a 10.9 můžeme říci, že čím lehčí a pevnější materiál, tím vyšší hustota energie:

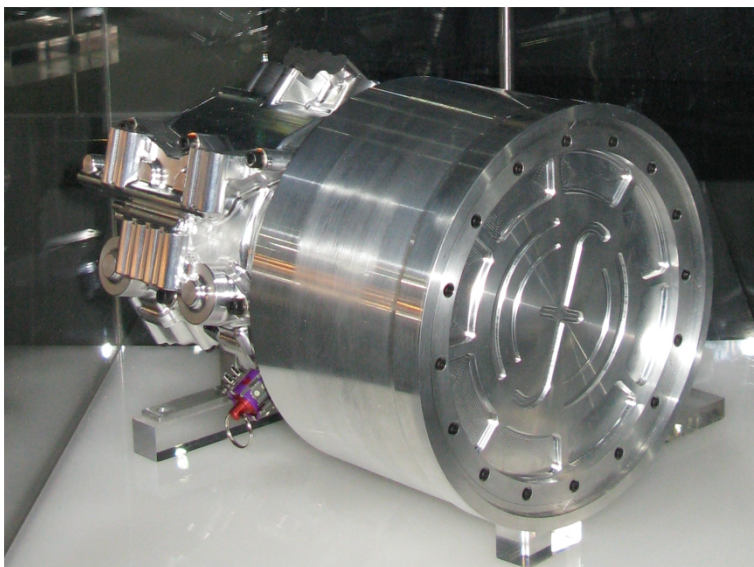
$$\frac{E}{m} \propto \frac{\sigma}{\rho} \quad (10.10)$$

Pro supravodivé magnety na ložiska se používají nejmodernější materiály, jako například texturované bloky $YBa_2Cu_3O_y$, které při teplotě 29 K dosahují magnetické indukce téměř 17 Tesla! Pro představu: nejlepší permanentní magnety mají magnetickou indukci $B \approx 1,7T$.

Setrvačníky můžeme rozdělit na [5]:

<i>Kompaktní kovové</i>	<i>Uhlíkové kompozitní</i>	<i>Power ring</i>	<i>Uhlíková vlákna</i>
<i>Pomaluběžné</i>		<i>Rychloběžné</i>	
<i>Kalsická ložiska</i>	<i>Magnetická ložiska</i>		<i>Supravodivá ložiska</i>

Tab. 10.1: Rozdělení setrvačníků podle specifických vlastností



Obr. 10.7: Ukázka moderního setrvačnicku (Beacon Power)

Potenciální energie

Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny (PVE) jsou všeobecně známé. V době dostatku energie čerpají vodu z níže položené nádrže do horní, aby v době nedostatku energie přes turbíny vodu vypustili zpět. Pro jejich další rozvoj máme omezené geografické podmínky. Jejich výstavba je drahá a pro okamžité potřeby nejsou vhodnými záskokovými zdroji energie.

Přečerpávací vodní elektrárny jsou jediným typem elektrárny, které pracují s akumulací vody, kterou si nejprve samy uloží. Mají většinou široký rozsah regulace, který je dán součtem výkonu a příkonu soustrojí:

$$P_{regul} = P_t + P_{\check{c}} \quad (10.11)$$

kde

P_t turbínový provoz

$P_{\check{c}}$ čerpadlový provoz

U PVE je velice sledovaným údajem rychlost přechodu z čerpadlového do turbínového chodu, který je zpravidla do 5 minut u starších strojů se systémem čerpadlo-turbína v jednom, až do 1 minuty u moderních strojů. Nejlépe vycházejí soustrojí, která jsou vybavena nezávislými čerpadly a turbínami. Zde potom můžeme mluvit o okamžitých zálohách.

Pro ideální využití přečerpávací vodní elektrárny je nutné splnění několika podmínek:

- umístění, co nejbližší místa spotřeby,

- velký akumulční potenciál,
- co největší výškový rozdíl mezi nádržemi,
- ideální návrh soustrojí (má-li turbína být také čerpadlem, nebo čerpadlo má být zvlášť).

Účinnost PVE je dána součinem účinností jednotlivých částí elektrárny, které můžeme vyjádřit rovnicí (10.12) nebo graficky (Obr. 10.8):

$$\eta = \eta_{tc} \eta_{pc} \eta_m \eta_c \eta_{pt} \eta_t \eta_g \eta_{tt} \quad (10.12)$$

kde

η_{tt}, η_{tc} účinnost transformátoru v turbínovém a čerpadlovém provozu

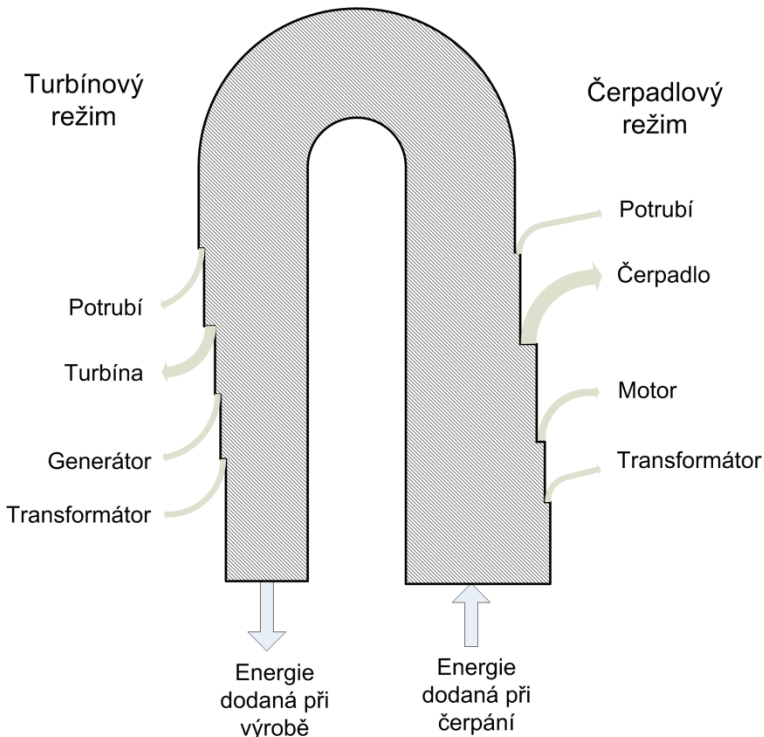
η_m, η_g účinnost motoru, generátoru

η_{pt}, η_{pc} účinnost potrubí turbíny a čerpadla

η_t, η_c účinnost turbíny, čerpadla

Vztah lze také přepsat do podoby:

$$\eta = \frac{E_t}{E_c} \quad (10.13)$$



Obr. 10.8: Rozložení účinností v přečerpávací vodní elektrárně [11]

Přečerpávací vodní elektrárny pracují ve čtyřech základních pracovních režimech:

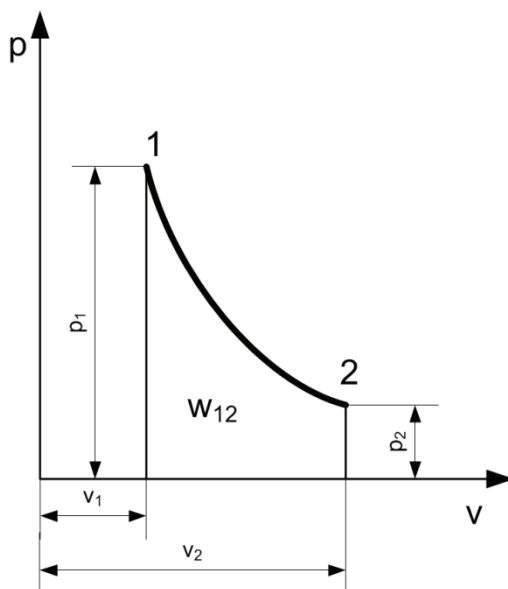
- klidový provoz,
- turbínový provoz,
- čerpadlový provoz,
- kompenzační provoz.

Výše uvedené vztahy platí pro tzv. malý cyklus, v kterém nejsou zahrnuty další ztráty, které s provozem PVE souvisejí (ztráty v přívodních vodičích apod.)

Účinnost starších bloků se pohybovala v rozmezí 50 – 70%. Nové zdroje (zejména nové strojové vybavení) dosahují lepších parametrů. Obvykle 80%.

Tlaková energie

Akumulace energie prostřednictvím stlačeného vzduchu, obecně označována zkratkou CAES (Compressed Air Energy Storage), není příliš známá. Ani její vylepšená varianta AA-CAES (Adiabatic Advanced - Compressed Air Energy Storage) není příliš rozšířená, protože největšími problémy jsou adiabatická komprese a úspěšné začlenění systému do místních podmínek. Oba tyto systémy jsou příležitostí pro expanzi OZE. Účinnost systému je mezi (60 – 75) %. Tato metoda je podobná svým principem a rozsahem výše popsané technologii přečerpávacích vodních elektráren.

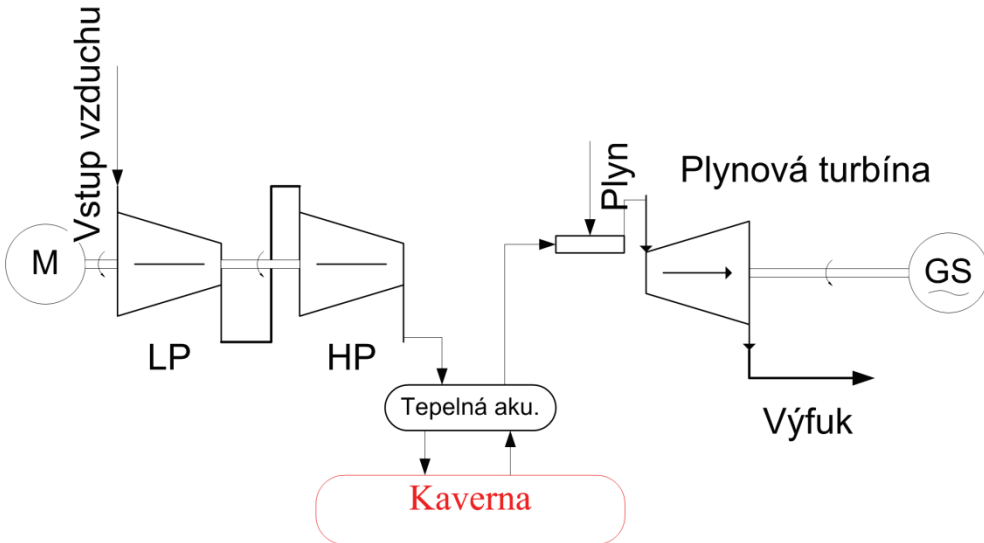


Obr. 10.9: Adiabatická komprese v p-v digramu [13]

Ve světě již běží úspěšné projekty (McIntosh, USA; Huntorf, Německo). Obě pracují se systémem, kdy je stlačený vzduch přiváděn do spalovací komory, je spalován se zemním plynem a díky tomu se zvýší entalpie fluida, které je následně

hnáno do turbíny, kde dochází k vytvoření točivého momentu. Tlakovým vzduchem se dosahuje úspory energie k pohonu kompresoru.

Další zvýšení entalpie je možné docílit využitím geotermální energie. AA-CAES vychází z myšlenky adiabatického stlačování vzduchu. Toho nelze regulárně docílit, proto se uvažuje o akumulaci tepla při stlačování vzduchu. Tepla se využívá při zpětném odběru tlakového vzduchu. Zvýšená účinnost této koncepce je kompenzována vyššími investičními náklady a také problémem s objemným tepelným akumulátorem [3][13].



Obr. 10.10: Schematický princip adiabatické komprese vzduchu [13]

Rovnice vyjadřující měrnou práci při adiabatické kompresi [13]:

$$w_{12} = \frac{p_1 v_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa - 1} \right] = \frac{p_1 v_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right] \quad (10.14)$$

kde

w_{12} měrná objemová práce (J)

p měrný tlak (Pa)

v měrný objem (m^3)

κ izoentropický koeficient (-)

10.3.7 Elektrochemická přeměna - akumulace

Mezi elektrochemické akumulátory zařazujeme zejména průtokové baterie, palivové články a akumulátory.

Více o palivových člancích se lze dočíst v kapitole o vodíku. Palivový článek

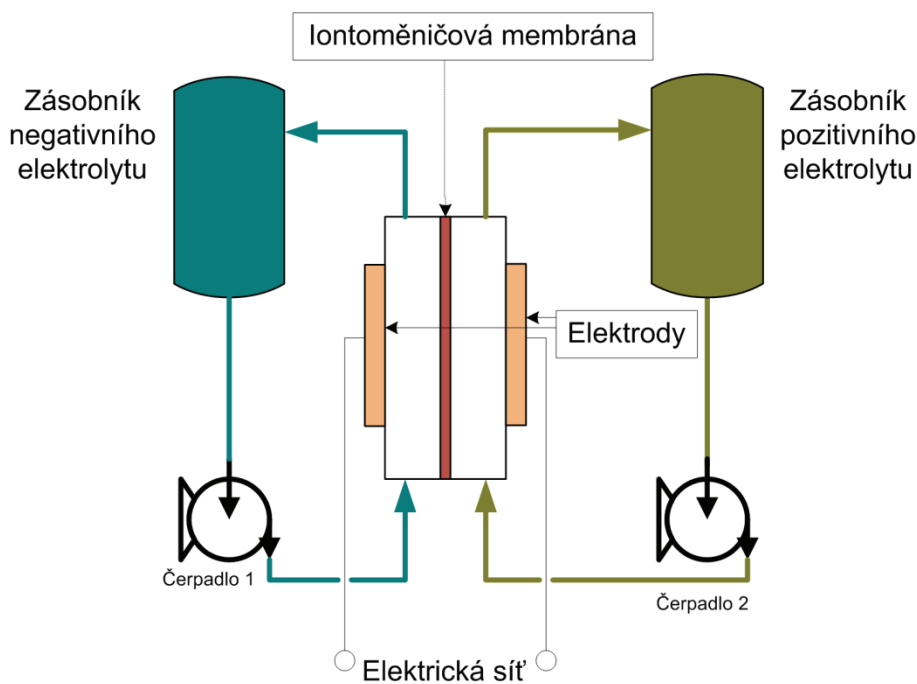
ale může pracovat i na metanol, popřípadě na methan, proto není dobré si spojovat pojem palivový článek výhradně s použitím s vodíkem. Následující stať pojednává o bateriích všeho druhu.

Průtokové baterie

Průtokové baterie jsou poměrně novou technologií. Jsou nabíjeny stejně jako konveční baterie, ale skladování je prostřednictvím tekutého elektrolytu. Tento elektrolyt je pomocí čerpadel vháněn do zásobních tanků a z nich je zpět přiváděn do chemického článku, jak ukazuje obrázek 10.11.

V současnosti je několik typů průtokových baterií pracujících na principech:

- Elektrochemické oxidace a redukce vanadu – VRB
- Uskladnění pomocí halogenu Br – ZnBr
- Na roztoku Polysulfid Bromidu (PSB, Br/S)
- CeZn (cér/zinek) – zatím ve vývoji



Obr. 10.11: Princip průtokové baterie

Elektrochemické oxidace a redukce vanadu – VRB

Obecně se oxidace a redukce nazývá redoxovým systémem. Vanadiová redoxová baterie disponuje ojedinělými funkcemi, které ji pasují do nejpravděpodobnějšího kandidáta na možnost akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů.

jú. Její ojedinělost spočívá především v neomezených počtech cyklů nabití a vybití, tudíž nedochází ke znehodnocování elektrolytu.

Obvykle udávaná životnost u baterií se pohybuje v řádech stovek až tisíců cyklů, kdy následně dochází k nevratnému poškození elektrod a je nutná opětovná výměna baterie. U redoxových baterií obecně tato výměna odpadá.

Z konstrukčního hlediska se jedná o průtokovou baterii, kde klíčovým problémem je těsnost ucpávek čerpadel použitých při čerpání elektrolytů. Iontoměničová membrána, která je jediným oddělovacím faktorem mezi dvěma elektrolyty, má životnost převyšující 15.000 cyklů. Tento aspekt značí velkou výhodnost baterie pro nasazení do celoročního provozu s nízkou mírou nutných odstávek pro údržbu systému.

Děj, který se uskutečňuje při nabíjení je popsán rovnicí 10.15.



Naopak rovnice při vybíjení je uvedena jako 10.16.



Při nabíjení dochází k iontové výměně mezi dvěma elektrolyty, proto je na oddělení dvou elektrolytů nutná iontovo-propustná polymerní membrána.

Akumulační kapacita je dána množstvím elektrolytu v zásobnících, přičemž prakticky dosažitelná objemová energetická hustota elektrolytu úplného nabíjecího (vybíjecího) cyklu je uváděna v rozsahu (15 až 25) kWh.m⁻³ (ideálně dosažitelná hodnota činí (28 až 43) kWh.m⁻³). Měrná hmotnost VRB článku dosahuje 6,5 až 10 kg.kW⁻¹ u větších zařízení, u malých výkonů výrobce uvádí max. 12,5 kg.kW⁻¹. Měrná hustota elektrolytu je přibližně 1,4, hmotnost elektrolytu představuje přibližně 90% hmotnosti celého zařízení.

V porovnání s klasickými akumulátory má elektrolyt v nabitém stavu při cirkulaci ve VRB článku jen nepatrné samovybíjení. Pokud je nabitý elektrolyt uskladněn mimo článek, zůstává nabitý prakticky po neomezenou dobu [4].

Prostorová náročnost instalace souvisí především s akumulací kapacitou, přitom oddělené skladování elektrolytu od vlastní VRB, umožňuje snadné přizpůsobení instalace prostorovým podmínkám.

Jedná se o stavebnicový celek se základním modulem VRB 5 kW (v závislosti na výrobci). Pro nejčastější akumulaci kapacitu (doba cca 8 h) se uvádí, že 85 až 90% zastavěné plochy zabírají zásobníky elektrolytu, na vlastní články VRB a řídicí a kontrolní elektronika zbývající (15 až 10) %.

Je zjevné, že princip článku VRB je blízký funkci palivových článků, u kterých dochází k elektrochemické oxidaci paliva přiváděného do jedné z komor článku, do druhé komory se pak kontinuálně přivádí oxidant. Zásadní výhodou článku VRB je jeho reverzibilita, tj. v tomtéž elektrochemickém měniči může probíhat jak nabíjení, tak vybíjení podobně jako v klasických typech akumulátorů. Elektrické parametry článku VRB jsou rovněž blízké akumulátorovým nebo palivovým článkům. Rovno-

vážné napětí plně nabitého článku VRB při provozní teplotě 25°C je VoC = 1,35 V. Podle stupně nabití se napětí změnou složení obou elektrolytů postupně mění, až u zcela vybitého článku klesne na VoD = 1,0 V

Přechod z režimu nabíjení na vybití probíhá prakticky okamžitě (v časech řádu ms) v závislosti na polaritě rozdílu okamžitého rovnovážného napětí a napětí připojeného vnějšího elektrického obvodu.

Protože VRB zařízení je určeno především k dlouhodobé akumulaci elektrické energie, jsou pořizovací a provozní náklady uváděny v €/kWh. U zařízení řádu MWh se pořizovací náklady pohybují mezi 500 – 700 €/kWh, u 100 MWh systému činí okolo 450 €/kWh. Rozšíření akumulační kapacity (elektrolytu) u velkých zařízení přijde na cca 250 €/kWh. Provozní náklady se omezují jen na pravidelné roční kontroly stavu zařízení, provoz je automatický a programovatelný v systému řízení a kontroly. Při kontinuálním provozu je nutná výměna jediných pohyblivých částí – oběhových čerpadel elektrolytu po cca 5 až 7 letech. Náklady na údržbu a provoz jsou tak odhadovány na cca 0,008 €/kWh.

Svími provozními parametry, zejména bezprostředním přechodem z režimu nabíjení na vybití jsou VRB akumulační jednotky optimální k vyrovnávání krátkodobých a střednědobých fluktuací výkonu větrných a fotovoltaických elektráren způsobených obtížně predikovatelným vývojem místních meteorologických podmínek. Tím se významně zvýší kvalita elektrické energie dodávané z tohoto typu zdrojů do elektrizační soustavy.

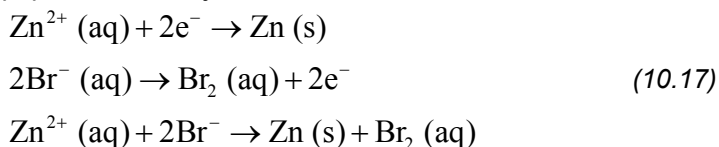
Vzhledem k minimálním provozním nákladům a zanedbatelnému samovybití v klidu lze zařízení využívat jako záložní zdroj s extrémně rychlým njetím na plný výkon pro provoz vyžadující plné zabezpečení napájení elektrickou energií (letišť, nemocnice apod.).

Velkými VRB zařízeními je možno realizovat prakticky bez omezení nové akumulační kapacity elektrizační soustavy o výkonu řádu až 100 MW, případně lze využívat i distribuované VRB jednotky v držení drobných investorů prostřednictvím dálkového řízení jako významnou vedlejší systémovou službu pro operativní řízení ES nebo k nouzovému napájení při velkých poruchách v rozvodné síti.

Uskladnění pomocí halogenu Br – ZnBr

Zinko-bromidová baterie obsahuje zinkovou negativní elektrodu a brómovou pozitivní elektrodu od sebe navzájem oddělených mikropropustnou membránou. Roztok zinku a soubor brómové sloučeniny cirkulují ve dvou oddílech. Tato baterie je založena na poněkud odlišném způsobu než PSB a VRB. V ZnBr slouží elektrody jako substrát pro reakci a jejich kapacita může být zmenšena, jestliže baterie není kompletně a regulérně vybita [9].

Během nabíjení je zinek elektricky pokovený na anodu a bróm je vázán na katodu. Reakce je popsána následující rovnicí:

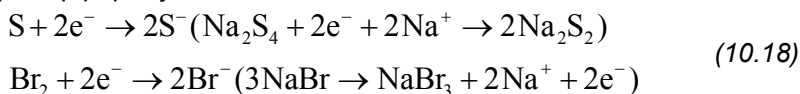


Během vybíjení je reakce opačná.

Polysulfidová Brómová baterie

V tomto typu průtokové baterie jsou roztoky bromidu sodného (NaBr), sodíku (Na) a polysulfidu (Sn^{2-}) použity jako elektrolytu. Kladné ionty sodíku přecházejí membránou během nabíjení nebo vybíjení. Jakmile bróm a síra jsou prvky, emitují a přijímají elektrony. Proto je tento systém nazýván spíše jako Br/S. [9]

Její princip popisuje rovnice:



Při vybíjení je reakce opačná.

Tato baterie se jeví jako perspektivní pro velké systémy jako mohou být akumulační centra v distribučních, či přenosových uzlech. Systém byl vyvíjen společností Regenesys technologies Ltd. Dostupné informace hovoří o aplikaci o výkonu až 12MW a kapacitě 120 MWh.

	VRB	Bromid Zinku	PSB - Br/S
Jmenovitý výkon [MW]	<3	<1	<15
Jmenovitá kapacita [MWh]	0,005 - 5	0,01 - 5	0-120
Energetická hustota [Wh/l]	16-33	60-90	20-30
Životnost [roky]	5-10	5-10	15
Počet cyklů	>12.000	>2.000	--

Tab. 10.2: Porovnání jednotlivých druhů průtokových baterií [2]

ZEBRA Baterie

Tato baterie má skutečné chemické složení NaNiCl, tedy sodík nikl chlorid. Výhoda této baterie je vyšší energetická hustota než např. u NiCd baterie. Její konstrukce je podobná baterii NaS, taktéž pracuje při vysokých teplotách. Modul baterie je schopný zvládnout až 2500 cyklů. Více informací o tomto typu baterie lze zjistit například v [9].

Olověné baterie

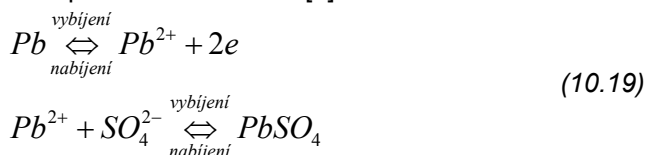
Olověné baterie mají veliké postavení na našem trhu a napříč zeměmi. Slouží pro mnoho aplikací i zároveň pro energetickou akumulaci.

Tyto baterie zaujímají celosvětově více než 45% vyráběných baterií.

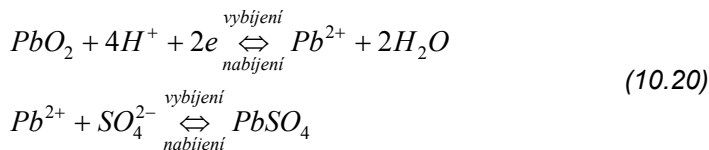
Olověný akumulátor se skládá z nádoby a ze dvou elektrod odlitých z čistého olova. Dále z vodného roztoku kyseliny sírové o hustotě 1,2 až 1,3 (podle druhu baterií). Kladné elektrody mají tvar mříží, které se plní pastou nebo jsou žebrované. Záporné elektrody jsou také mřížkové a pastované. Jedna deska je vyplněna oxidem olovičitým, druhá houbovým olovem. Místo dvou desek se většinou používá více desek, které nejsou vzdáleny daleko od sebe. Jsou řazeny střídavě, desky

stejného druhu jsou spojeny. Deska s oxidem olovičitým je hnědá, deska s houbovitým olovem je šedá.

Na negativní elektrodě probíhá tato reakce [9]:

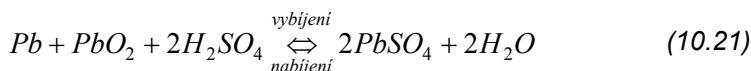


Na pozitivní elektrodě:



Vznikající ionty Pb^{2+} se slučují s ionty kyseliny sírové na síran olovnatý PbSO_4 , který je nerozpustný a zaujímá proto místo PbO_2 .

Celková reakce:



Jak je ukázáno, základní elektrodový proces na pozitivní a negativní elektrodě vyžadují slučovací a vylučovací mechanismus, nikoliv pevnou fázi iontových transportů. Nabíjecí - vybíjecí cykly jsou známé jako dvojité sulfatující reakce, jak je ukázáno na obrázku 10.12.

Při vybíjení klesá koncentrace kyseliny sírové, protože se tvoří voda. Při nabíjení koncentrace opět stoupá. Nabití akumulátoru se dá tedy kontrolovat hustotou kyseliny. Jestliže nabíjení pokračuje i po nabití (veškerý síran je spotřebovaný), dochází na olovené elektrodě k tvorbě vodíku. Na desce s oxidem vzniká kyslík a baterie „vře“. K tomu je nutné zvýšené napětí svorkové napětí, což se dá také kontrolovat. Jestliže přebíjení trvá delší dobu (vyšší proud), nestačí se difusí doplňovat kyselina sírová kolem kladných desek, potom při vybíjení klesá napětí rychleji. Toto všechno jsou ztráty, se kterými musíme počítat [20].

Nominální napětí článků je 2 V, napětí je změřeno naprázdno, tedy při otevřeném obvodu.

Maximální napětí nabitého článku může být až 2,125 V. Vybitý článek má hodnotu 1,75 V na článek, ale při hlubokém vybití může sahat až k hodnotě 1,0 V a to zejména při nízkých teplotách.

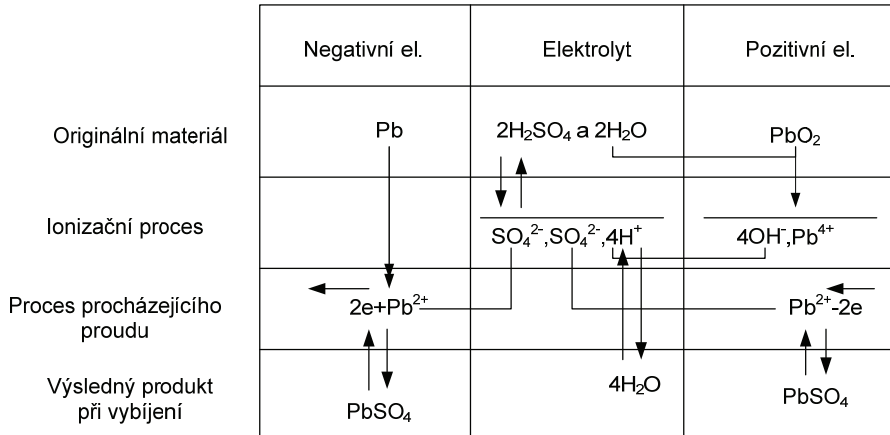
Na dalším obrázku (Obr. 10.13) je vidět skutečně změřená charakteristika a pomocí programu vytvořená Volt-ampérová charakteristika malého oloveného akumulátoru [9].

Hlavní nevýhodou těchto baterií je poměrně nízká hustota energie, dlouhá doba nabíjení, velká hmotnost (což pro stabilní zdroje, nebo pro zdroje vyrovnávací nevadí), která je tvořena především deskami, elektrolytem, konektory atd. Použi-

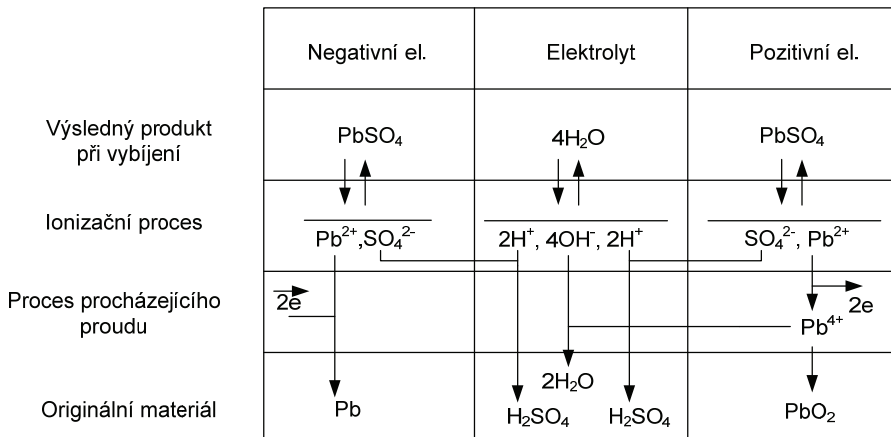
tím uhlíkových vláken v kladných elektrodách se snížila hmotnost baterií a částečně se zvýšil výkon olověných článků.

Olověné baterie byly oblíbenou volbou pro trakční baterie, tak i pro záložní systémy s jednotkovými výkony až 1,5 MW a s počtem cyklů až 2000 (u nejmodernějších baterií).

Nejnovější typy jsou většinou bezúdržbové. tzn., že není nutné dolévat vodu. V normálním cyklu je při nabíjení na jedné elektrodě vylučován kyslík a a druhé vodík se kterým rekombinuje zpět na vodu. Dále mají ochranu proti vznikajícím plynům při přebíjení (tzv. baterie ventilové nebo baterie řízené ventilem, jenž brání případné nadlimitní tvorbě plynů jejich odpouštěním).



a)



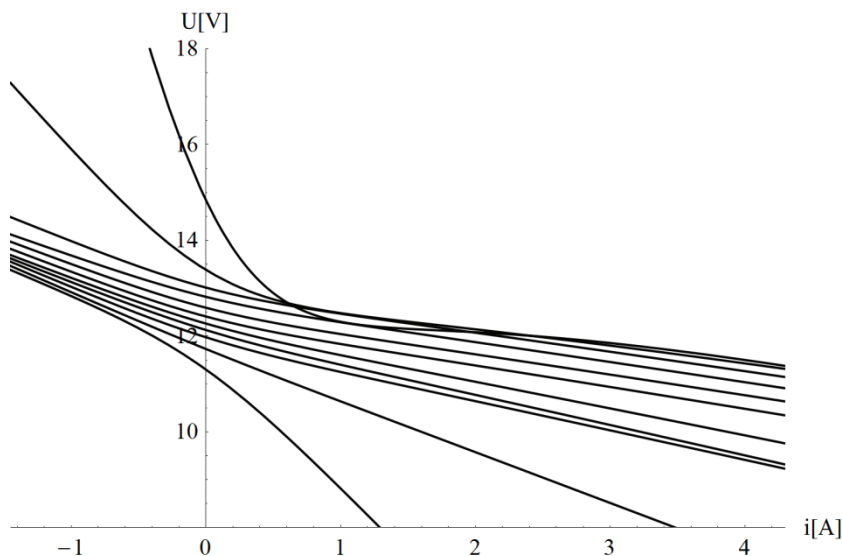
b)

Obr. 10.12: Nabíjení a vybíjení olověných akumulátorů. Vybíjecí cyklus (a). Nabíjecí cyklus (b). [9]

Dalším pokrokem je gelový elektrolyt. Jedná se o směs kyseliny sírové s malými částmi skelného prachu. Tato směs vytvoří vodivý elektrolytický gel, který spojuje výhody obou systémů.

Vývoj gelů vhodných pro akumulátory (nemusí se jednat pouze o olověné, ale také lithiové aku, kde gelem může být např. směs litných nebo sodných příměsí) se nezastavil. Všeobecně jsou gelové akumulátory bezpečnější a pohodlnější pro obsluhu a údržbu.

Problematika olověných akumulátorů je velice obsažná. Více informací lze najít např. v [9].



Obr. 10.13: Skutečně naměřená VA charakteristika malého olověného akumulátoru

Baterie Sodium – Sulfur (NaS)

Novým trendem je nasazování Sodium – Sulfur (NaS) baterií (obrázek 10.14). Jedná se o kombinaci sodíku a síry. Sodík je velice reaktivní a s alkalickými kovy jako je lithium a draslík tvoří skupinu, která může dosahovat teoreticky velké hustoty energie na jednotku hmotnosti. Například tato baterie má poměr řádově stovky Wh.kg^{-1} (400 Wh.kg^{-1}). Například v porovnání s olověnou baterií, která má asi 30 Wh.kg^{-1} , je tento poměr více než jedenáctinásobný. Účinnost konverze je také vysoká a pohybuje se v rozmezí 86 – 95% v závislosti na velikosti jednotky.

Princip vyjadřuje rovnice (10.22):

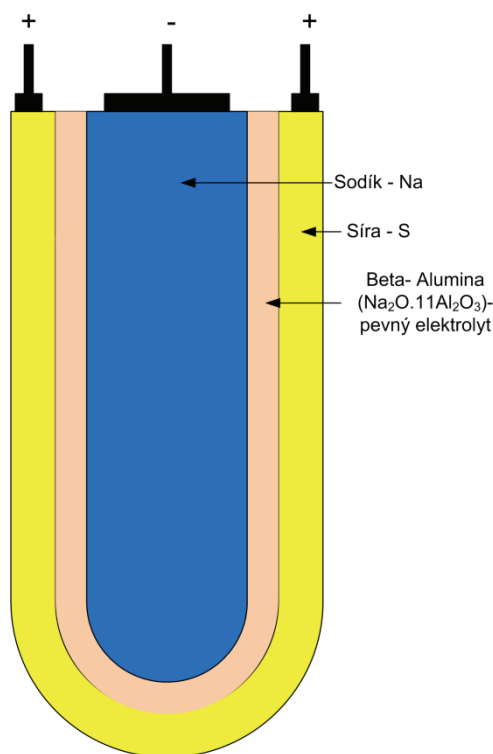


Tyto akumulátory zabírají menší, přibližně 3x, prostor jak olověné akumulátory. Je možné je snadno zapojovat do různých kombinací a tím určovat výstupní výkon i celkovou akumulovanou energii. Vyhovují požadavkům pro špičkové odběry, tedy možnost jejich vysokého krátkodobého přetížení. Umožňují také velmi rychlé dobíjení. Nedochází u nich k samovybíjení ani paměťovému efektu. Svým provozem neznečišťují životní prostředí, nevypouštějí do svého okolí žádné znečiš-

řující látky, nezpůsobují hluk, ani vibrace. Nicméně tyto akumulátory jsou vyrobeny z levných materiálů a jsou převážně určeny pro trvalý provoz nabíjení/vybíjení. Nevýhodou zůstává nemožnost transportu nebo provozu s vibracemi kvůli vnitřním roztaveným složkám, které musejí během provozu zůstat v klidu.

Jednotlivé články akumulátoru produkují napětí stejné jako olověné akumulátory, okolo 2 V.

Kompletují se do velkých celozapouzdřených modulů s uvnitř vyčerpaným vzduchem – vakuem nebo argonem pro nižší tepelné ztráty. Akumulační systémy a akumulaciční centrály jsou používány převážně v Japonsku, kde na zhruba 30-ti místech dokážou dodávat 20 MW po dobu 8 hodin. V USA je jejich používání teprve na začátku. Vyznačují se také značnou přetížitelností, je zde umožněn špičkový odběr až 6ti násobku normalizovaného výkonu po dobu minimálně 30 sekund. Elektrická účinnost těchto akumulátorů je mezi 80% až 90%. Životnost delší než 15 let z nich dělá spolu s nízkými náklady na jejich výrobu jednu z nejvhodnějších dnes používaných řešení pro akumulaciční systémy. [8]



Obr. 10.14: Sodíková baterie [18]

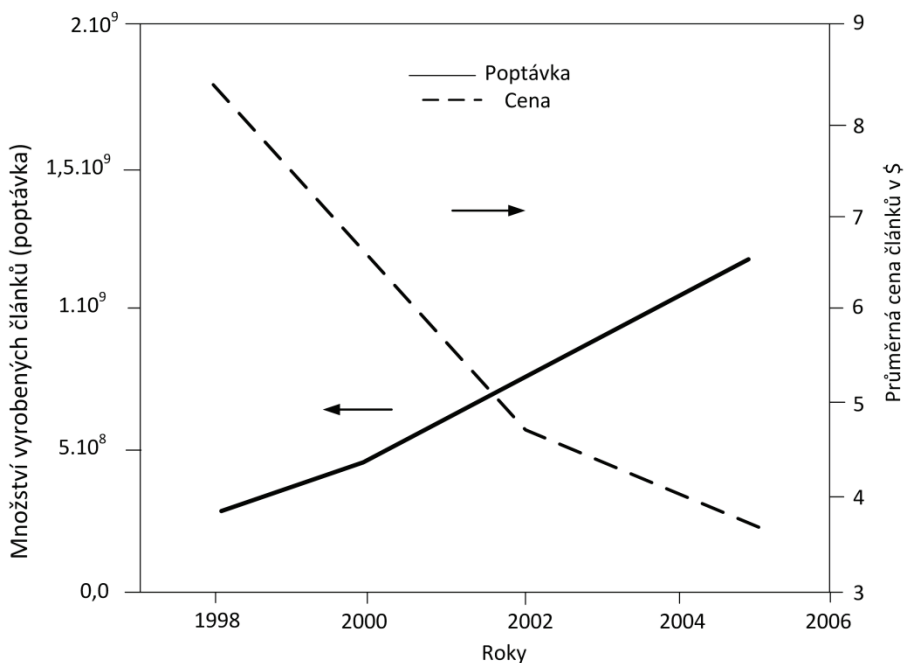
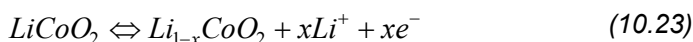
Články jsou usazeny do hermeticky uzavřených obalů, které musejí odolávat vysokým provozním teplotám a tlakům. Katoda je tvořena roztavenou sírou a anoda roztaveným sodíkem. Sodík má teplotu tání okolo 80°C a síra okolo 120°C, tudíž pro započatí reakce stačí dosáhnout teploty jen o trochu vyšší než teplota tání síry, ale ve snaze dosáhnout co největšího výkonu a bezztrátového provozu se teplota

elektrod článku pohybuje mezi 300°C a 350°C. Elektrolyt je zde realizován jako pevná struktura z keramiky s přidavkem hliníku a oxidu hlinitého.

Během vybíjení se ze sodíkové anody uvolní do vnější proudové smyčky elektrony, reakcí na to v roztavené anodě vzniká sodíkový iont Na^+ , který se dostane skrz pevný elektrolyt až do síry, kde se díky němu vytvoří kladný náboj – kladná elektroda, která po uzavření proudové smyčky přijme elektron. Tento děj je vratný, tudíž tím samým způsobem, ale opačně dochází k nabíjení. [8]

Lithiové baterie

Lithium je světlý a velmi reaktivní kov. Tím se stává velmi atraktivní pro energetickou akumulaci. Stejně jako předchozí druh baterií založených na sodíku. Anoda konvenčních článků je vyrobena z uhlíku, katoda z oxidu kovů a elektrolyt je lithiová sůl v organických rozpouštědlech. Níže uvedená rovnice vyjadřuje elektrochemickou reakci:



Obr. 10.15: Závislost ceny a poptávky [9]

Další vývoj je zaměřen na technologie LiFePo, Li-air a další technologie, které budou levnější, i když za cenu menší kapacity. S nasazením lithiových baterií se nicméně uvažuje pouze v bezvýpadkových záložních zařízeních – Uninterruptible Power Supply (UPS). [6]

Co se týče akumulátorů a z nich sestavených akumulacních systému na bázi lithia, přicházejí v úvahu dnes již vcelku běžné dvě varianty Li-ion a Li-pol. Hlavní předností je díky velmi lehkému lithiu velmi malá hmotnost na instalovanou kWh.

Zůstává také bezúdržbový provoz a je u nich možné uložit větší množství energie na jednotku obsahu oproti předchozím typům. Problém samovybití je takřka odstraněn a samotné články je možné skoro úplně vybit bez ztráty. Praktická realizace akumulčních systémů následně kapacity nebo snížení životnosti. Je umožněno rychlé nabíjení i vybíjení, tudíž jsou vhodné pro dynamické akumulční systémy. I se svojí dlouhou životností jsou srovnatelné s předchozími typy. Z pohledu zatížení životního prostředí jsou, jak výrobou, tak následnou recyklací, daleko více ohleduplnější. Bohužel i přes stále nové a efektivnější technologie výroby je pořizovací cena těchto akumulátorů a akumulčních systémů z nich sestavených neúměrně vysoká, tudíž jejich použití je v dnešní době takřka vyloučené. Pravděpodobně se pořizovací ceny v následujících letech značně sníží a tyto akumulátory bude možné použít jak centralizovaně, tak decentralizovaně přímo v jednotlivých gondolách větrných elektráren díky jejich velmi nízké hmotnosti. [8]

U Li-ion a Li-pol článků je řešení spojování za účelem zvýšení výstupního napětí a výkonu obdobné s tím rozdílem, že napětí jednotlivých článků je u Li-ion akumulátorů okolo 3 V a u Li-pol se pohybuje od 1,8 do 3,3 V podle použití elektrolytu a katody. Tyto akumulátory mají vysokou životnost, až 3000 nabíjecích cyklů, se skoro bezztrátovou efektivitou nabíjení.

Vnitřní struktura u Li-ion článků je podobná NiCd článkům. Rozdíl je v použití elektrod, katoda je Praktická realizace akumulčních systémů je tvořena oxidem lithia a jiného kovu, většinou LiNiO_2 , LiCoO_2 nebo LiMoO_2 . Vhodnost použití jednotlivých materiálů pro elektrody katod jsou současně ve výzkumu. Anoda je tvořena porézním uhlíkem a elektrolyt je vyroben z lithiových solí například LiPF_6 , rozpuštěných v organických karbonátech Princip činnosti nabíjení je založen na vytvoření iontu z atomu lithia na katodě, který nadále putuje přes elektrolyt a separátor až k uhlíkové anodě, kde se spojuje s externím elektronem a podílí se na uzavřením proudové smyčky nabíjecího okruhu. Proces vybíjení je založen na stejném, ale opačném principu. [8]

NiCd akumulátory

Nabíjecí cyklus u NiCd článků spočívá ve vytvoření vrstvy oxidu nikelnatého na niklové katodě a zvýšení koncentrace odvodněním elektrolytu, většinou z hydroxidu draselného. Proces vybíjení je charakteristické řidnutím hydroxidového elektrolytu a usazováním niklu na niklové katodě. U těchto akumulátorů je třeba hlídat přebíjení, protože se při chemických reakcích tohoto procesu vylučuje hodně vody do elektrolytu a následně dochází buď k poškození pohlcovače vlhkosti nebo rychlému snižování životnosti. [8]

Příkladem použití může být oblastní akumulční stanice ve Fairbanks, Alaska, USA, kde je instalovaný výkon 40 MW v NiCd článkách. Konstrukce průmyslově vyráběných NiCd článků se stejně jako u olověných článků provádí jak do plastových, tak do kovových, hermeticky uzavřených nádob. Katoda je tvořena niklovou elektrodou a anoda kadmiovou, u prvních akumulátorů železnou elektrodou. Dále je akumulátor tvořen vrstvou elektrolytu se separátorem a vratným pohlcovačem vlhkosti. Elektrolyt je ve většině akumulátorů tvořen jednoduchým hydroxidem alkaličného prvku, většinou hydroxidem draselným KOH nebo hydroxidem sodným NaOH. [8]

10.3.8 Chemická akumulace

Vodík

Palivový článek založený na vodíko-kyslíkové konverzi

Na úvod je důležité znovu upozornit, že vodík není palivem, nýbrž pouze nosičem energie. O tomto systému se velice často hovoří v souvislosti s budoucí dopravou, ale i energetikou. Účinnost zpětné konverze na elektrickou energii je ale velice nízká – okolo 30%. Záleží na použití elektrolyzátorů a palivových článků. V dnešní době je použití vodíkového hospodářství problematické. Níže následuje krátký výčet akumulačních vlastností a problémů, které s tím souvisí

Soustava může mít tři základní aplikace:

- a) Produkce medicínálních plynů
- b) Produkce vodíku a kyslíku, jejich akumulaci a následné energetické využití
- c) Využití v chemickém a potravinářském průmyslu

Vodík a kyslík jako chemické prvky

Vodík je bezbarvý plyn bez zápachu, hustota je 0,0899 g/l (lehčí než vzduch), teplota varu je 20,37 K. Výbušný se vzduchem.

Kyslík je bezbarvý plyn bez zápachu. Hustota 1,429 g/l (těžší než vzduch), teplota varu je 90,15 K. Ve spojení s organickými materiály může vyvolat hoření nebo výbuch.

Výroba vodíku

V předešlých úvahách jsme předpokládali výrobu vodíku pomocí elektrolýzy. Elektrolýza je proces, ve kterém se vodík uvolňuje na katodě a na kyslík na anodě. Tato reakce je náročná čistotou vody a elektrickou energií. Pro zvýšení vodivosti vody se používá roztoku nejčastěji KOH.

Jestliže přesto budeme přemýšlet o aplikaci vodíku jako akumulačního média, nesmíme opomenout HTR (vysokoteplotní) reaktory (stále ve vývoji). K rozkladu vody se používá vysoké teploty a pomocí chemicko-technologických prostředků je dosaženo lepší bilance.

Problémy v akumulaci vodíku

Skladovat vodík ve velkých objemech není dosud stále dostatečně vyřešené. Atomy vodíku jsou velice lehké i malé a unikají skrze krystalové mřížky různých kovů nebo jejich slitin.

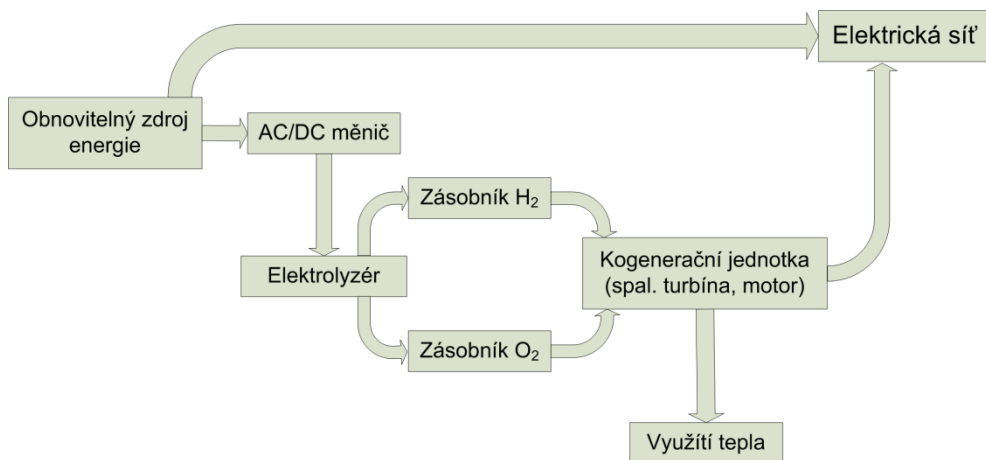
Principiálně můžeme vodík skladovat ve třech fázích:

- v plynné fázi
- v kapalně fázi
- s pomocí metal-hydridových zásobníků, kdy se plyn naváže na krystalovou strukturu slitiny.

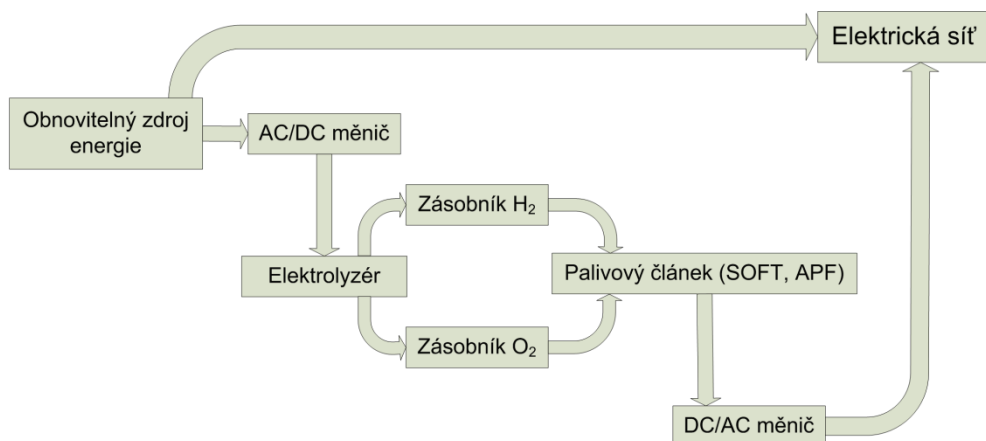
Výhody systému

Celá soustava obsahuje minimální množství rotujících částí, které mohou být příčinou poruch a problémů. Palivové články jsou velice závislé na čistotě vstupujících médií. Na druhou stranu je ekologicky přívětivý – bezemisní. Neprodukuje také hluk s výjimkou kompresorů apod. Na níže uvedených obrázcích můžeme vidět základní systém akumulace elektrické energie prostřednictvím vodíku.

Více informací o vodíkových technologiích je uvedeno v kapitole 8. *Palivové články a jejich hospodářství*.



Obr. 10.16: Schéma ukumulece prostřednictvím vodíku



Obr. 10.17: Schéma akumulace a spolupráce OZE s elektrickou sítí.

Biopaliva

Biopalivem jsou chápány cíleně pěstované rostliny, které mohou být následně využity energeticky. Pro potřebný vývoj rostlinstva může být udržováno vhodné

klima ve sklenících, kde se rychle může flóra rozvíjet. Následné využití (většinou termické zpracování) je chápáno jako jistý způsob zachování energie. Nutnou podmínkou je zabezpečit fotosyntézu.

Syntetické (syntézní) kapaliny a plyny

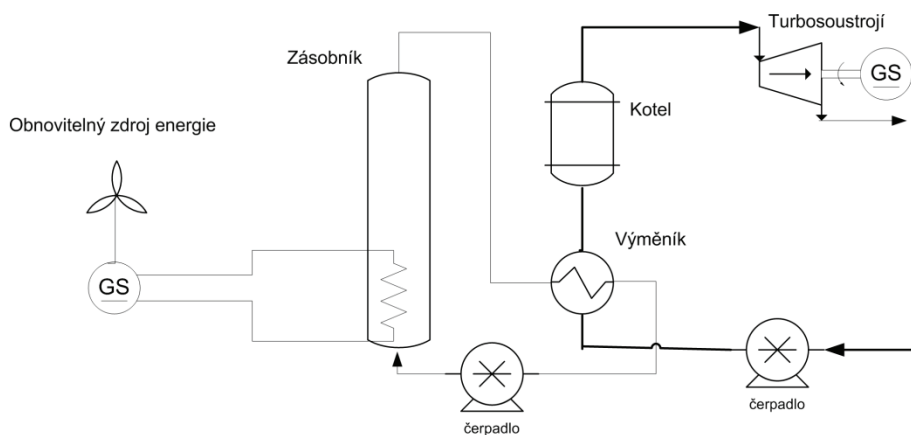
Syntézním plynům je přikládán velký důraz. Je známo, že pomocí elektrické energie lze z CO_2 a vody udělat metanol. Další výroba syntetických plynů probíhá především parním reformingem z uhlí.

Syntézní plyny a jejich problematika vysoce překračuje možnosti této knihy. Jedná se o oblast velice zajímavou a v budoucnu jistě využitelnou.

10.3.9 Tepelná akumulace

Metoda Ruths

Metoda Ruths je založena na termální akumulaci elektrické energie prostřednictvím teplé vody. Ta je posléze přes regenerační oběh kondenzované vody z turbíny zpět využita. Tento systém se vyznačuje vysokou mírou efektivity a akumulační kapacitou. [12]



Obr. 10.18: Principiální schéma [12]

Látky se změnou skupenství

Látky se změnou skupenství jsou vynikající pro akumulaci tepelné energie pouze v rozsahu jejich vlastních teplot tání. Pokud bychom potřebovali akumulační schopnost vyšší než je jejich bod tání, vyplatí se akumulace do současných materiálů. Velice dobře se uplatňují různé parafíny a vosky. Jejich teploty tání jsou blízké teplotě varu vody.

Eutektické slitiny jsou slitiny materiálů, které při tuhnutí vytvářejí krystaly. Teplota tání dvou kovů by měla být pokud možno co nejbližší. Důležitou vlastností je tzv. eutektická teplota, což je teplota nižší než teplota tání každé ze složek. Při tuhnutí se latentní teplo odevzdává, takže teplota zůstává po nějaký čas stejná. Až poté začne teplota slitiny klesat.

Tyto látky ale z pohledu energetiky (zvláště elektroenergetiky) nemají příliš velký význam.

Přírodní látky

Přírodní látky pro uchovávání tepelné energie jsou například, kámen, cihla apod. Samozřejmostí je voda. Z umělých látek můžeme jmenovat například beton.

10.3.10 Elektrická akumulace

Z hlediska akumulace je elektrická akumulace nejlepším řešením. Současné možnosti jsou však omezené.

Superconducting magnetic energy storage (SMES)

Superconducting magnetic energy storage je systém, který ukládá energii do magnetického pole. Jedná se o relativně nový systém, který je stále ve výzkumu a vývoji. Malé demonstrační jednotky existují, ale problematická se jeví akumulace vyššího množství energie (nad 1MWh) [16].

Superkapacitory

Superkondenzátory představují nový velkoobjemový systém akumulace energie. Kondenzátory mají velkou hustotu energie řádově 10 Wh/kg, delší životnost než konvenční baterie a také vyšší účinnost až 95%. Další předností jsou zejména vysoké krátkodobé dodávky výkonu, kdy je možné dosáhnout proudu až 4500 A. V anglické terminologii mají zkratku – SCESS – Super Capacitor Energy Storage System [19]. Obstal při několika milionech cyklů nabití-vybití. Doba nabíjení vybití je extrémně krátká a účinnost lepší než 95 %.

Rovnice jejich energetické bilance je:

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad (10.24)$$

kde

U napětí (V)

C kapacita (F)

Základní myšlenkou superakapacitoru je a byl vývoj optimálních zásobníků s kapacitou baterií, ale s operativními vlastnostmi kondenzátorů. Kondenzátory a to jak super nebo ultra mohou být aplikovány na zařízení, kde se předpokládá mnohem více nabíjecích a vybíjecích cyklů než by umožňovali baterie (více než 100.000 cyklů je možných). Energetická hustota je okolo 1-10 Wh.kg⁻¹ a specifická hustota energie je 1,6 kWh.kg⁻¹ a je vyšší než u baterií (s výjimkou Li-ionových baterií)

Superkondenzátor se skládá z kladné a záporné elektrody z hliníkové fólie, dvou vrstev aktivního uhlíku a mezi nimi se nachází separátor. V nenabitém stavu jsou částice s nenulovým nábojem (ionty) rovnoměrně rozloženy ve vodivé tekutině, tekutém nebo gelovém elektrolytu, který se nachází mezi elektrodami. Po přiložení napětí na elektrody se začnou záporné ionty pohybovat ke kladné elektrodě a naopak kladné ionty k záporné elektrodě. Na obou elektrodách se tak vytvoří

dvouvrstva se zrcadlovým rozložením elektrického náboje. Použitelné napětí je omezeno hodnotou disociačního napětí. Průrazné napětí elektrické dvouvrstvy je velmi nízké a tak typické provozní napětí superkondenzátorové buňky nepřesahuje 2,3 V.

Mezi jejich největší výhody patří

- Nízký vnitřní odpor a tím tedy vysoká účinnost (95% a více) a velmi malé ztráty
- Vysoká efektivita při nabíjení
- Možnost velmi častého nabíjení a vybíjení (mnoho cyklů)

Nevýhody:

- Množství energie uložené na jednotku váhy je nižší než u elektrochemických článků ($3-5 \text{ Wh.kg}^{-1}$ pro superkondenzátory v porovnání s $30-40 \text{ Wh.kg}^{-1}$ pro klasické baterie).
- Napětí se mění v závislosti na množství uložené energie (podobně jako u kondenzátorů).
- Mají nejvyšší dielektrickou absorpci ze všech typů

I přes nevýhody lze říci, že superkondenzátory mají budoucnost. Vyplňují totiž místo mezi klasickými kondenzátory a nabíjecími akumulátory. Mají malou kapacitu, ale naopak akumulátory mají pomalé nabíjení, limitované zatížení a krátkou životnost. A proto se budou superkondenzátory využívat nejpravděpodobněji ke krátkodobému zálohování zdrojů při krátkých výpadcích napájení, vyrovnávání a akumulaci el. energie pro malé větrné a solární elektrárny, hybridní automobily a napájení nízko příkonové kapesní elektroniky.

Nejnovější použití superkondenzátorů je ve startovacích bateriích lokomotiv a v moderních hybridních vozidlech.

10.4. Závěrečné hodnocení akumulátorových systémů

Na závěr hodnocení baterií je přehledová tabulka, která udává hlavní výhody a nevýhody jednotlivých systémů a akumulátorových baterií.

Technologie	počet cyklů	konfigurace	Specifická energie ($Wh.kg^{-1}$)	Energetická hustota ($Wh.l^{-1}$)	Specifický výkon ($W.kg^{-1}$)
Olověno-kyselinové	800	článek	35	80	200
Nikl-kadmiové	1000	článek	35	80	260
Nikl-metalhydrid	900	článek	65	220	850
Nikl-železo	1000	článek	30	60	100
Nikl-vodík	2000	článek	55	60	100
Zinek/oxid stříbra	40-50	článek	90	180	500
Zinek/bromid	1250	baterie	65	60	90
Zinek/vzduch	n/a	baterie	150	160	95
Regenesys (PSB, Zn/Br)	2000	baterie	20	20	--
Vanad Redox	3000	baterie	10	10	--
Sodíko-sírové (NaS)	1500	článek	170	345	250
	1000	baterie	115	170	240
Li-C/LiCoO ₂	600	článek	155	410	--
Li-C/LiNi _{1-x} Co _x O ₂	400	článek	150	400	--
Li-C/LiMn ₂ O ₄ (polymerní elektrolyt)	600	článek	140	300	--
Li/MnO ₂ (tekutý elektrolyt)	300	článek	120	265	--

Tab. 10.3a Srovnání baterií [9]

Technologie	Aplikace	Výhody/ nevýhody
Olověno-kyselinové	Elektrické/hybridní automobily, malé zásobníky pro domácnosti	Komerčně dostupné, bezúdržbové /nízká specifická energie
Nikl-kadmiové	Elektrické/hybridní automobily, vesmírné aplikace, domácnosti	Komerčně dostupné /relativně vyšší cena, nízká energie
Nikl-metalhydrid	Elektrické/hybridní automobily, vesmírné aplikace, domácnosti	Vysoká specifická energie /relativně drahé
Nikl-železo	Průmyslové	Komerčně dostupné /velká údržba, možnost tvorby vodíku
Nikl-vodík	Armáda, vesmírné tech.	Dlouhá životnost /velice drahé, vysoké samovybití
Zinek/oxid stříbra	Armáda, vesmírné tech.	Vysoká specifická energie a výkon /Vysoká cena, velice krátká životnost
Zinek/bromid	--	Nízká cena /nízká energetická hustota
Zinek/vzduch	Průmyslové	Specifická energie /krátká životnost, nízký specifický výkon
Regenesys (PSB, Zn/Br)	Energetický zásobník	Velice velká velikost
Vanad Redox	Energetický zásobník	Velice velká velikost
Sodíko-sírové (NaS)	Energetický zásobník	Vysoká specifická energie a energetická hustota / vysoká teplota
	--	Vysoká specifická energie a energetická hustota / vysoká teplota
Li-C/LiCoO ₂	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie / cena
Li-C/LiNi _{1-x} Co _x O ₂	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie
Li-C/LiMn ₂ O ₄ (polymerní elektrolyt)	Elektrické/hybridní automobily, domácnosti	Vysoká specifická energie /vyšší cena
Li/MnO ₂ (tekutý elektrolyt)	Domácnosti	Vysoká specifická energie /nutný další vývoj

Tab. 10.3b Srovnání baterií [9]

Technologie	Napětí naprázdno (V)	Napětí v uzavřeném obvodu (V)	Teoretická specifická kapacita (Ah.kg ⁻¹)	Teoretická specifická energie (Wh.kg ⁻¹)	Rozsah teplot (°C)	Doba zno-vunabí-tí (h)	Samovybi-jení při 20°C (%/měsíc)
Oloveno-kyselinové	2,1	1,98	120	252	-20 - +50	8-24	3
Nikl-kadmiové	1,35	1,2	181	244	-40 - +60	1-16	10
Nikl-metalhydrid	1,35	1,2	178	240	-30 - +65	1-2	30
Nikl-železo	1,4	1,2	224	314	-10 - +60	5	25
Nikl-vodík	1,5	1,2	178	240	-10 - +30	1-24	60
Nikl-Zinek	1,73	1,6	215	372	-20 - +50	8	15
Zinek/oxid stříbra	1,85	1,55	283	524	-20 +60	8-18	5
Zinek/bromid	1,83	1,6	238	429	+10 - +50	-	12-15
Zinek/vzduch	1,6	1,1	825	1320	0 - +45	-	-
Hliník/vzduch	2,73	1,4	2980	8135	+10 - +60	-	-
Železo/vzduch	1,3	1	960	1250	-20 - +45	-	15
Zinek/vzduch	1,6	1,1	825	1320	0 - +40	-	-
Regenesys (PSB, Zn/Br)	1,5	1,2	27	41	+10 - +50	8-12	5-10
Vanad Redox	1,4	1,25	21	29	+10 - +50	6-10	5-10
Sodíko-sírové (NaS)	2,08	2	375	755	+300 - +350	5-6	-
Sodík/niklchlorid	2,58	2,47	305	787	+250 - +350	3-6	-
Li-C/LiCoO ₂	3-4	3-4	100	360	-20 - +60	-	-
Li-C/LiNi _{1-x} Co _x O ₂	3-4	3-4	-	-	-20 - +45	2,5	<3,5
Li-C/LiMn ₂ O ₄ (poly-merní elektrolyt)	3-4	3-4	105	400	-20 - +60	3	<2,5

Tab. 10.4: Srovnání baterií [9]

10.5. Akumulační systémy vhodné pro energetiku

V energetice se akumulátory používají již dlouho. Jednak jako staniční baterie a zálohové baterie převážně v jaderných elektrárnách, kde slouží pro případ náhlého výpadku napětí. Tyto bloky akumulátorů musí zajistit bezpečné napájení ochrany a přidružených provozů nutných k udržení reaktoru v povolených mezích. Většinou se jedná o velkoobjemové akumulátory a velkou kapacitou, ale malým napětím. Proto se články zařazují sériově-parallelně. Dřívější provedení bylo skleněné, dnes jsou měněny za modernější systémy (někdy i bezúdržbové).

V současné době je stále velký nárůst instalovaného výkonu z obnovitelných zdrojů energie (především FV elektráren). Regulace velkého počtu nestabilních zdrojů je problematická. Proto je otázka akumulace elektrické energie důležitá.

Jestliže fluktuace výkonu neodpovídá aktuální potřebě trhu s elektřinou je nutné odpojení zdrojů nebo minimálně omezování jejich výkonu. Tyto změny se projevují ve větším opotřebování strojů a zařízení, které může vést až k prodloužení servisních hodin. Tyto aspekty se následně projevují do ekonomiky celých jednotek.

10.5.1 Baterie pro primární potřeby

Baterie pro primární potřeby jsou ve většině případů starší konstrukce, ale osvědčených typů. Nasazení těchto prostředků je podmíněno vynikající spolehli-

vostí i za cenu vyšší údržbu. Jako příklad nasazení můžeme uvést již zmiňované jaderné elektrárny. Stále se spoléhá na olověné akumulátory, které bývají ve většině případů mírně modernizované. Dalšími typy baterií jsou hydroxidové baterie, které také vynikají svojí spolehlivostí.

10.5.2 Baterie pro sekundární činnosti

Baterie pro sekundární činnost se rozumí systémy, které nejsou náročné na obsluhu a jejich případný výpadek nezpůsobí výrazné škody. Do této kategorie můžeme zařadit veškeré průtokové baterie, které jsou mimořádně vhodné pro dlouhodobou akumulaci energie z OZE, popřípadě přímo v distribučních nebo přenosových sítích, kde v jednotlivých rozvodnách mohou plnit funkci jakési kompenzace toků výkonů.

Velikost baterií zde není na závadu a výhody z nepřerušeno provozu, malá údržba, menší kapacita ale rychlé přizpůsobování se situaci (rychlost reakce do 2 ms) dělá z těchto baterií vynikající prostředek.

Též baterie NaS jsou ve svém vývoji daleko a dnes je možné na trhu koupit jednotky o nominálním výkonu 1 MW a kapacitě 12 MWh. Tyto akumulční prostředky slouží právě v uzlech distribučních sítí. V budoucnu se počítá s nasazením právě na OZE.

Lithiové baterie nejsou vhodné příliš pro energetiku. Jejich zatím stále vysoká cena a relativně malá životnost je pasuje do role malých baterií pro startování například záložních generátorů, popřípadě pro malé aplikace FVE.

10.6. Akumulační systémy vhodné pro OZE

10.6.1 Specifikace vhodných akumulčních systémů

Pro každou aplikaci jsou vhodné odlišné systémy. Jak uvádí tabulka 10.5, je zejména pro FVE důležité, kde se instalace nachází. K tomu je nutné přizpůsobit i výběr akumulčního systému. [10]

<i>Systémový identifikátor</i>	<i>Třída 1</i>	<i>Třída 2</i>	<i>Třída 3</i>	<i>Třída 4</i>
<i>Solární frakce</i>	100%	70-90%	okolo 50%	<50%
<i>Akumulační velikost (dny)</i>	3->10	3.5	1.3	okolo 1
<i>Důležité vlastnosti baterií</i>				
<i>Počet cyklů</i>	<i>nízký (<300)</i>	←————→		<i>vysoký (>1200)</i>
<i>Schopnost odolat dlouhou dobu v hlubokém vybití</i>	<i>Důležité</i>	←————→		<i>Méně důležité</i>
<i>Nízké samovybitení</i>	<i>Důležité (<1% za měsíc)</i>	←————→		<i>Méně důležité (5% za měsíc)</i>
<i>Opatření proti kyselému vrstvení</i>	<i>Důležité</i>	←————→		<i>Méně důležité</i>
<i>Odpor vůči korozi</i>	<i>Důležité</i>	←————→		<i>Méně důležité</i>

Tab. 10.5: Přehled důležitých vlastností pro FVE baterie [10]

V současné době jsou stále ještě používané olověné akumulátory s tekutým elektrolytem, tak zejména nastupující generace gelových akumulátorů, které jsou bezpečnější v provozu, vyžadují minimální údržbu a nehrozí u nich příliš velké sulfatování. Tak kvůli kvůli jejich ceně i schopnosti hlubokých vybití a častých cyklů. Lithiové baterie se začínají používat u malých aplikací, zejména v hybridních systémech malých rodinných domů.



Obr. 10.19: Olověné akumulátory v reálné aplikaci [10]

Níže uvedený příklad (obrázek 10.20) ilustruje důležitost integrace samotného zařízení a nákladů na provoz. Baterie vždy zvýší náklady na provoz systémů (minimálně při počáteční investici) ve většině autonomních provozů. Například olověné baterie mají nižší přízovaci náklady, jejich cena již příliš klesat nebude. Cena akumulace může klesat pouze pokud budeme nasazovat zařízení s větší specifickou energetickou hodnotou.

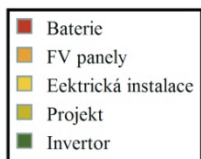
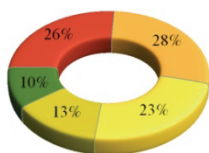
U moderních zásobníků energie je limitující zatím vyšší cena za kWh elektrické energie při dodávce a nižší účinnost těchto zařízení, než dosahují v současné době klasické olověné baterie. Další zdražení energie, potažmo instalace je stěží akceptovatelné spotřebiteli.

Akumulace energie (jak tepelné, tak elektrické) bude v budoucnu velice důležitá. V současnosti je potřeba akumulátorů vnímána především z pohledu obnovitelných zdrojů, které svým charakterem jsou stochastickými výrobními energie.

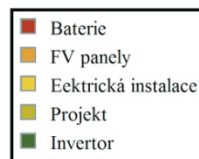
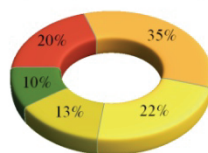
Udržitelnost rozvoje společnosti je s OZE bezpodmínečně spjata. Jakýkoliv neobnovitelný zdroj je časově omezen. Dalším pozitivem uložitel energie je relativní energetická nezávislost a soběstačnost státu.

V neposlední řadě se skladiště energie uplatní v již dříve zmíněných tzv. chytřích sítích, které budou schopny vyhodnocovat aktuální potřeby zákazníků.

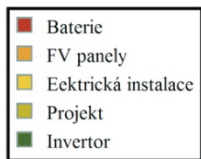
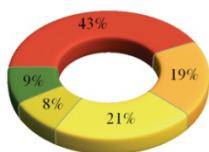
Počáteční investice komponent
(cenový index = 100%)



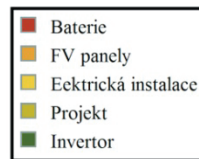
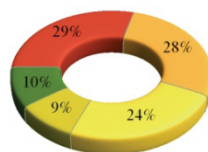
Počáteční investice komponent
(cenový index = 102%)



20 let životnosti zařízení
(cenový index = 288%)



20 let životnosti zařízení
(cenový index = 248%)



Obr. 10.20: Porovnání nákladů FVE systému ze dvou hledisek. Grafy vlevo řeší systém, který je navržen na malou cenu komponent, tedy na počáteční cenu. Grafy vpravo ukazují výsledný stav optimalizovaný na náklady na životnost zařízení. Přesné náklady na počáteční investici (horní grafy) a náklady na životnost zařízení (spodní grafy) počítají s anuitní metodou a jsou normalizovány pro počáteční investici pro systém optimalizovaný na cenový index = 100%. Výchozí parametry: výroba 1500 kWh, efektivní úroková míra 6%; životnost komponent: FV 20let, elektronika 15let, baterie odpovídají ze zkoušek a simulací viz [10].

Akumulace pro malé vodní elektrárny

Malé vodní elektrárny (MVE) stejně jako velké vodní elektrárny lze dobře predikovat z hlediska průtoku na vodních stavech. Náhlé změny se zde neodehrávají pouze, stojí-li MVE přímo pod nádrží, která je akumulací charakteru. Zde se ovšem s tímto jevem počítá a je vysloveně poptávám ze strany regulátora trhu s elektřinou.

Akumulace pro fotovoltaické elektrárny

Pro malé aplikace jsou vhodné zejména elektrochemické systémy nebo moderní setrvačníky. Mimořádně vhodné je použití baterií zejména v domovních instalacích. Průmyslové aplikace vyžadují komplexnější přístup a návrh.

FVE mají zvýšené požadavky na akumulaci, protože stochastické změny výkonů jsou větší než například také u kritizovaných VTE. Na systémy je kladen požadavek okamžité dodávky energie, popřípadě okamžité krytí nadvýroby. Zde není možné použít systémů pracujících ve velkých časových intervalech (již řádově desítky sekund).

Z výše uvedených metod jsou vhodně průtokové baterie typu REDOX, či lithium-iontové nebo stále ještě klasické olověné akumulátory (ovšem s výhradami), jak již bylo řečeno několikrát výše.

Akumulace pro větrné elektrárny

Větrné elektrárny mají stejné požadavky jako FVE. Nejedná se již o malé výkony jako v předešlé úvaze, ale velké celky – větrné parky. Pro ně (například Kryštofovy Hamry, kde celkový instalovaný výkon je 42 MW) jsou vhodné menší jednotky založené na systému CAES nebo AA-CAES, přečerpávací vodní elektrárny (nutné elektrické propojení a vhodné geofyzikální podmínky) a s výhradou vodíkové hospodářství. Daná vhodnost systému závisí na ekonomické propozici.

Specificky u VTE Kryštofovy Hamry je měsíční průměrný výkon 10,5 MW, tj. 25,0 % instalovaného výkonu, maximum pak 42,2 MW.

Pro představu stochastické výroby je zde uvedena bilance provozu farmy [10]:

- 3,6 % času nedodává nic,
- 59 % času dodává 20 % instalovaného výkonu a méně,
- 82 % času dodává 50 % instalovaného výkonu a méně.

Naopak, více než:

- 50 % instalovaného výkonu dodává pouze po 18 % času,
- 80 % instalovaného výkonu dodává pouze po 7 % času,
- 90 % instalovaného výkonu dodává pouze po 3 % času ,
- zbytek jsou špičky, tvořící až již zmíněných 42 MW sumarizačně.

Akumulace u zdrojů využívajících biomasu

Zde je vhodná akumulace prostřednictvím tepelné energie, zejména systému Ruths s využitím tepelných čerpadel. Všeobecně se akumulace prostřednictvím tepelné energie vyznačuje vysokou mírou efektivity a velké kapacity (v poslední době se uvažuje o využití i latentního tepla). Z hlediska biomasy není ovšem potřeba velkých akumulátorů energie. Již sama biomasa je akumulátor energie. Tudíž návrh zařízení v tomto případě by byl neefektivní a ekonomicky těžko odůvodnitelný, vyjma náhlých změn termodynamických požadavků odběru.

10.7. Literatura

- [1] ESA (2009), dostupné z URL: <<http://www.electrictystorage.org/ESA/technologies/>>, datum citace: 18.3.2010
- [2] Gatzen, Ch. The Economics of Power Storage. Oldenbourg Industrieverlag, München. (2008), 254 pages. ISBN 978-3-8356-3138-0
- [3] Grazzini, G., Milazzo, A. Thermodynamic analysis of CAES/TES systems for renewable energy plants. Renewable Energy, Volume 33, Issue 9, September 2008, Pages 1998-2006, ISSN 0960-1481
- [4] Gregor J.; Uher J.; Radil L. Nové možnosti akumulace velkých objemů elektrické energie. In Proceedings of the 9th International Scientific Conference EPE 2008. 2008. p. 67 - 71. ISBN 978-80-214-3650-3.
- [5] Jirsa, M. Vysokoteplotní supravodiče a akumulace elektrické energie, Cyklus přednášek 2010 EGÚ Praha, seminář č. 6. Praha 2010
- [6] Kiehne, H., A. Battery technology handbook. Expert Verlag, Renningen-Malsheim. 2003, 543 pages. ISBN: 0-8247-4249-4
- [7] Kratochvíl T. Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 80s.
- [8] Krbal, M. Výroba elektrické energie větrnými elektrárnami a možnosti její akumulace. Bakalářská práce. Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2007
- [9] Linden D., Reddy B.T. Handbook of batteries, The McGraw-Hill Companies, Inc. (2002), 1506 pages. ISBN 0-07-135978-8
- [10] Lague A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. ISBN: 0-471-49196-9, John Wiley & Sons, 2010
- [11] Matoušek, A. Výroba elektrické energie, Skriptum, Vysoké učení technické Brno, 2005
- [12] Radil L.; Bartošík T.; Mastný P. Problems of Wind Power Plants from Point of View of Grid. In Energy Problems and Environmental Engineering, WSEAS e-journal Energy and Environment. WSEAS Press. 2009. p. 369 - 373. ISSN 1790-5095.
- [13] Radil, L. Eliminace diskontinuity dodávky energie z obnovitelných zdrojů. Pojednání o dizertační práci. Brno (2010).
- [14] Ries, G., Neumueller, W., H. Comparison of Energy Storage in flywheels and SMES. Physica C357-360. 2001, pp 1306 – 1311.
- [15] Shively, D., Gardner, J., Haynes, T., Ferguson, J. Energy Storage Methods for Renewable Energy Integration and Grid Support. 2008 IEEE Energy
- [16] Thelen R.F.; Gattozzi, A.; Wardell, D.; Williams, A. A 2-MW Motor And ARCP Drive for High-Speed Flywheel. Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE , vol., no., pp.1690-1694, Feb. 25 2007-March 1 2007
- [17] Velek, V.: Zkušenosti z provozu větrného parku 21x2 MW Kryštofovy Hamry – II. In: ČK CIRED 2009, Tábor, ČR, číslo referátu: 10, 1-10
- [18] Webová stránka: <http://knol.google.com/k/-/com1631csgjs7/2wp0uz/nasbattery.gif&w=524&h=276&ei=8vbfTpmSB4WC8gPyleTvBA&zoom=1&iact=hc&vpx=733&vpy=167&dur=2667&hovh=163&hovw=310&tx=190&ty=73&sig=118423196168522567698&page=1&tbnh=108&tbnw=205&start=0&ndsp=30&ved=1t:429,r:4,s:0&biw=1243&bih=941>, citováno dne: 5.12.2011
- [19] Zhong, Y.; Zhang, J.; Li, G.; Liu, A. Research on Energy Efficiency of Supercapacitor Energy Storage System. Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on , vol., no., pp.1-4, 22-26 Oct. 2006
- [20] Remy, H. Anorganická chemie -I.díl, Praha 1961, SNTL

11. Dodatek - Přehled základních vztahů termodynamiky

Termodynamický stav látky nebo soustavy je charakterizován měřitelnými veličinami, jejichž hodnota nezávisí na tom, jakým způsobem svého stavu dosáhly (elementární změny veličin jsou totální diferenciály). Tyto veličiny se nazývají **stavové** (teplota, tlak, hustota, měrný objem, měrná tepelná kapacita, entalpie).

Teplota – jednotkou teplotního rozdílu je teplotní stupeň, který se rovná 273,16tému dílu teplotního rozdílu mezi absolutní nulou a teplotou trojného bodu vody. Teplota trojného bodu vody, která odpovídá rovnovážnému stavu ledu, vody a vodní páry je základním teplotním bodem termodynamické teplotní stupnice. Teplota 273,16 K = 0°C. V termodynamických výpočtech není možné vždy zaměnit teplotu v K za teplotu ve °C (např. Stavová rovnice, II zákon termodynamiky).

Tlak – podíl velikosti síly, působící kolmo k ploše a obsahu této plochy. Jednotkou tlaku je Pascal (Pa). Pascal - tlak, který vyvolá síla 1N, rovnoměrně rozložená na ploše s obsahem 1m², kolmé ke směru síly. Pa = (N.m⁻²) = (kg.m⁻¹.s⁻²).

Hustota (měrná hmotnost) – hmotnost látky dělení jejím objemem.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg.m}^{-3}) \quad (11.1)$$

$$\text{Měrný objem} - \text{převrácená veličina hustoty} \quad v = \frac{1}{\rho} \quad (\text{m}^3.\text{kg}^{-1}) \quad (11.2)$$

Měrná tepelná kapacita – množství tepla, které je třeba k zvýšení teploty jednotkové hmotnosti nebo objemu o 1 K. Uvedená definice platí při tepelně technických výpočtech pro pevné a kapalně skupenství, kde změna teploty a tlaku nemění zřetelně objem. U plynů a par je třeba rozlišovat tepelnou kapacitu při konstantním tlaku (c_p) a při konstantním objemu (c_v), které se od sebe značně liší. Pro plyny platí vztah: $c_p - c_v = r$, r – plynová konstanta (J.kg⁻¹.K⁻¹) (11.3)

I. zákon termodynamiky – vyjadřuje ekvivalenci tepelné a mechanické energie. Je to vlastně zákon o zachování energie, aplikovaný na termodynamické děje. Matematický zápis v diferenciálním tvaru: $dq = du + p.dv$ (J.kg⁻¹) (11.4)

$$\text{Diferenciál vnitřní energie: } du = c_v .dT \quad (11.5)$$

Entalpie – definována vztahem $h = u + p.v$. Přepsáním do diferenciální formy lze získat druhý tvar I. zákona termodynamiky.

$$dh = du + d(p.v) = du + p.dv + v.dp = dq + v.dp$$

$$\text{Po úpravě: } dq = dh - v.dp \quad (11.6)$$

Poznámka: Při praktických aplikacích je třeba mít na paměti, že v obou tvarech I. zákona termodynamiky je totálním diferenciálem pouze diferenciál vnitřní

energie **du!** Při výpočtu předané tepelné energie $\int dq$ nebo tlakové práce $\int v.dp$ se musí respektovat integrační cesta, daná termodynamickou změnou při transformaci tepelné energie nebo konání práce.

Stavová rovnice – vyjadřuje závislost mezi třemi stavovými veličinami **p, v a T** ideálního plynu.

$$p.v = r.T, \text{ respektive } p.V = m.r.T \quad (11.7)$$

kde

r..... plynová konstanta (J.kg⁻¹.K⁻¹)

Fyzikální význam plynové konstanty – práce, kterou vykoná 1 kg ideálního plynu při změně teploty o 1 K při konstantním tlaku.

Ideální plyn – vyhovuje dokonale stavové rovnici a má konstantní hodnoty měrných tepelných kapacit **c_p** a **c_v**. Řada skutečných plynů, (např. kyslík, dusík, vzduch) se chovají v souladu se stavovou rovnicí s vyhovující přesností v dosti širokém rozsahu tlaků a teplot.

Reálné plyny – neřídí se přesně stavovou rovnicí. Pro výpočet se používají modifikované tvary, které berou v úvahu vliv velikosti molekul, vliv mezimolekulárních sil a závislost měrných tepelných kapacit na teplotě a tlaku. Tyto modifikované tvary stavové rovnice, vystihující s dostatečnou přesností např. chování vodní páry v širokém rozmezí teplot a tlaků jsou velmi složité a tedy pro praktické výpočty nevhodné. Proto se při tepelně technických výpočtech v energetice používají vhodné diagramy (h-s; T-s), nebo, zejména v poslední době přístupné počítačové programy, např. IAPWS97

<http://www.simtel.net/free/Engineering/IAPWS97/76235.html>

II. zákon termodynamiky – vyjadřuje nemožnost 100% transformace tepelné energie na mechanickou práci. Dále jsou uvedeny dvě nejznámější slovní definice:

Není možné přeměnit 100% tepelné energie, dodané do tepelného oběhu na mechanickou práci. Opačný postup je možný. Z 1 kWh lze získat 3600 kJ tepla.

Tepelná energie samovolně přechází pouze z vyšší na nižší teplotní úroveň.

$$\text{Matematická definice: } dq \leq T.ds \quad (11.8)$$

kde

s..... entropie (J.kg⁻¹.K⁻¹)

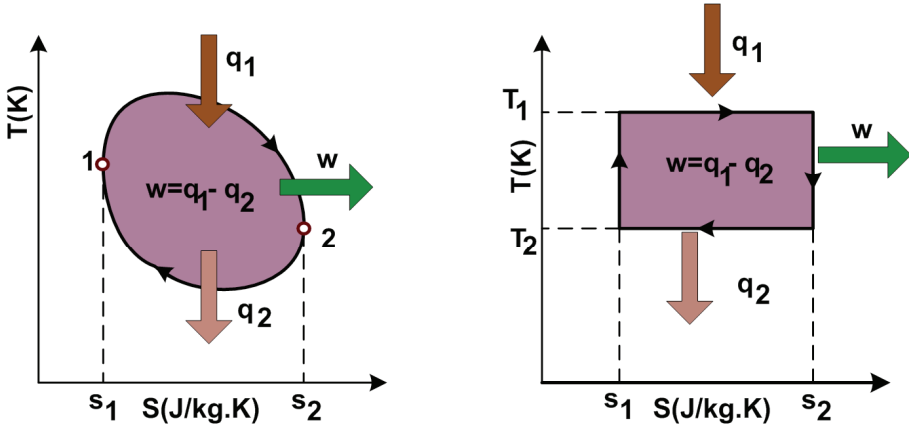
Poznámka: = platí pro vratné změny, < pro nevratné změny.

Entropii lze chápat jako určitou míru pravděpodobnosti stavu izolované soustavy. Veškeré samovolné změny probíhající v této soustavě vyvolávají růst její entropie.

Vratné termodynamické změny – quasistatické děje, tedy děje, které probíhají jen samými rovnovážnými stavy a mohou tedy probíhat oběma směry. Skuteč-

né termodynamické procesy jsou vyvolány tlakovými a teplotními rozdíly, jsou samovolné a nemohou probíhat oběma směry. Jedná se o změny nevratné.

Tepelný oběh – řada termodynamických změn daného média, uspořádaná tak, že se po uskutečnění těchto změn médium vrátí do původního stavu.



Tepelný oběh v T – s diagramu

Carnotův vratný oběh v T – s diagramu

Obr. 11.1: Znárodnění tepelného oběhu v T – s diagramu

Tepelná (termická) účinnost oběhu – určuje míru úspěšnosti transformace tepelné energie přivedené do oběhu na mechanickou energii. Z obrázku 11.1 plyne

$$\text{matematická definice tepelné účinnosti oběhu: } \eta_t = \frac{w}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \quad (11.9)$$

Tepelná účinnost Carnotova oběhu - definuje nejvyšší možnou tepelnou účinnost oběhu, realizovaného mezi teplotami T_1 a T_2 pracovního média. Z obrázku 11.1 a matematické definice II. zákona termodynamiky (rovnice 11.8) plyne:

$$\eta_t^C = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{T_1 \cdot (s_1 - s_2) - T_2 \cdot (s_1 - s_2)}{T_1 \cdot (s_1 - s_2)} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (11.10)$$

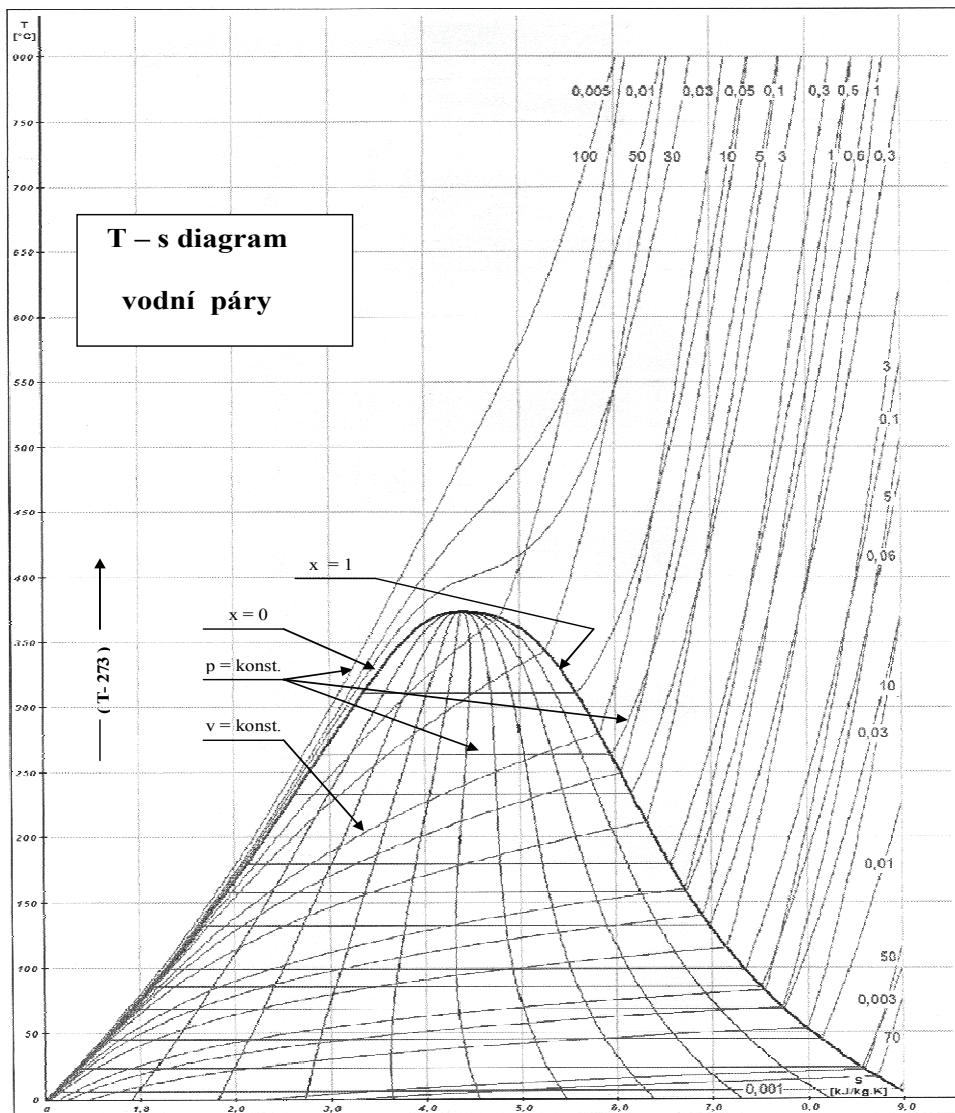
Z obrázku 11.1 a rovnice 11.10 plyne zvláštní postavení tepelné účinnosti. Teoretická max. hranice není rovna 1, závisí pouze na teplotním poměru mezi teplotou média odvádějícího a dodávajícího tepelnou energii, tedy na poměru mezi nejnižší a nejvyšší teplotou pracovního média v průběhu pracovního cyklu. Při v současné době dosahovaných teplotních rozpětích pracovního média (vodní páry) moderních bloků s kondenzačními turbínami (teplota admisní páry cca 600 °C, teplota kondenzace cca 30 °C) je limitní tepelná účinnost srovnávacího Carnotova

$$\text{oběhu se stejným rozsahem teplot } \eta_t^C = 1 - \frac{273 + 30}{273 + 600} = 0,66$$

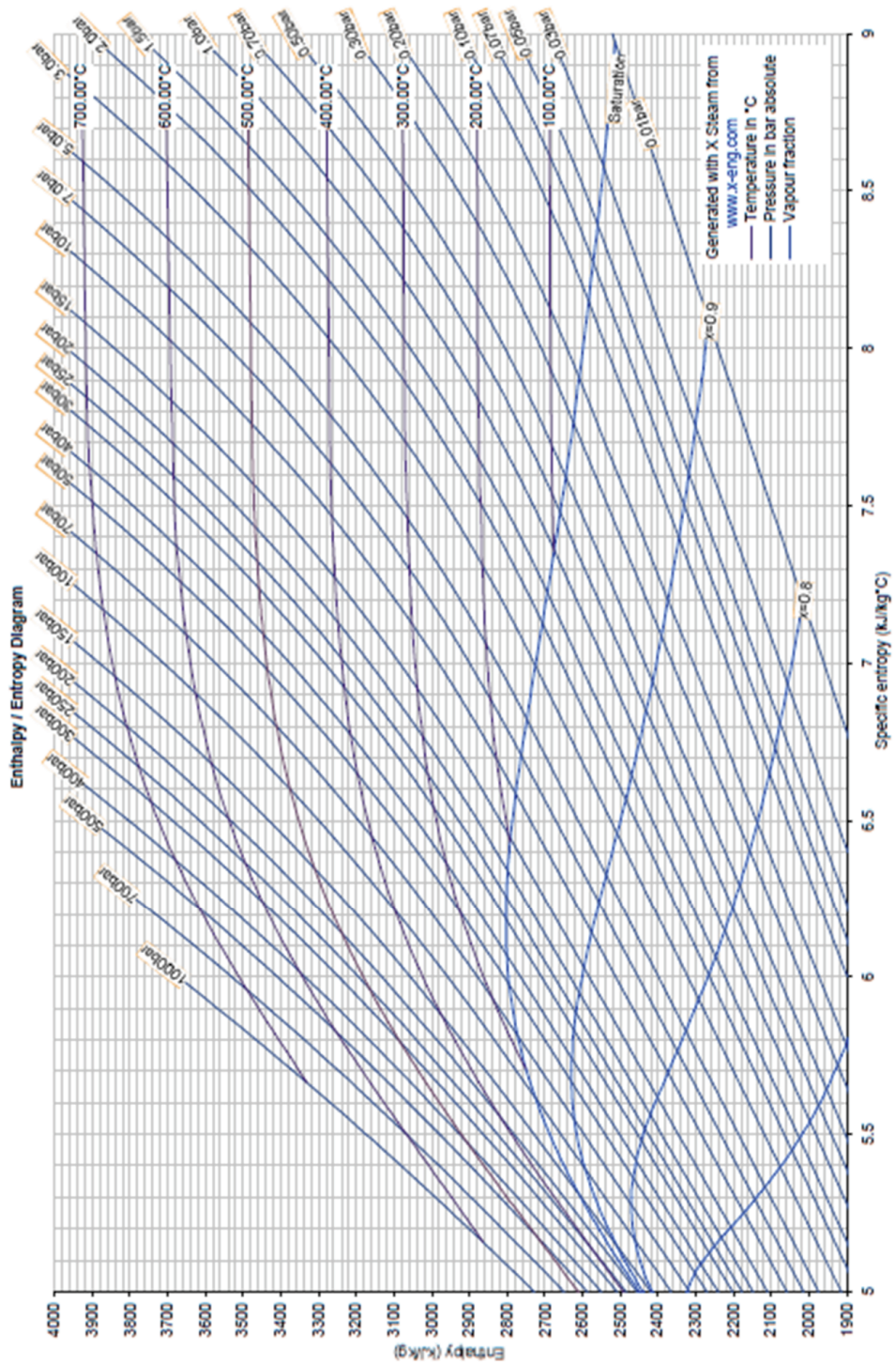
Pro znázornění termodynamických změn probíhajících v tepelném oběhu se nejčastěji pro svou názornost (plocha pod čarou změny je ekvivalentní dodanému ($ds>0$), nebo odvedenému ($ds<0$) teple) používá **T – s** diagram. (obrázek 11.2). Pro číselné výpočty je pak vhodnější **h – s** diagram (obrázek 11.3).

$$\text{Suchost páry: } x = \frac{\text{hmotnost syté páry v 1 kg páry}}{\text{1 kg páry}} \quad (11.11)$$

Suchost x je definována pro oblast mezi levou ($x=0$) a pravou ($x=1$) mezní křivkou.



Obr.11.2: T – s diagram vodní páry



Obr. 11.3: h – s diagram vodní páry

Proudění plynů a par – řídí se dvěma základními zákony; rovnicí kontinuity a zákonem o zachování energie, který je vyjádřen Bernoulliho rovnicí pro plyny za předpokladu stacionárního (ustáleného) proudění ideálního plynu.

Rovnice kontinuity:

$$S_1 \cdot c_1 \cdot \frac{1}{v_1} = S_2 \cdot c_2 \cdot \frac{1}{v_2} \quad (11.12)$$

kde

c rychlost proudění plynu ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

S průtočná plocha (m^2)

V měrný objem plynu ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)

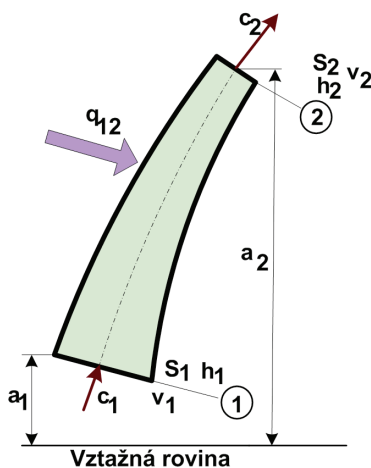
a vzdálenost od vztažné roviny (m)

Bernoulliho rovnice:

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2} + a_1 \cdot g + q_{12} = h_2 + \frac{c_2^2}{2} + a_2 \cdot g \quad (11.13)$$

kde

h entalpie plynu ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)



Obr. 11.4: Proudění plynu kanálem

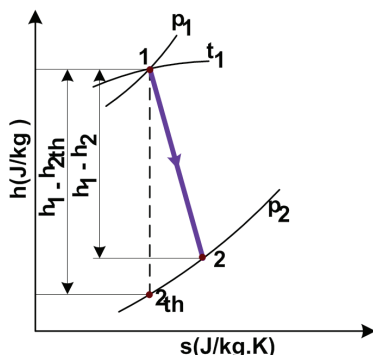
V případě adiabatického proudění ($q_{12}=0$) a zanedbání změny potenciální energie pro její obvykle malou hodnotu (při rozdílu vertikální vzdálenosti 10m odpovídá změna potenciální energie 100 J/kg) přejde rovnice do tvaru:

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \quad (11.14)$$

Z rovnice 11.14 plyne vztah pro výpočet výstupní rychlosti ideálního plynu při adiabatické expanzi.

$$c_2 = \sqrt{2 \cdot \Delta h + c_1^2} \quad (11.15)$$

Při proudění reálných plynů a par se část kinetické energie plynu přemění vlivem tření na teplo, entropie se zvýší a výstupní rychlost se sníží (viz obrázek 11.5). V zužujícím se kanálu může plyn získat maximální rychlost, která se rovná rychlosti zvuku v daném prostředí. Nadzvukové rychlosti proudění lze dosáhnout použitím tzv. Lavalovy dýzy, která se od průřezu, kde plyn proudí rychlostí zvuku ve směru proudění rozšiřuje. Průtočná hmotnost plynu Lavalovou dýzou je tedy jednoznačně určena rychlostí zvuku, stavovými veličinami plynu v nejužším průřezu dýzy a plochou tohoto průřezu.

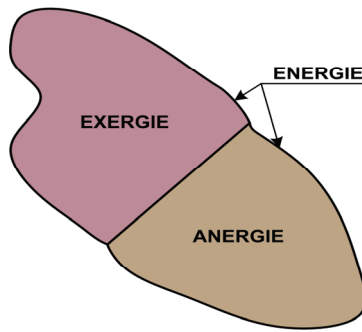


Obr. 11.5: Expanze reálného plynu

Kvalitativní hodnocení tepelně technických procesů

Omezenou transformovatelnost tepelné energie plně popisuje II. zákon termodynamiky. Jeho velkou nevýhodou při praktických aplikacích je ale to, že ve svém vyjádření používá stavovou veličinu **entropii (kJ/kg.K)**, která se obtížně vyjadřuje, je nenázorná a pro kvalitativní hodnocení určitého procesu je obvykle nutné provést rozbor celého systému (oběhu). Stručný důsledek platnosti II. zákona termodynamiky je poznatek kvalitativní neekvivalentnosti různých energetických forem.

Realita omezené transformovatelnosti některých energetických forem jako důsledek platnosti II. zákona termodynamiky umožňuje představit si každou omezeně transformovatelnou energii složenou ze dvou dílů: z části, která je neomezeně transformovatelná a částí, kterou nelze žádným způsobem transformovat. Pro neomezeně transformovatelnou část energie se vžil název **exergie**, pro netransformovatelnou část název **anergie**. Toto rozdělení energie na exergii a anergii musí být samozřejmě komplementární (obrázek 11.6). Vždy platí: díl energie, který není exergií je anergií.



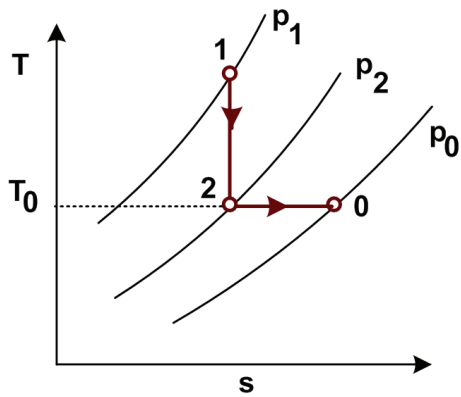
Obr.11.6: Znázornění exergie a anergie

Jinak řečeno, součet exergie a anergie je konstantní. V průběhu všech transformačních procesů se vždy posouvá hranice mezi exergií a anergií ve prospěch anergie. Pro exergii tedy neexistuje žádný obecný zákon o jejím zachování. Během každého reálného, tedy nevratného transformačního procesu se vždy část exergie přemění na anergii. Přírůstek anergie na účet exergie je cena, kterou je nutno platit za nevratnost všech přírodních, reálně se vyskytujících procesů. Praktický význam exergie pro ekonomické řízení veškeré průmyslové činnosti a tedy i energetiky vyplývá z poznatku, že technologické procesy nevyžadují pro svou realizaci energii ale exergii. Ekonomický význam exergie vyplývá z toho, že **neplatí** zákon o jejím zachování. Exergie se nevratnými procesy mění na anergii. Exergie se v průběhu transformačního řetězce trvale a vždy ztrácí a tuto ztrátu lze vždy vyjádřit finančně.

Je zřejmé, že snaha po maximálním snížení exergetické ztráty (= maximálnímu přiblížení ideálnímu vratnému ději) je ekonomicky nesmyslná. Vzrostly by tím extrémně investiční náklady. Investor i provozovatel by měl být vždy veden snahou po dosažení hranice ekonomicky optimální exergetické ztráty.

Exergie hmotnostního toku

Exergii hmotnostního toku pracovního média (obvykle plynu, páry nebo kapaliny) je výhodné vyjádřit pomocí stavových veličin. Maximální na práci transformovatelná část energie stacionárního toku pracovního média se získá uvedením látky vratnou změnou do rovnovážného stavu s okolím při splnění podmínky odvodu tepla pouze při teplotě okolí. Příklad grafického znázornění tohoto procesu je na obrázku 11.7.



Obr. 11.7: Práce 1 kg média po integrační cestě 1–2–0 plyne z I. zákona termodynamiky

Doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D., doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.,
doc. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D., Ing. Jan Macháček, Ph.D.,
Ing. Michal Ptáček, Ing. Lukáš Radil, Ing. Tomáš Bartošik,
Ing. Tomáš Pavelka

Obnovitelné zdroje elektrické energie

Vydalo České vysoké učení technické v Praze,

Zikova 1905/4, 166 36 Praha 6

Grafický návrh obálky: Michaela Kubátová Petrová

Vytiskl EUROPRINT, a.s., Pod Kotlářkou 3, 150 00 Praha 5

Počet stran 256

Vydání první. Praha 2011

ISBN 978-80-01-04937-2