

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

Diplomová práce

Akumulace elektrické energie z
obnovitelných zdrojů energie

Petr Jílek

2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr JÍLEK**
Osobní číslo: **E11N0094P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište a uveďte příklady obtížně regulovatelných obnovitelných zdrojů elektrické energie.
2. Analyzujte způsoby akumulace elektrické energie a jejich vhodnost z hlediska následného využití (RD, průmysl a pod.).
3. Zaměřte se zejména na akumulaci elektrické energie pomocí hydrogen generátorů, technologie Vanadium-redox a superkapacitorů.
4. Porovnejte uvedená zařízení z hlediska ekonomického, bezpečnostního a doby akumulace elektrické energie.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**


Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jan Škorpil, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie


Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan

L.S.



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná diplomová práce se zabývá akumulací elektrické energie. Především je zaměřena na akumulaci elektrické energie pomocí vanadium - redox baterií, superkapacitorů a hydrogen generátorů. Dále se zabývá spotřebou elektrické energie u fiktivního rodinného domu, na kterém jsou jednotlivé akumulární technologie aplikovány a porovnány.

Klíčová slova

Obnovitelné zdroje, akumulace elektrické energie, vanadium - redox baterie, superkapacitory, hydrogen generátory, vodík, ..

Accumulation of electricity from renewable energy sources

Abstract

Submitted diploma thesis deals with the wind energy accumulation. It is in particular aimed at the wind energy accumulation using the vanadium - redox batteries, supercapacitors and hydrogen generators. It also deals with the power consumption in one fictional family house, where the individual accumulation technologies are applied and compared.

Key words

Renewable energy sources, energy storage, vanadium - redox batteries, ultracapacitors, hydrogen generators, hydrogen, ..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni 7. května 2013

Petr Jílek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Prof. Janu Škorpilovi za rady a připomínky k práci. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Josefu Ledvinovi za cenné rady a svým rodičům za podporu, které se mi během celého studia dostávalo.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	6
Úvod	7
1 Obnovitelné zdroje elektrické energie	8
1.1 Energie Slunce	9
1.2 Větrná energie	15
1.3 Geotermální energie	18
1.4 Energie vody	19
1.5 Energie biomasy	20
2 Způsoby akumulace elektrické energie	22
2.1 Elektrochemická přeměna - akumulace	25
2.1.1 Průtokové baterie	25
2.1.2 Zebra baterie	26
2.1.3 Olovněné baterie	26
2.1.4 Baterie Sodium – Sulfur	27
2.1.5 Lithiové baterie	27
2.1.6 NiCd akumulátory	28
2.2 Mechanické akumulací systémy	29
2.2.1 Setrvačníky	29

2.2.2	Přečerpávací vodní elektrárny	30
2.2.3	CAES systém	31
2.3	Chemická akumulace	32
2.3.1	Vodík	32
2.4	Elektrická akumulace	33
2.4.1	Superkapacitory	33
2.4.2	SMES systém	33
2.5	Přehled výhod a nevýhod používaných akumulačních technologií . . .	34
2.5.1	Využití akumulačních technologií	35
3	Akumulace elektrické energie pomocí hydrogen generátorů, superkapacitorů a vanadium - redox baterií	36
3.1	Hydrogen generátory	36
3.1.1	Vodík	36
3.1.2	Výroba vodíku, druhy hydrogen generátorů	37
3.1.3	Ukládání vodíku	43
3.1.4	Palivový článek	44
3.2	Superkapacitory	47
3.2.1	Rozdělení superkapacitorů	47
3.2.2	Výhody a nevýhody superkapacitorů	48
3.2.3	Technické parametry kapacitoru, superkapacitoru a akumulátoru	49
3.3	Vanadium-redox technologie	50
3.3.1	Princip nabíjení a vybíjení	50
3.3.2	Technické parametry vanadium redox baterie	52
4	Porovnání akumulačních technologií	53
4.1	Navržení vanadium - redox baterií na daný objekt	55
4.2	Navržení hydrogen generátorů na daný objekt	58

4.3	Navržení superkapacitorů na daný objekt	61
4.4	Doba akumulace elektrické energie	61
4.5	Bezpečnost	62
4.6	Ekonomická bilance	64
5	Závěr	66

Seznam tabulek

2.1	Využití akumulčních technologií	35
3.1	Porovnání technických parametrů	49
3.2	Technické parametry vanadium - redox baterie	52
4.1	Průměrná spotřeba elektrické energie v domě za 24 hodin	54
4.2	Průměrná spotřeba elektrické energie v období 00:00 - 08:00	55
4.3	Průměrná spotřeba elektrické energie v období 08:00 - 16:00	56
4.4	Průměrná spotřeba elektrické energie v období 16:00 - 00:00	56
4.5	Technické parametry vanadium - redox baterie, Cellcube FB 10-100, převzato z [24]	58
4.6	Technické parametry palivového článku FCgen-1300	59
4.7	Technické parametry hydrogen generátorů: Model 11.0 Generator a HySTAT-10-25	60

Seznam obrázků

1.1	Průměrný dopad slunečního svitu na území ČR za rok	9
1.2	Plochý kapalinový kolektor	10
1.3	Vakuový trubicový kolektor	10
1.4	Princip činnosti fotovoltaického článku	11
1.5	Složení fotovoltaického systému	12
1.6	Fotovoltaický systém spojený se sítí	12
1.7	Celková brutto výroba elektrické energie z fotovoltaických elektráren v ČR, 27.12.2012	13
1.8	Rychlost větru pro ČR udávaná v m/s	15
1.9	Celková brutto výroba elektrické energie z větrných elektráren v ČR, 27.12.2012	16
2.1	Rozdělení akumulčních systémů	24
2.2	Princip průtokové baterie	25
3.1	Systém pro výrobu vodíku pomocí parního reformování	39
3.2	Základní princip palivového článku	44
3.3	Princip fungování baterií vanadium redox	51

Seznam použitých zkratek a symbolů

<i>VRB</i>		Vanadium - redox baterie
<i>CAES</i>		Compressed Air Energy Storage
<i>SMES</i>		Superconducting magnetic energy storage
<i>SLPM</i>		Standard liter per minute
<i>U</i>	[V]	Elektrické napětí
<i>i</i>	[A]	Elektrický proud
<i>f</i>	[Hz]	Frekvence
<i>P</i>	[W]	Elektrický výkon
<i>C</i>	[F]	Kapacita
<i>t</i>	[s]	Čas
<i>E_j</i>	[J]	Energie jednorozměrného setrvačnicku
<i>E_d</i>	[J]	Energie dvojrozměrného setrvačnicku
<i>m</i>	[kg]	Hmotnost
<i>v</i>	[m/s]	Rychlost
<i>p</i>	[Pa]	Tlak
<i>ω</i>	[rad/s]	Úhlová rychlost
<i>r</i>	[m]	Poloměr
<i>J</i>	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti

Úvod

V této práci se zabývám obnovitelnými zdroji energie a technologiemi, které používáme pro akumulaci elektrické energie. Cílem práce je tedy popsat obnovitelné zdroje energie, analyzovat způsoby akumulace elektrické energie a porovnat jednotlivé akumulční technologie.

Práce je rozdělena do čtyř částí, kde první seznamuje s obnovitelnými zdroji elektrické energie. V druhé části jsou zmíněny způsoby akumulace elektrické energie. Na konci této kapitoly je uveden přehled kladů a záporů akumulčních technologií. Dále je zde uvedena vhodnost využití jednotlivých technologií. V třetí části se práce zaměřuje na popis hydrogen generátorů, superkapacitorů a vanadium - redox baterií. V poslední, čtvrté části, jsou hydrogen generátory, kapacitory a vanadium - redox baterie aplikovány na fiktivní rodinný dům. Na konci této kapitoly je uvedeno porovnání z hlediska ekonomického, bezpečnostního a doby akumulace elektrické energie.

Kapitola 1

Obnovitelné zdroje elektrické energie

Za obnovitelný zdroj energie se považuje takový zdroj, který má možnost se obnovovat. Přesná definice obnovitelných zdrojů energie je podle zákona 17/1992 Sb. o životním prostředí, §7, odstavec (2):

Obnovitelné přírodní zdroje mají schopnost se při postupném spotřebovávání částečně nebo úplně obnovovat, a to samy nebo za přispění člověka. Neobnovitelné přírodní zdroje spotřebováváním zanikají.[1]

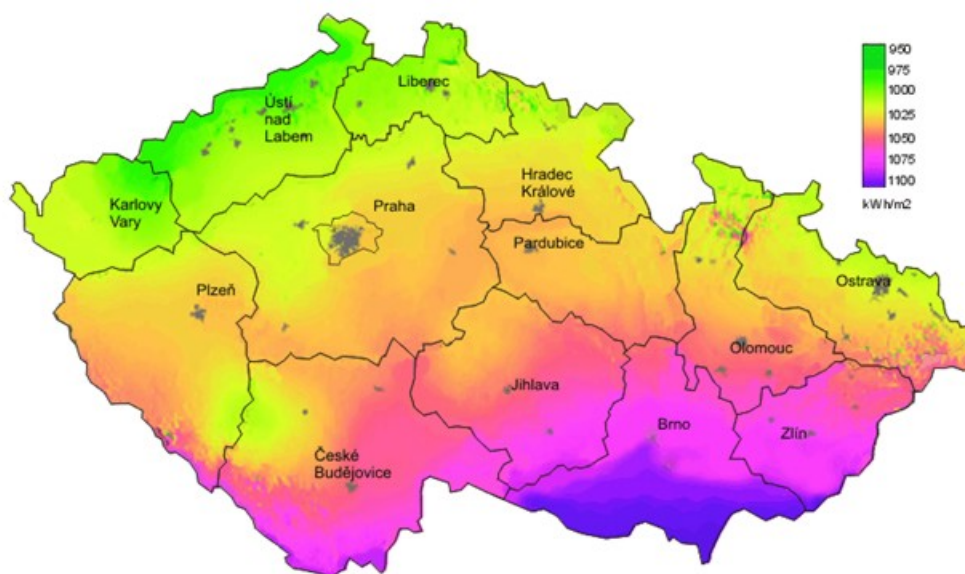
Je dobré si uvědomit, že veškeré zdroje energie, které se nachází na Zemi, pochází ze Slunce. Nebýt Slunce, tak na Zemi nejsou žádné obnovitelné zdroje a ani neobnovitelné zdroje energie.

Obnovitelné zdroje zvyšují každým rokem svůj podíl na celkové výrobě elektrické energie v České republice. Například v roce 2010 byl podíl obnovitelných zdrojů energie 6,9 %, v následujícím roce byl podíl již 8,5 %. Tento trend bude pokračovat dále, protože se představitelé Evropské unie rozhodli, že se musí omezit emise oxidu uhlíkového. Toto rozhodnutí se dotkne i České republiky. V roce 2020 má z obnovitelných zdrojů pocházet až jedna pětina z celkové výroby elektrické energie v Evropské unii.

1.1 Energie Slunce

Sluneční energie je pro nás vůbec nejdůležitější. Tato energie vzniká v nitru Slunce a to jadernými přeměnami. Díky sluneční energii vznikly v minulosti fosilní paliva - uhlí, ropa a zemní plyn. V současné době jsou stále používána, nicméně nastane doba, kdy se vyčerpají. Tyto zdroje elektrické energie se nedají obnovovat, právě proto se nazývají neobnovitelné zdroje energie.

Pokud chceme využít sluneční energii, tak ji napřed musíme zachytit. Existuje několik metod pro zachycení sluneční energie. Mezi nejvíce používané metody, patří solární kolektory a fotovoltaické systémy. Na Obrázku 1.1 je vidět průměrný dopad slunečního svitu v České republice za rok.



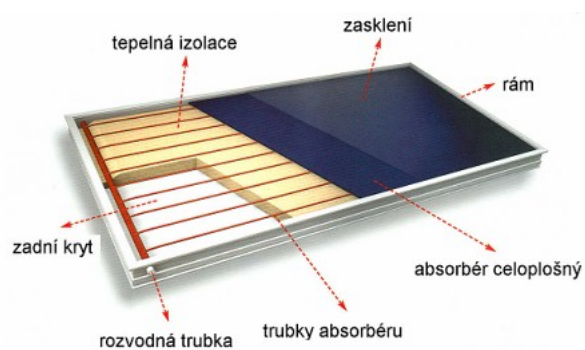
Obrázek 1.1: Průměrný dopad slunečního svitu na území ČR za rok, převzato z [12]

Solární kolektory

Solární kolektory slouží pro ohřev užitkové vody. Přeměňují energii ze Slunce na teplo. Teplo se pomocí média přepravuje do zásobníku, kde dochází k akumulaci. Jako

KAPITOLA 1. OBNOVITELNÉ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

médium se používá vzduch, voda a nebo také olej. Kolektor se skládá z několika částí, jak je vidět na Obrázku 1.2. Solární kolektory se dělí podle tvaru a to na ploché a trubicové.



Obrázek 1.2: Plochý kapalinový kolektor, převzato z [13]

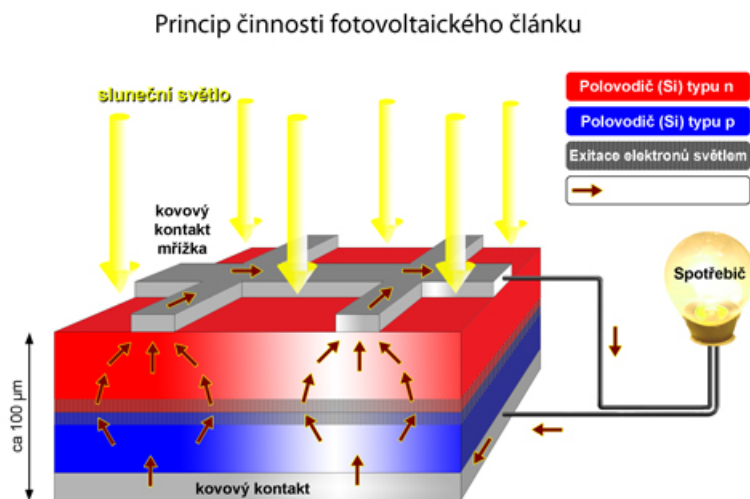
Ploché kolektory se dále dělí na vakuové a kapalinové. Vakuové kolektory mají nižší tepelné ztráty narozdíl od kapalinových kolektorů. Ještě větší účinnost má trubicový vakuový kolektor, který je zobrazen na Obrázku 1.3.



Obrázek 1.3: Vakuový trubicový kolektor, převzato z [17]

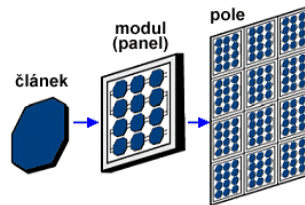
Fotovoltaické panely

Základem fotovoltaických panelů jsou solární články. Tyto solární články jsou tvořeny polovodičovými destičkami s PN přechodem. Jejich úkolem je přeměnit dopadající sluneční záření na elektrickou energii. Princip přeměny je naznačen na Obrázku 1.4. Pokud dopadají fotony na článek, tak svojí energií uvolňují z krystalové mřížky záporné elektrony a na přechodu PN se vytvoří napětí. Kladné a záporné náboje se začnou vyrovnávat po připojení spotřebiče. Toto vyrovnávání má za následek, že obvodem začne protékat elektrický proud.



Obrázek 1.4: Princip činnosti fotovoltaického článku, převzato z [18]

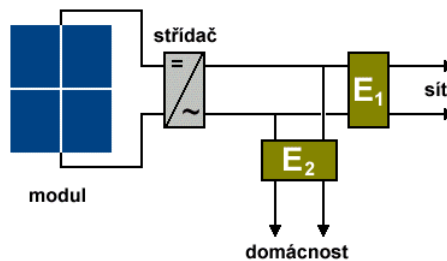
Pokud chceme zvýšit napětí i proud, tak musíme mezi sebou propojit více článků. Propojení článků je naznačeno na Obrázku 1.5.



Obrázek 1.5: Složení fotovoltaického systému, převzato z [19]

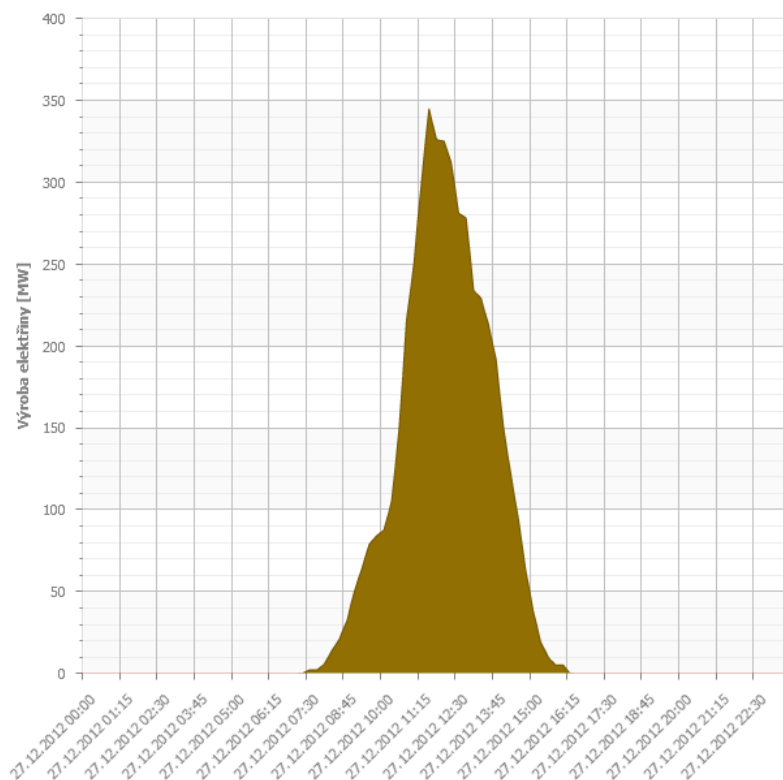
Připojení fotovoltaického systému k síti

Velké fotovoltaické systémy mohou být zapojeny tak, aby část nebo všechnu vyrobenou elektrickou energii dodávaly do veřejné rozvodné sítě. Označují se také jako systémy "grid-on". Zdrojem je opět fotovoltaický modul, stejnosměrné napětí je nejprve nutné ve střídači (měničích) transformovat na střídavé napětí 230 V/50 Hz. Zařízení musí splňovat přísné požadavky na bezpečnost, odolnost proti zkratu a přetížení a na správnou synchronizaci. Výhodou tohoto systému je, že spotřebiče v domácnosti mohou fungovat nezávisle na vnějším osvětlení. Při dostatku slunečního záření jsou napájeny z fotovoltaického modulu, v noci odebírají energii z rozvodné sítě. Elektroměry E_1 a E_2 měří energii odevzdanou nebo odebranou z rozvodné sítě.[14]



Obrázek 1.6: Fotovoltaický systém spojený se sítí, převzato z [14]

Následující Obrázek 1.7 zobrazuje celkovou výrobu elektrické energie z fotovoltaických elektráren v ČR, za jeden den. Jak je vidět, tak maximální výkon 345 MW byl dosažen v 11:30.



Obrázek 1.7: Celková brutto výroba elektrické energie z Fotovoltaických elektráren v ČR, 27.12.2012, převzato z [15]

Výhody a nevýhody sluneční energie

Dá se říci, že největší výhodou je výroba elektrické energie z nevyčerpatelného zdroje energie. Další výhodou je nenáročná obsluha a vysoká provozní spolehlivost. Mezi další výhody lze například zařadit bezhulčný provoz, snadná instalace solárního panelu. Při provozu nevznikají žádné emise a jiné škodlivé látky.

Mezi nevýhody patří hlavně velké kolísání intenzity záření v průběhu roku a z toho

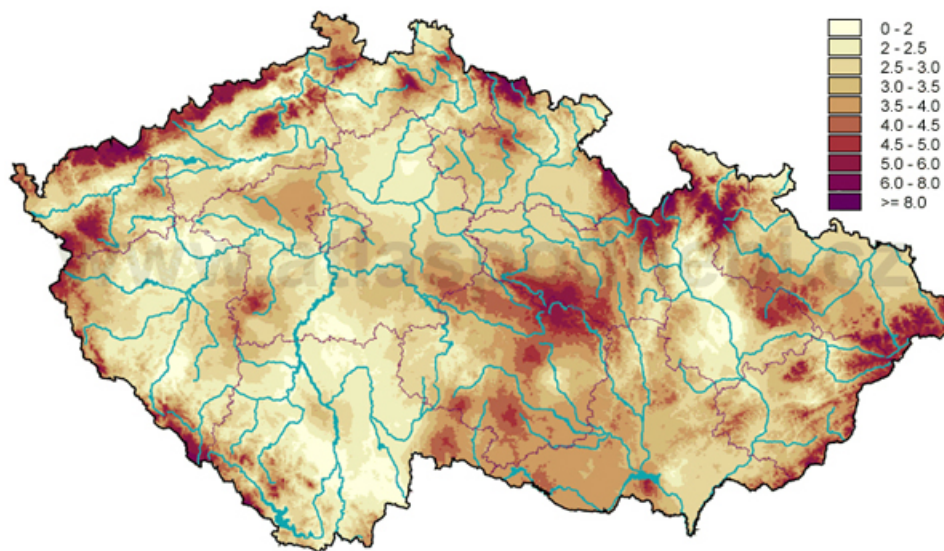
plynoucí nestálost dodávky. Lze jej tedy použít jako dodatekový zdroj energie, nicméně ne jako hlavní zdroj. Další nevýhodou na území ČR, je poměrně nízká průměrná roční intenzita slunečního záření. Velkou nevýhodou fotovoltaických systémů je malá účinnost přeměny energie a z toho vyplývající vysoké nároky na zastavěnou plochu. Mezi nevýhody se dá také zařadit malá životnost (cca 20 let), vysoké investiční náklady a potřeba záložního zdroje elektrické energie. Celkový instalovaný výkon solárních elektráren v ČR překonal 31. října 2012 hodnotu 2 000 MW.

1.2 Větrná energie

Větrná energie vzniká působením sluneční energie. Nad rovníkem se vzduch ohřívá a jelikož je lehčí než studený vzduch, tak stoupá vzhůru. Na toto uvolněné místo se dostává z obou pólů studený vzduch. Teplý vzduch proudí směrem k pólům a postupně se ochlazuje. Až se teplý vzduch na pólech úplně ochladí, tak se vrátí zpět k rovníku. Tento cyklus se opakuje stále dokola a vzniká nám přitom vítr. Větrnou energii využíváme k výrobě elektrické energie.

Podmínky v České Republice

Česká republika je vnitrozemský stát, to znamená, že se u nás projevuje kolísání rychlosti a směru větru. Nejlepší oblasti pro využití větrné energie jsou hřebeny hor a velké planiny. Jak je vidět na Obrázku 1.8, tak nejlepší podmínky jsou na vysočině a na vrcholcích hor.

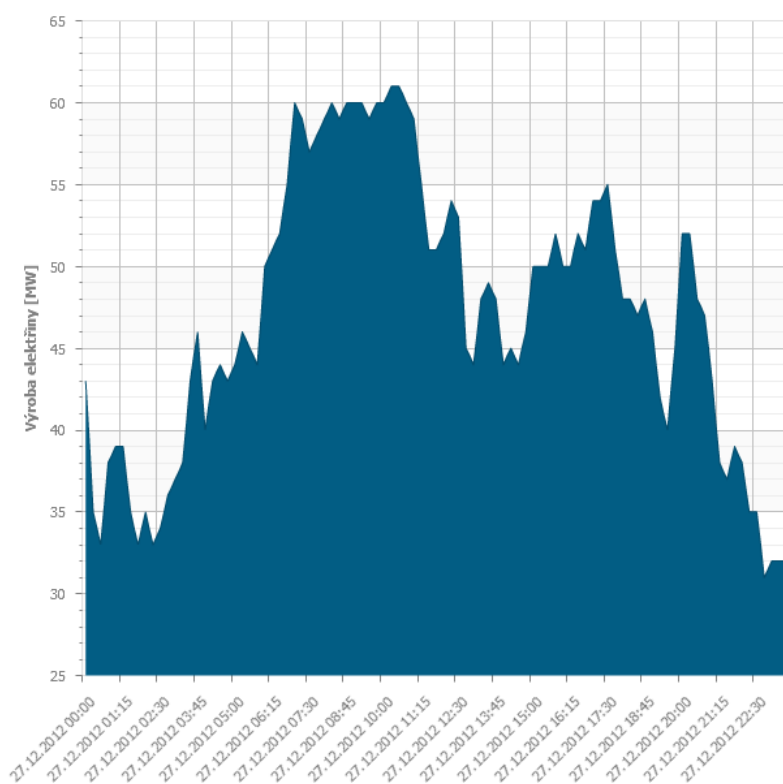


Obrázek 1.8: Rychlost větru pro ČR udávaná v m/s, převzato z [20]

Větrná elektrárna

Větrná elektrárna se skládá ze základu, stožáru, gondoly a rotoru. Hlavním úkolem větrné elektrárny je přeměna větrné energie na energii elektrickou. Tato přeměna se provádí pomocí vrtule, která je připojena na rotor. Přímočarý pohyb vzdušné masy, rotor převede na točivý pohyb, který se využívá k roztáčení elektrického generátoru a výrobě elektrické energie.[21]

Následující Obrázek 1.9 zobrazuje celkovou výrobu elektrické energie z větrných elektráren v ČR, za jeden den. Jak je vidět, tak maximální výkon 61 MW byl dosažen v 10:30.



Obrázek 1.9: Celková brutto výroba elektrické energie z větrných elektráren v ČR, 27.12.2012, převzato z [15]

Výhody a nevýhody energie větru

Můžeme říci, že se jedná o velmi levný, i když poněkud nestálý zdroj energie. Mezi hlavní výhody například patří: minimální nároky na údržbu, šetrnost k životnímu prostředí (nevytvářejí škodlivé emise).

Mezi nevýhody můžeme zařadit například to, že nám značně mění krajinný ráz a znamenají možné nebezpečí pro tažné ptáky. Tato zařízení na využití energie větru mají i další negativní stránky. Pořizovací náklady se pohybují okolo 60-70 milióny Kč. Další nevýhodou je nestálost větrného zdroje. Například v Dánsku občas nastane situace, že klesne výkon větrných elektráren na nulu. Stává se to z toho důvodu, že je někdy rychlost větru menší než 5 m/s a naopak někdy je rychlost větru vyšší než 55 m/s. Tento problém dánská vláda vyřešila tak, že dokoupila plynové elektrárny, které jsou schopné tento výkon pokrýt.

Mezi další nevýhody se řadí nesnadná akumulace získané elektrické energie z větrných elektráren. Jedním ze způsobů takové akumulace je, že větrná zařízení pohánějí čerpadla, která přečerpávají vodu do výše položených nádrží a v době bezvětrí pohání voda samospádem vodní turbínu spojenou s generátorem na výrobu stejnosměrného nebo střídavého proudu.[22]

Celkový instalovaný výkon větrných elektráren v ČR dosáhl 28. prosince 2012 hodnotu 235 MW.

1.3 Geotermální energie

Tato energie pochází z doby, kdy naše planeta vznikla. Jedná se o energii nevyčerpatelnou. Vzniká v zemském jádru a projevuje se erupcemi sopek a gejzíry. Teplo zemského jádra se přenáší k povrchu buď prouděním a nebo vedením.

Podmínky v České Republice

V České republice se geotermální energie používá hlavně v léčebných procesech. V okolí Karlových Varů se nacházejí malé zdroje, které se využívají k vyhřívání skleníků. Pokud se jedná o vytápění pomocí geotermální energie, tak s tím má bohaté zkušenosti Slovenská republika, kde mnoho projektů funguje.

Výroba elektrické energie z geotermální energie, potažmo z vrtů, není nikde v České republice použita. Zatím nejdále je projekt městské teplárny v Litoměřicích. Zde by měla geotermální elektrárna nahradit dosluhující teplárnu využívající uhlí.[2]

Geotermální elektrárna

Existují tři typy geotermálních elektráren. První typ využívá suchou páru, kde je pára získána přímo z hlubin země. Druhý typ geotermální elektrárny používá mokrou páru, horká voda je napřed přeměněna na páru a následně přivedena na turbínu.

Výhody a nevýhody geotermální energie

Geotermální energie není závislá na slunečním záření a jedná se o energii nevyčerpatelnou. Mezi nevýhody se dá například zařadit to, že se nedá využívat všude. Energii zemské kůry můžeme využít pouze na některých místech naší planety. Další nevýhodou spočívá ve složitosti použité technologie.

1.4 Energie vody

Vodní energie je využívána více než 2 000 let. Na počátku se kinetická energie vody přeměňovala na mechanickou práci. V dnešní době se hlavně využívá transformace kinetické energie na elektrickou energii. Díky koloběhu vody se voda dostane do vyšších nadmořských výšek odkud stéká a uvolňuje energii. Tuto energii přeměňujeme ve vodních elektrárnách.

Vodní elektrárna

Ve vodní elektrárně roztáčí voda turbínu. Turbína je na společné hřídeli s elektrickým generátorem. Kinetická energie proudící vody se přeměňuje na energii elektrickou, která se pak dále odvádí do místa spotřeby. Existuje několik druhů turbín. Výběr turbíny závisí na podmínkách celého vodního díla. Vodní turbíny patří mezi nejdokonalejší mechanické motory, dosahují 95% účinnosti. Vodní elektrárny dělíme na průtokové a akumulární.

Výhody a nevýhody vodní energie

Vodní elektrárny patří mezi dodatkové zdroje elektrické energie. Jejich největší výhoda spočívá v tom, že dokáží během relativně krátké doby reagovat a pokrýt výkonové špičky spotřeby v energetické soustavě. Další velká výhoda je to, že vyžadují minimální údržbu a obsluhu. Celé vodní dílo může zabránit menším povodním.

Mezi nevýhody lze zařadit velké počáteční investice a zatopení velkého území. Vodní elektrárny představují migrační bariéru pro ryby a vodní živočichy. Dále pak způsobují omezení vodní dopravy a musí se stavět plavební komory a zdymadla.

1.5 Energie biomasy

Biomasa je hmota organického původu. Energie biomasy pochází ze slunečního záření. Podle původu, se biomasa rozděluje na živočišnou nebo rostlinnou. Mezi biomasu rostlinného původu lze zařadit:

- dřevo a dřevní odpady
- rychle rostoucí dřeviny
- obilná a řepková sláma
- olejnaté plodiny

Mezi biomasu živočišného původu patří například:

- exkrementy hospodářských zvířat (kejda, hnůj)
- kafilerní tuky

Energetické využití biomasy

Energii z biomasy získáme jen spalováním. Výhřevnost závisí na obsahu vody v biomase. Například dřevo a jeho odpady se dají spalovat přímo a řadí se mezi suchou biomasu. Další možností je spalovat biomasu spolu s jiným typem paliva. Výhodou je částečná náhrada fosilního paliva ekologičtější variantou. Toto spoluspalování biomasy se používá například v elektrárnách Tisová, Hodonín, Ledvice a v plzeňské teplárně.

Mezi mokrou biomasu se řadí živočišná kejda, komunální odpady, odpadní biomasa, rostlinné odpady. Tato mokrá biomasa se nedá spalovat, a proto končí ve velkých nádržích v bioplynových stanicích. Pokud se tato mokrá biomasa rozkládá bez přístupu

kyslíku, tak vzniká bioplyn. Hlavní součástí bioplynu je metan, který se dále využívá ke spalování.

Výhody a nevýhody energie biomasy

Biomasa vzniká samovolně a má obnovitelný charakter. Dá se říci, že zdrojem biomasy je odpad, který nemá již žádné jiné využití. Jako dobrý příklad je těžba dřeva. Spalování biomasy nezatěžuje životní prostředí. Při spalování se uvolní do ovzduší stejné množství CO_2 , jako spotřebuje rostlina pro svůj růst. Velkou výhodou biomasy je dlouhodobá skladovatelnost. Mezi další výhody se dá zařadit popel, který vzniká při spalování. Tento popel se využívá jako vysoko kvalitní hnojivo

Hlavní nevýhoda biomasy je menší výhřevnost oproti fosilním palivům. Skladování biomasy klade velké nároky na skladovací prostory a na mechanizaci. Další nevýhoda se skrývá ve složitější údržbě kotle. Musí se provádět častější revize a čištění.

Kapitola 2

Způsoby akumulace elektrické energie

Historie akumulace energie se začíná psát již v době, kdy staré vodní mlýny potřebovaly vodu na mletí obilí. Energie se akumulovala ve vodě nad mlýnem.

S objevem elektrické energie se také objevila otázka ukládání elektrické energie. První pokusy provedl A. Volta, který také vynalezl Voltův článek.

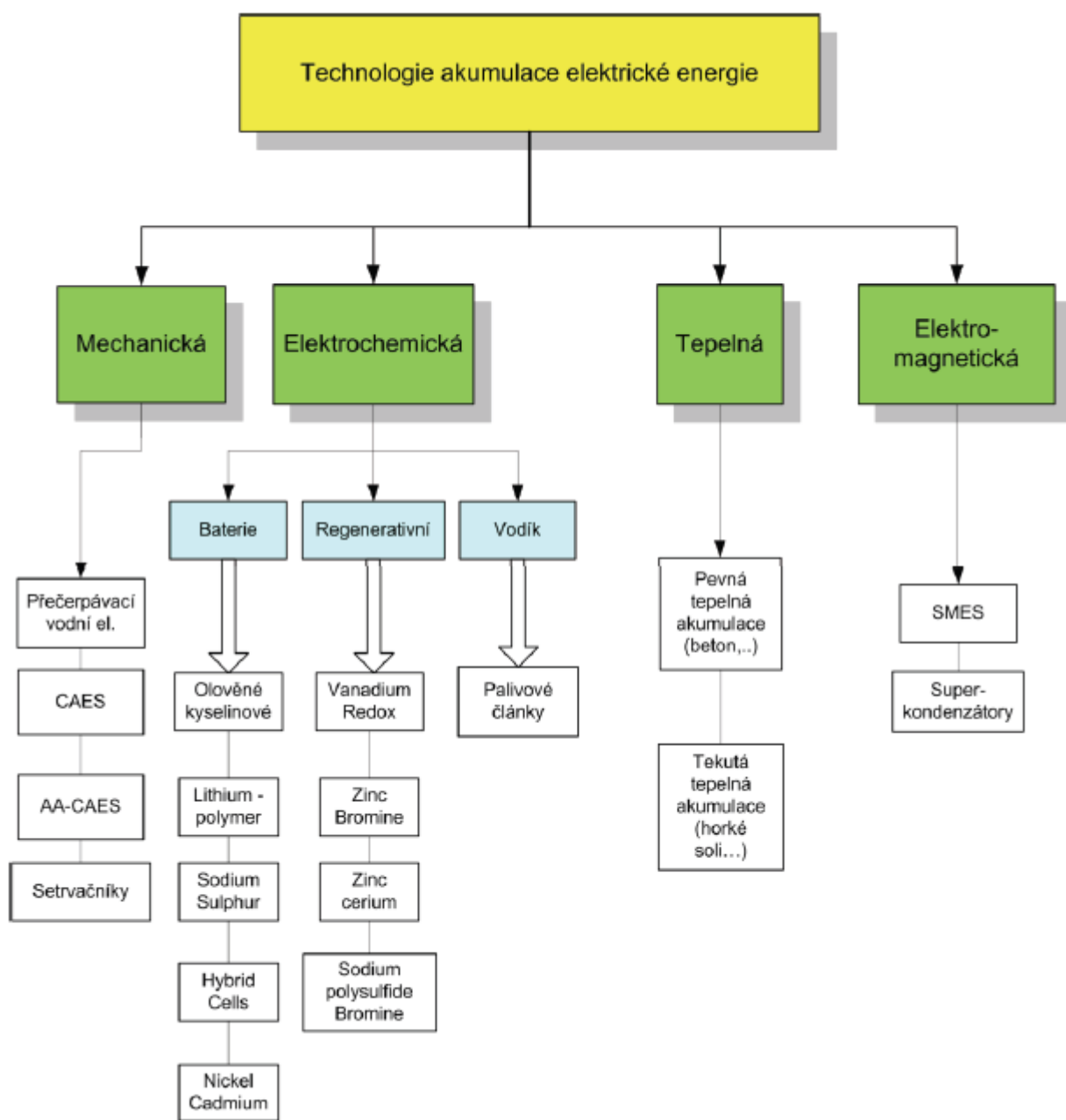
Elektrickou energii musíme akumulovat, pokud bychom ji neakumulovali, tak bychom jsme ji museli spotřebovat okamžitě, jakmile se vyrobí. To by tedy znamenalo, že bychom jsme výrobu elektrické energie museli načasovat podle potřeb lidí. Například denní spotřeba elektrické energie v soukromých odběrových místech vypadá tak, že od 00:00 do 06:00 není spotřeba skoro žádná. Mezi 06:00 - 09:00 je ranní špička, od 09:00 do 17:00 je opět malý odběr a po 17:00 následuje večerní špička, která klesá do 00:00. Ne každý zdroj energie se dá jednoduše regulovat. Mezi velkovýrobce z neobnovitelných zdrojů patří jaderné elektrárny, tepelné elektrárny, plynové elektrárny, dieselelektrická soustrojí a spalovací turbíny. Z těchto velkovýrobců se nejobtížněji regulují jaderné elektrárny. Regulace výkonů jaderných reaktorů je poměrně nesnadná. Musíme si uvědomit, že v malém objemu jaderného reaktoru se produkuje obrov-

ský výkon. Například jeden blok Temelína produkuje 1000 MW a to jen v několika křehlových metrech aktivní zóny.

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.[2]

Je dobré si uvědomit, že pouze dvě technologie ukládají energii ve formě elektrické energie. Jsou to superkapacity a systémy SMES. Ostatní technologie ukládají elektrickou energii v jiné formě energie. Například akumulátory ukládají energii v chemické formě. Setrvačníky, CAES systémy a přečerpávací elektrárny ukládají energii ve formě mechanické. U těchto technologií, které neukládají energii ve formě elektřiny, musíme provést konverzi zpět na elektrickou energii. V této kapitole budou dále popsány jednotlivé principy akumulace elektrické energie. Na Obrázku 2.1 je znázorněno základní dělení akumulčních systémů.

KAPITOLA 2. ZPŮSOBY AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE



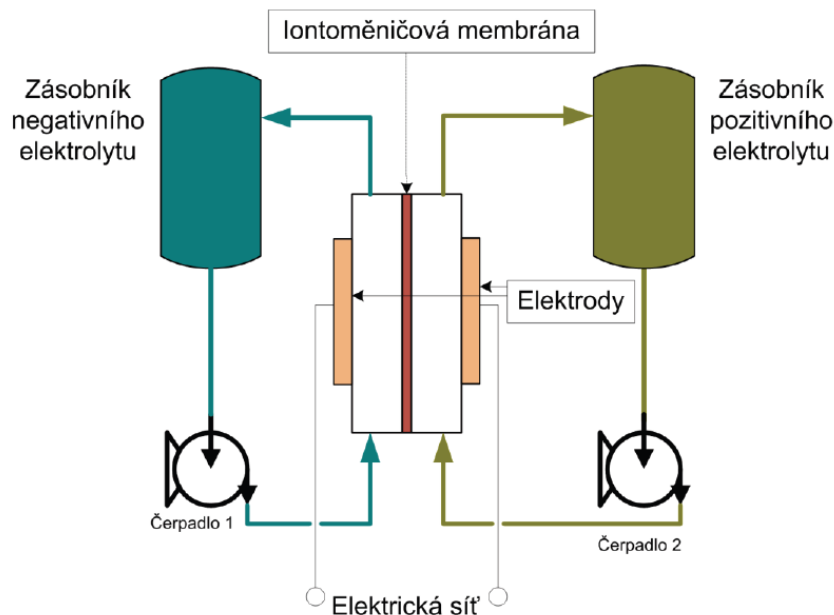
Obrázek 2.1: Rozdělení akumulčních systémů, převzato z [3]

2.1 Elektrochemická přeměna - akumulace

Mezi elektrochemické akumulátory zařazujeme zejména průtokové baterie, palivové články a akumulátory. Palivový článek ale může pracovat i na metanol, popřípadě na metan, proto není dobré si spojovat pojem palivový článek výhradně s použitím s vodíkem.[2]

2.1.1 Průtokové baterie

Průtokové baterie skladují energii prostřednictvím tekutého elektrolytu a jsou nabíjeny stejně jako běžné baterie. Elektrolyt je vháněn do zásobních tanků a poté opět přiveden do chemického článku. Napětí článku se pohybuje v rozmezí 1,4 V – 1,8 V. Průtokové baterie se využívají tam, kde potřebujeme dlouhodobé zálohování. Princip průtokové baterie je uveden na Obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Princip průtokové baterie, převzato z [2]

V současné době pracují průtokové baterie na těchto principech:

- elektrochemické oxidace a redukce vanadu – VRB
- uskladnění pomocí halogenu Br – ZnBr
- na roztoku polysulfidu Bromidu (PSB, Br/S)

Podrobnější vysvětlení redoxových systémů je uvedeno ve 3. Kapitole.

2.1.2 Zebra baterie

Tato baterie má skutečné chemické složení $NaNiCl$, tedy sodík, nikl a 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.[2]

2.1.3 Olovněné baterie

Olovněné baterie patří mezi nejstarší a nejvíce používané baterie. Dají se použít v mnoha aplikacích, své pevné postavení mají v automobilech. Mezi výhody lze zařadit odolnost vůči nízkým teplotám, bezpečnost a cena. Jako nevýhodu lze brát ekologickou zátěž v podobě Pb a Cd a jejich hmotnost. Napětí článku se pohybuje v rozmezí 1,75 V – 2,125 V. Nominální napětí článku je 2 V, při měření naprázdno.

Olovený 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 mřížkované 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 houbovým olovem je šedá.[2]

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).[2]

2.1.4 Baterie Sodium – Sulfur

Tento druh baterií využívá sodík a síru. Sodík s alkalickými kovy tvoří skupinu, která dosahuje velké hustoty energie na jednotku hmotnosti. Pokud porovnáme olovněné baterie s baterií Sodium – Sulfur tak zjistíme, že baterie Sodium – Sulfur dosahují mnohem větší hustoty energie na jednotku hmotnosti než olovněné baterie. Mezi výhody se dá zařadit menší hmotnost, rychlé nabíjení, možnost krátkodobého vysokého zatížení a jsou šetrné k životnímu prostředí. Hlavní nevýhodou je nemožnost transportu, protože vnitřní složky baterie musí zůstat v klidu. Napětí článku se pohybuje v rozmezí 1,9 V – 2,1 V. Baterie Sodium – Sulfur se hlavně používají v akumulacích systémech.

2.1.5 Lithiové baterie

Základem lithiové baterie je anoda z uhlíku, katoda z oxidů kovů a elektrolyt, který je tvořen lithiovou solí. Napětí článku se pohybuje v rozmezí 1,4 V – 1,6 V. Výhodou této baterie je nižší hmotnost, dodávka vyšších proudů a doba skladovatelnosti. Lithiové baterie se díky svým rozměrům dají použít v lékařské technice, hodinkách a v malých elektronických zařízeních. Nejznámější typ akumulátoru, který využívá lithium je Li – ion akumulátor. Výhodou těchto Li – ion akumulátorů je malá hmotnost na instalovanou kWh.

2.1.6 NiCd akumulátory

NiCd akumulátory jsou tvořeny katodou z niklu, elektrolytem z hydroxidu draselného a anodou z kadmia. Elektrolyt dále pak obsahuje separátor vlhkosti. Při vybíjení akumulátoru řídne hydroxidový elektrolyt a nikl se usazuje na niklové katodě. *NiCd* akumulátory jsou vyráběny jako plastové nebo kovové hermeticky uzavřené nádoby. Jmenovité napětí článku je 1,2 V.

Příkladem použití může být oblastní akumulární stanice ve Fairbanks, Alaska, USA, kde je instalovaný výkon 40 MW v *NiCd* článcích.[2]

2.2 Mechanické akumulční systémy

2.2.1 Setrvačníky

Setrvačnick, je již mnoho let známé zařízení. Jeho konstrukce je velmi jednoduchá a má mnohostrané použití. Princip setrvačnicku je takový, že ukládá kinetickou energii do otáčející se hmoty rotoru. Rychlost otáčení rotoru dosahuje až 20 000 min⁻¹. Vysoká účinnost je zaručena speciálními konstrukčními prvky a dosahuje hodnoty přes 90 %. Rotor je umístěn ve sníženém tlaku okolního média a je tvořen z plastů vyztuženými uhlíkovými vlákny. Setrvačnicky dělíme na:

- ideální jednorozměrný setrvačnick
- ideální dvojrozměrný nebo vícerozměrný setrvačnick

Energie jednorozměrného setrvačnicku se určí podle následující rovnice 2.1 :

$$E_j = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(r\omega^2) = \frac{1}{2}mr^2\omega^2 [J] \tag{2.1}$$

kde:

- m hmotnost [kg]
- v rychlost [m/s]
- ω úhlová rychlost [rad/s]
- r poloměr [m]

Energie dvojrozměrného setrvačnicku se určí podle následující rovnice 2.2 :

$$E_d = \frac{1}{2} J \omega_{max}^2 [1 - (1/k)^2] [J] \tag{2.2}$$

kde:

J	moment setrvačnosti [kg.m ²]
ω_{max}	max. úhlová rychlost [rad/s]
k	koeficient [-]

Hustota uložené energie závisí na hmotnosti a pevnosti použitého materiálu. Dá se tedy říci, že když použijeme lehký a pevný materiál, který bude mít stejnou pevnost v tahu jako těžký materiál, tak dostaneme vyšší hustotu energie na jednotku objemu i jednotku hmotnosti. Setrvačnický dokáže dodat vysoký výkon, například jeden z největších setrvačnicků dokáže poskytnout výkon 1,6 MW po dobu 10 s. Setrvačnický se využívají v aplikacích zálohovaného napájení, v automobilovém průmyslu a v energetickém průmyslu.

2.2.2 Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny čerpají vodu z níže položené nádrže do horní nádrže v době dostatku energie. Naopak, v době nedostatku energie vypustí vodu přes turbínu zpět do dolní nádrže. Horní a dolní nádrž jsou propojeny potrubím s reverzní turbínou. Tento typ vodních elektráren klade vysoké nároky na geografické podmínky, jelikož je potřeba velké plochy pro obě nádrže a velký výškový rozdíl mezi nádržemi.

U přečerpávacích vodních elektráren 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.[2]

Přečerpávací vodní elektrárny se hlavně používají k pokrývání odběrových špiček.

2.2.3 CAES systém

Principem CAES technologie je akumulace energie pomocí stlačeného vzduchu. V době, kdy je energie dostatek, je kompresorem stlačován vzduch a je vháněn do podzemních prostor. Při nedostatku energie je naakumulovaný vzduch vypuštěn ven přes vzduchovou turbínu. Vylepšenou variantou CAES systému je AA – CAES (Adiabatic Advanced - Compressed Air Energy Storage).

Systémy CAES a AA – CAES nejsou příliš rozšířené, 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 %.[2]

Nicméně ve světě již běží několik úspěšných projektů, které využívají opuštěné solné doly, vytěžená ložiska ropy a podobně. Výhoda těchto hlubiných dolů je ta, že vlivem tlaku nedochází k rozrušování stěn kaverny.

2.3 Chemická akumulace

2.3.1 Vodík

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 elektrolyzérů a palivových článků. V dnešní době je použití vodíkového hospodářství problematické.[2]

K výrobě vodíku lze použít několik metod:

- Parní reformování
- Parciální oxidace
- Zplyňování
- Elektrolýza
- Vysokoteplotní elektrolýza
- Termochemické cykly

Jednotlivé metody výroby vodíku a skladování vodíku jsou podrobně popsány ve 3. Kapitole.

2.4 Elektrická akumulace

2.4.1 Superkapacitory

Superkapacitory jsou podrobně popsány ve 3. Kapitole

2.4.2 SMES systém

Tento systém akumuluje energii do magnetického pole supravodivé cívky. Toto pole je vytvořeno procházejícím proudem přes supravodivou cívku. Pokud teplota klesne na hodnotu blízké absolutní nule, tak odpor supravodivé cívky dosáhne nulové hodnoty a cívka vede velmi vysoké proudy bez elektrických ztrát. Teplota se liší podle typu supravodiče, supravodivé cívky používané v systému SMES, využívají teplotu $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jediné ztráty, které se v SMES systému objevují, jsou zapříčeny chladícím systémem. Proto musí být celý systém dobře tepelně izolován.

SMES dokáže dodávat energii jen krátkou dobu a celková energetická kapacita je nízká, jen několik kWh. Maximální výkon, kterého se dá dosáhnout, je limitován použitou výkonovou elektronikou. Z těchto vlastností vyplývá, že SMES systémy se dají použít všude tam, kde je potřeba rychlé odezvy a vysokých výkonů.

2.5 Přehled výhod a nevýhod používaných akumulčních technologií

Technologií výroby baterií a akumulátorů je celá řada. Lze tedy podle způsobu využití vybrat vhodný typ baterie nebo akumulátoru. I přes velký technologický pokrok mají tyto zdroje určité nevýhody:

- krátká životnost a s tím i spojené náklady na údržbu a likvidaci
- závislost životnosti a dodávaného výkonu na okolních teplotách a na nabíjecích a vybíjecích cyklech
- ekologická rizika

Dodávaný výkon akumulátoru závisí na jeho vnitřním odporu. Vnitřní odpor se zvyšuje postupem času, jak akumulátor stárne. Čím je vnitřní odpor větší, tím je dodávaný výkon menší a i nabíjecí proud se zmenší. Proto se prodlužuje nabíjecí doba akumulátoru.

Akumulátory jsou nevhodné pro aplikace, které pracují s velkými nárazovými proudy. Spíše se hodí tam, kde je konstantní zátěž. Nejmenší vnitřní odpor, z komerčně používaných akumulátorů, mají NiCd akumulátory a olovené akumulátory. Jedna z výhod olovněných akumulátorů je ta, že mají nízkou pořizovací cenu. V praxi se používají průtokové elektrochemické akumulátory ve velkých UPS systémech.

Pokud se zaměříme na velké akumulční systémy, jako jsou přečerpávací vodní elektrárny, zásobníky stlačeného vzduchu a SMES systémy, tak zjistíme, že jejich pořizovací cena je velmi vysoká. Nicméně jako hlavní výhoda u těchto velkých akumulčních systému se dá brát to, že jsou přímo napojené do rozvodné sítě a okamžitě dodávají energii v době odběrové špičky. Dá se říci, že slouží jako centralizovaný akumulční systém pro celou elektrizační soustavu.

Velký potenciál je ukrytý v superkapacitorech a v setrvačnicích. Tyto dvě technologie mají velké výhody oproti bateriím a akumulátorům. Dokáží rychle akumulovat energii a naopak rychle ji vydat, když je potřeba. Mezi další výhody lze zařadit delší životnost, nenáročnost na okolní podmínky a poskytnutí vysokého výkonu. Jako hlavní nevýhoda je pořizovací cena.

Superkapacitory a setrvačníky jsou vhodné pro aplikace, které potřebují pokrýt vysoké výkony po krátkou dobu.

2.5.1 Využití akumulčních technologií

Následující Tabulka 2.1. poskytuje informace o použité akumulční technologii a jejího využití.

Akumulační systém	Využití
Průtokové baterie	průmyslové aplikace, domácnosti, UPS systémy
Zebra baterie	elektromobil, obranný průmysl
Olovněné baterie	automobilový průmysl, domácnosti
Baterie Sodium – Sulfur	doprava, těžká technika, vesmírné aplikace
Lithiové baterie	lékařská technika, domácnosti
NiCd akumulátory	ruční nářadí, notebooky, nouzové osvětlení
Setrvačníky	energetický průmysl, automobilový průmysl
Přečerpávací vodní elektrárny	energetický průmysl
CAES systém	hybridní systémy, energetický průmysl
Vodík	automobilový průmysl, chemický průmysl, elektrárny
Superkapacitory	automobilový průmysl
SMES systém	UPS systémy

Tabulka 2.1: Využití akumulčních technologií

Kapitola 3

Akumulace elektrické energie pomocí hydrogen generátorů, superkapacitorů a vanadium - redox baterií

3.1 Hydrogen generátory

3.1.1 Vodík

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 energie. Na druhou stranu je nutné si uvědomit, že i dnešní elektrárny s palivovými články využívají vodík, který je vyráběn výhradně z fosilních paliv. Největší celkové zásoby vodíku v

sobě ukrývá voda a uhlovodíkové látky (fosilní paliva).[2]

3.1.2 Výroba vodíku, druhy hydrogen generátorů

Vodík se dá vyrobit několika způsoby. Jako vstupní surovina pro výrobu se dá využít voda nebo fosilní paliva. Každý způsob má své výhody a nevýhody.

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 kapalná a plynná frakce, které vznikají při její těžbě. K rozšířenějším metodám patří i zplyňování uhlí. [4][5][6][7][8]

Hydrogen generátory můžeme rozdělit podle použité technologie při získávání vodíku. Jak již bylo zmíněno ve 2. Kapitole, mezi hlavní principy získávání vodíku patří:

- Parní reformování
- Parciální oxidace
- Zplyňování
- Elektrolýza
- Vysokoteplotní elektrolýza
- Termochemické cykly

Následující text podrobně popisuje každou z technologií.

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.[4][7][8][10]

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 °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.[4][5][6]

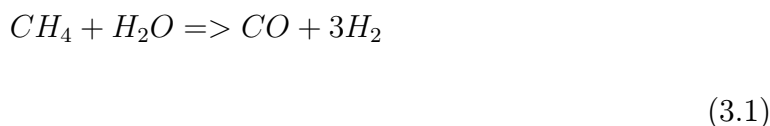
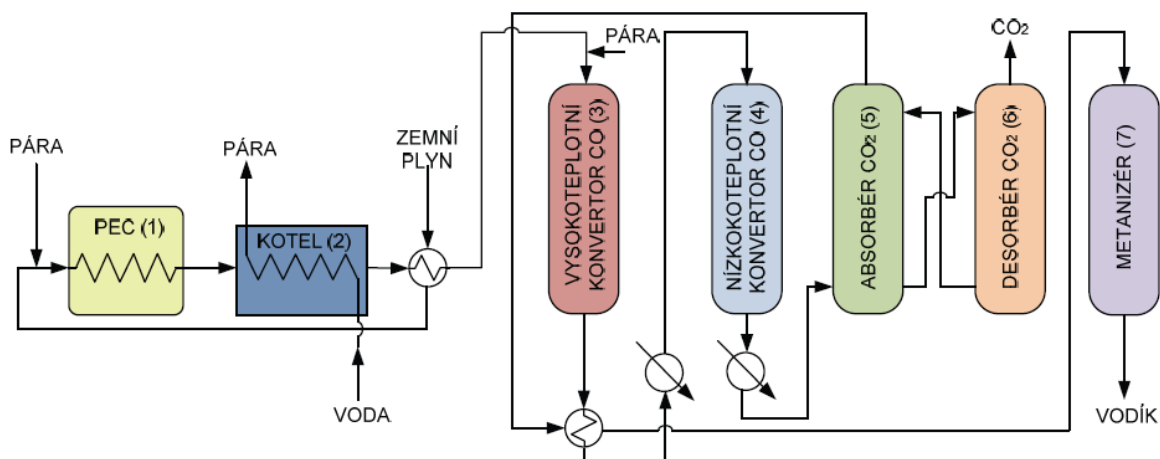


Schéma výroby vodíku pomocí parního reformování je uvedeno na Obrázku 3.1. V současné době používají zemní plyn hlavně velké stacionární zdroje s palivovými články.

KAPITOLA 3. AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE POMOCÍ HYDROGEN GENERÁTORŮ, SUPERKAPACITORŮ A VANADIUM - REDOX BATERIÍ



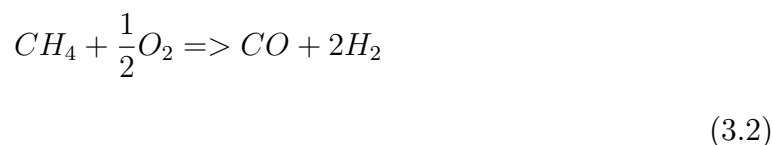
Obrázek 3.1: Systém pro výrobu vodíku pomocí parního reformování - modifikováno z [4]

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. Další část procesu souvisí s navýšením množství vyprodukovaného vodíku pomocí konverzních dějů. Ochlazené produkty dále putují do konvertorů oxidu uhelnatého (3, 4). Bývá využito vysokotlakého a nízkotlakého konvertoru a různě aktivních katalyzátorů. Kombinace konvertorů s různými tlaky souvisí i s eliminací sirtých nečistot. Za konvertory jsou již ochlazené plynné produkty vedeny do absorbéru CO_2 (5), respektive do desorbéru CO_2 (6), kde je provedena vypírka. V metanizéru (7) jsou zbytky CO a CO_2 převedeny zpátky na CH_4 . Čistý CO_2 se pak zpravidla vypouští do atmosféry či je zkapalněn. Zbylý CO a CO_2 se vede do metanizéru, kde se pomocí exotermických reakcí přemění zpátky na metan. Místo metanizéru a vypírky lze pro odstranění CO_2 a zbytků CO použít i tlakové adsorpční procesy (PSA). [4][5][6]

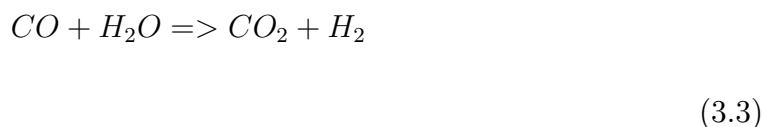
Parciální oxidace

Metoda získávání vodíku pomocí parciální oxidace je hlavně zaměřena na zpracování těžkých uhlovodíků. Výhoda této metody je ta, že se dá použít i na metan, propan, etanol.

Pokud porovnáme parciální oxidaci a parní reformování, lze konstatovat, že parciální oxidace má rychlejší pracovní procesy. Z chemických reakcí vyplývá, že u parciální oxidace dochází k nižší výtěžnosti vodíku. Chemické rovnice pro parciální oxidaci metanu jsou následující:



Při oxidaci různých vstupních surovin se tvoří plynná směs CO , CO_2 , H_2 , CH_4 a H_2O a případně oxidy či sulfidy síry.[4] Přeměna CO na vodík je popsána následující rovnicí:

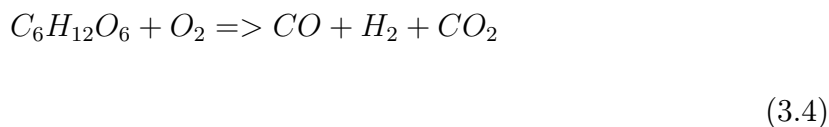


Vypírka CO_2 či metanizace jsou obdobné jako u parního reformování zemního plynu. Zbylé CO_2 je vypouštěno do atmosféry nebo je převedeno do kapalně fáze. U parciální oxidace těžkého oleje je surový produkt syntézní plyn, který je po čištění konvertován z CO a vodní páry na H_2 a CO_2 . [4]

Zplyňování

Principem zplyňování je přivádění vodní páry a vzduchu na rozžhavené uhlí. Rozžhavené uhlí dosahuje teploty až 1200°C, díky takto vysoké teplotě vzniká směs dusíku, vodíku, oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a metanu. Celý proces zplyňování je energeticky velmi náročný. Většina vstupujícího uhlí, musí udržet provozní teplotu. Mezi další nevýhodu se řadí fakt, že zplyňování je přímo závislé na fosilních palivech.

Další možnost, jak získat vodík, je zplyňování biomasy. Existují dvě základní metody zplyňování biomasy. Jedna metoda zplyňování používá fluidní generátory a druhá metoda zplyňování generátory s pevným ložem. Jednotlivé metody se od sebe liší tlakem, při kterém je biomasa zplyňována. Fluidní generátory používají vyšší tlak (jednotky MPa), než generátory s pevným ložem (atmosférický tlak). V současné době jsou více využívány generátory s pevným ložem. Chemická rovnice zplyňování biomasy je:



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

KAPITOLA 3. AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE POMOCÍ HYDROGEN GENERÁTORŮ, SUPERKAPACITORŮ A VANADIUM - REDOX BATERIÍ

elektrolyzérech vyrobit velmi čistý vodík, a to i za běžných teplot a tlaků. Kromě elektrolyzéru 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 %.[9][11]

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.[2]

Vysokoteplotní elektrolýza

Vysokoteplotní elektrolýza využívá kromě elektrické energie ještě tepelnou energii. Tepelná energie je tvořena teplou párou a vodíkem. Vstupní pára s vodíkem je přivedena na katodu elektrolyzéru, kde dojde k reakci a obohacená parní směs o vodík vystupuje ven ze systému. Vystupující parní směs je přivedena na separátor vodíku, kde je vodík oddělen od zbytku páry. Důležitý je také poměr vstupující směsi. Pokud by jsme uvažovali o vstupující směsi, která by obsahovala například 95 % vodní páry a 5 % vodíku, tak vystupující směs by pak obsahovala 95 % vodíku a 5 % vodní páry. Teplota parní směsi se pohybuje v rozmezí 750°C - 950°C. Účinnost systému dosahuje až 50 %.

Termochemické cykly

Princip termochemických cyklů je založen na termochemickém štěpení vody. K rozštěpení vody na vodík a kyslík je potřeba dodat tepelnou energii. Dá se říct, že k získání vodíku, potřebujeme jen vodu a teplo. Jelikož jde o uzavřené cykly, tak se ostatní chemické látky recyklují a vstupují opět do procesu. Jako finální produkty jsou zde kyslík, vodík a zbytek tepla. Celková účinnost tohoto systému se pohybuje v několika desítkách procent. Pokud bychom jsme chtěli celkovou účinnost zvýšit, tak bychom jsme museli zvýšit i teplotu procesu.

3.1.3 Ukládání vodíku

Vodík se nejčastěji skladuje v kapalném nebo v plynném skupenství. V následujícím textu je popsáno skladování vodíku v jednotlivých skupenstvích.

Kapalné skupenství

Vodík se dá skladovat v kapalném skupenství jen když je ochlazen na jeho kondenzační teplotu. Toto zkapalnění je velmi energeticky náročné. Skladování vodíku v kapalném stavu se využívá všude tam, kde mají být zajištěny vysoké hodinové spotřeby vodíku. Materiály, z kterých jsou zásobníky vyrobeny, musí zplňovat vysoké technické požadavky. Pro skladování kapalného vodíku se používají kryogenní zásobníky, ze kterých je čerpán jako plyn pro palivové články.

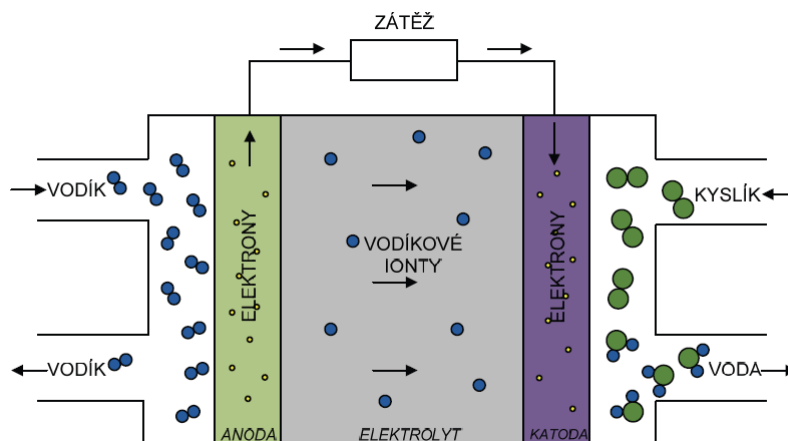
Výroba kapalného vodíku se provádí prostřednictvím Claudova procesu. Tento proces klade velké nároky na čistotu vodíku, použitý vodík nesmí obsahovat další plyny s jinými teplotami varu.

Plynné skupenství

Pokud porovnáme energetickou náročnost skladování vodíku v plynném a kapalném skupenství, tak zjistíme, že skladování vodíku v plynném skupenství je mnohem méně energeticky náročné. Důvod je jednoduchý, nemusíme vodík ochlazovat, tím pádem odpadá ztráta energie. Pro skladování plynného vodíku se používají tlakové lahve a nebo svazky tlakových lahví. Použitým materiálem na tlakové lahve bývá legovaná ocel nebo nízkouhlíkatá ocel. Vodík se stlačuje do lahve pomocí pístových kompresorů.

3.1.4 Palivový článek

Palivový článek přímo přeměňuje chemickou energii na elektrickou energii, jedná se tedy o elektrochemický zdroj energie. Princip funkce palivového článku typu PEMFC, je naznačen na Obrázku 3.2. Tento typ článku používá jako oxidant O_2 a palivo H_2 .



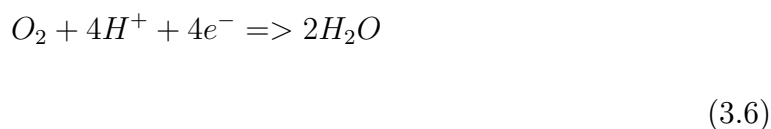
Obrázek 3.2: Základní princip palivového článku, převzato z [2]

Vodík a kyslík jsou přiváděny pomocí kanálů na elektrody. Přiváděné palivo (vodík) na anodě oxiduje a vznikají ionty vodíku a elektrony. Elektrony jsou sbírány anodou a jsou vedeny na katodu. Ionty vodíku se přemísťují od anody elektrolytem ke katodě.

KAPITOLA 3. AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE POMOCÍ HYDROGEN GENERÁTORŮ, SUPERKAPACITORŮ A VANADIUM - REDOX BATERIÍ

Kyslík je přiváděn na katodu, kde reaguje s ionty vodíku a elektrony za vzniku vody.

Následující chemické rovnice, vyjadřují reakce, ke kterým dochází na anodě a katodě u palivového článku PEMFC. Poslední rovnice vyjadřuje souhrnnou reakci.



Rozdělení palivových článků

Palivové články můžeme dělit podle použitého elektrolytu:

- **PEMFC** – Elektrolyt tvořený pevnou polymerní iontoměničovou membránou.
- **AFC** – Elektrolyt tvořený hydroxidem draselným KOH .
- **PAFC** – Elektrolyt tvořený kyselinou fosforečnou H_3PO_4 .
- **MCFC** – Elektrolyt tvořený roztaveným karbidem lithia.
- **SOFC** – Elektrolyt tvořený tuhým keramickým materiálem Zr_2O .
- **DMFC** – Elektrolyt tvořený membránou ze syntetického materiálu.

Další dělení palivových článků je podle jejich využití.

- **Přenosné zdroje** – Pro přenosné aplikace je nejvíce vhodný nízkoteplotní palivový článek typu PEMFC a DMFC. Výkon článku se pohybuje v rozmezí od jednotek wattů až po desítky wattů. Používají se jako záložní zdroje energie a slouží k napájení počítačů.
- **Stacionární zdroje** – Tento druh zdrojů využívá skoro všechny druhy palivových článků, hlavně to jsou články typu SOFC, MCFC, PEMFC a PAFC. Výkon dosahuje až stovky kW na jeden článek. Celkový výkon všech článků může dosahovat až několik MW. Jako palivo se používá zemní plyn, který je reformovaný na vodík. Pro rodinné domy se používají systémy o výkonech několik kW.
- **Mobilní zdroje** – Mobilní zdroje využívají hlavně palivový článek typu PEMFC. Výkon u těchto zdrojů dosahuje několik desítek kW. Největší využití těchto zdrojů je v automobilovém a vojenském průmyslu. Jako palivo slouží zkapalněný nebo plynný vodík.
- **Speciální zdroje** – Do této kategorie se řadí palivové články typu AFC, které jsou využity ve vesmírných programech.

3.2 Superkapacitory

Superkapacitory představují perspektivní akumulátory energie. Jejich předností je především životnost, opakované nabíjení a vybíjení vysokými proudy a akumulace velkého množství energie. Další výhodou je vysoká hustota energie (10 Wh/kg).

Energie kapacitoru se určí podle následující rovnice 3.1 :

$$E = \frac{1}{2}CU^2 [J] \tag{3.8}$$

kde:

C kapacita [F]

U elektrické napětí [V]

Superkapacitory slouží jako velkokapacitní zásobníky energie. Je požadováno, aby dosahovaly stejné kapacity jako komerčně vyráběné baterie a ponechaly si vlastnosti kondenzátorů. Hlavní využití superkapacitorů je u zařízení, kde se předpokládá opakované nabíjení a vybíjení. Jako vhodný příklad využití superkapacitorů je automobilový průmysl. Superkapacitory dokáží zachytit energii při brždění a následně ji využít k akceleraci automobilu.

3.2.1 Rozdělení superkapacitorů

Superkapacitory se dělí podle principu ukládání náboje na dvě základní skupiny:

- **EDLC (Electric Double Layer Capacitor)**

Tento typ superkapacitoru pracuje na principu dvojvrstvy. Nedochozí zde k žádným chemickým reakcím. Skládá se ze dvou opačně nabitých elektrod a separátoru, který je mezi dvěma vrstvami aktivního uhlíku. Pokud je superkapacitor

vybitý, tak jsou ionty rovnoměrně rozloženy ve vodivém elektrolytu. Jestliže přiložíme napětí na elektrody superkapacitoru, tak se záporné ionty začnou přemisťovat ke kladné elektrodě a kladné ionty k záporné elektrodě. Na každé elektrodě se vytvoří stejně velké vrstva elektrického náboje. Energie je akumulována přímo jako náboj na elektrodě. Tento princip zaručuje vysokou životnost elektrod a rychlý cyklus nabití - vybití. Celková kapacita dvojvrstvy se pohybuje okolo 50 mF.cm^{-2} , proto se musí zajistit dostatečný povrch elektrod. Provozní napětí superkapacitorové buňky dosahuje hodnoty 2,3 V.

- **Pseudokondenzátor**

Pseudokondenzátor je založen na vratných oxidačně - redukčních reakcích na povrchu elektrody. Dochází k chemickým reakcím a k přesunu náboje mezi elektrolytem a elektrodou. Pracuje podobně jako baterie. Skládá se ze dvou elektrod. Uhlíkové saze tvoří jednu z elektrod a druhá elektroda je tvořena z oxidů kovů. Oxidy kovů dokáží vratně vydávat a přijímat ionty vodíku. Dochází tedy k akumulaci energie pomocí chemické vazby. Celková kapacita je závislá na elektrochemické kapacitě elektrody, která je tvořena oxidem kovu. Narozdíl od EDLC superkapacitorů, zde dochází k rychlejšímu stárnutí. Jejich výhodou spočívá v tom, že mají větší celkovou kapacitu než EDLC superkapacitory.

3.2.2 Výhody a nevýhody superkapacitorů

V následujícím textu, jsou uvedeny výhody a nevýhody superkapacitorů.

- **Výhody** – vysoká účinnost, malé ztráty, rychlost nabíjení, životnost, vysoká hustota energie, akumulace velkého množství energie.
- **Nevýhody** – napětí je závislé na velikosti uloženého náboje, vysoká cena, nízké provozní napětí, samovybíjení.

KAPITOLA 3. AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE POMOCÍ HYDROGEN GENERÁTORŮ, SUPERKAPACITORŮ A VANADIUM - REDOX BATERIÍ

Superkapacitory jsou v dnešní době poměrně dost využívané součástky. Stále pokračuje jejich zdokonalování a tím i nasazování do nových přístrojů. Postupem času budou stále více a více nahrazovat klasické akumulátory. Co se týče ekonomické stránky, tak dokáží ušetřit poměrně dost finančních prostředků.

3.2.3 Technické parametry kapacitoru, superkapacitoru a akumulátoru

V Tabulce 3.1 je uvedeno porovnání parametrů, mezi klasickým kondenzátorem, superkapacitorem a klasickými akumulátory.

Parametr	Klasický kapacitor	Superkapacitor	Akumulátor
hustota energie	0,2 Wh/kg	10 Wh/kg	100 Wh/kg
měrný výkon	500 kW/kg	10 kW/kg	1 kW/kg
doba nabíjení (vybíjení)	0,001 s	10 s	5 h
počet cyklů	1 000 000	až 1 000 000	1 000

Tabulka 3.1: Porovnání technických parametrů

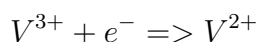
3.3 Vanadium-redox technologie

Vanadium redoxová baterie je jedním z mnoha typů průtokových baterií. Jako jediná ze všech typů má unikátní vlastnosti, které se dají využít k akumulaci elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Největší předností, je možnost mnohonásobného opakování cyklu nabití - vybití. U ostatních druhů baterií, dochází po určitém počtu cyklů nabití - vybití, k nevratnému znehodnocení elektrod a je nutné celou baterii vyměnit. Redoxové baterie mají mnohonásobně větší počet cyklů nabití - vybití, proto zde k výměně dochází za mnohem delší dobu (10 - 20 let).

3.3.1 Princip nabíjení a vybíjení

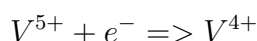
U tohoto druhu baterie dochází k elektrochemické redukci a oxidaci (redox) vanadu, proto se tato průtoková baterie nazývá vanadium - redoxová baterie (VRB). Následující rovnice 3.9 a 3.10 popisují nabíjení a vybíjení.

Nabíjení:



(3.9)

Vybíjení:

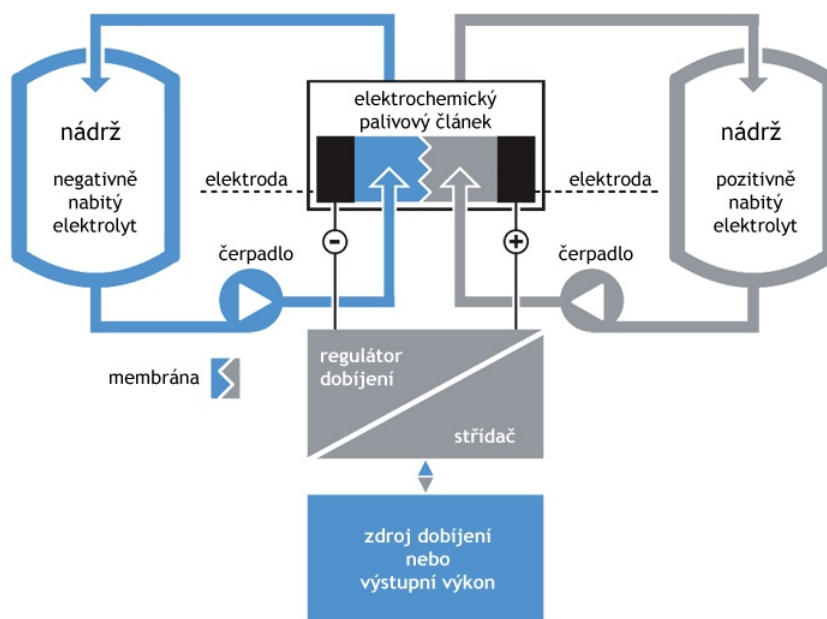


(3.10)

KAPITOLA 3. AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE POMOCÍ HYDROGEN GENERÁTORŮ, SUPERKAPACITORŮ A VANADIUM - REDOX BATERIÍ

Při nabíjení probíhá iontová výměna mezi dvěma elektrolyty. Elektrolyt v pozitivním článku je tvořen VO_2^+ a VO^{2+} , v negativním článku V^{3+} a V^{2+} . Elektrolyty jsou umístěny v oddělených nádržích. Celková energie při nabíjení se ukládá do elektrochemických potenciálů různých oxidačních stavů vanadiových solí (pozitivní: V(IV)/V(V) redoxní pár, negativní V(II)/V(III) redoxní pár). Při nabíjení nebo vybíjení, jsou elektrolyty čerpány z nádrží a proudí přes článek. Pokud se jedná o vybíjení, tak elektrický proud odchází do připojené zátěže. Naopak při nabíjení, se vrací zpět do nádrží s elektrolytem. K oddělení dvou elektrolytů se využívá iontově - propustná polymerní membrána. Na této membráně dochází u jednoho z elektrolytů k redukci a u druhého k oxidaci.

Princip fungování vanadium redox baterie je naznačen na Obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Princip fungování baterií vanadium redox, převzato z [23]

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

KAPITOLA 3. AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE POMOCÍ HYDROGEN GENERÁTORŮ, SUPERKAPACITORŮ A VANADIUM - REDOX BATERIÍ

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. Rovnovážné napětí plně nabitého článku VRB při provozní teplotě 25°C je $V_{oC} = 1,35$ V. Podle stupně nabití se napětí změnou složení obou elektrolytů postupně mění, až u zcela vybitého článku klesne na $V_{oD} = 1,0$ V. [2]

3.3.2 Technické parametry vanadium redox baterie

V následující Tabulce 3.2 jsou uvedeny základní technické parametry vanadium - redox baterie.

Parametr	Vanadium redox baterie
hustota energie	16 - 33 Wh/kg
měrný výkon	6,5 - 12,5 kW/kg
účinnost nabíjení (vybíjení)	75 - 80 %
jmenovité napětí článku	1,15 - 1,55 V
životnost	víc než 10 000 cyklů

Tabulka 3.2: Technické parametry vanadium - redox baterie

Kapitola 4

Porovnání akumulačních technologií

V této kapitole jsou jednotlivé akumulační technologie, které byly zmíněny ve 3. Kapitole, porovnány na fiktivním rodinném domě. V tomto fiktivním rodinném domě žije čtyřčlenná rodina a celková spotřeba elektrické energie za jeden den činí 15 780 Wh. Průměrná spotřeba elektrické energie za měsíc, dosahuje hodnoty 489,180 kWh. V Tabulce 4.1 je uvedena spotřeba jednotlivých zařízení za 24 hodin. Objekt je vytápěn pomocí kombinovaného plynového kotle. Druhým zdrojem tepla jsou krbová kamna, které obsahují tepelný výměník. Ohřátá voda je nadále rozváděna do podlahového topení a radiátorů. Jako zdroj teplé užitkové vody slouží kombinovaný plynový kotel s integrovaným průtokovým ohřívačem.

KAPITOLA 4. POROVNÁNÍ AKUMULAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Spotřebič	Výkon [W]	Množství [ks]	Celkem [W]	Hodin [h]	Celkem [Wh]
Žárovky	50	15	750	6	4 500
Lednice	140	1	140	24	3 360
MW trouba	950	1	950	0,2	190
Televize	100	2	200	3,5	700
Rádio	20	1	20	5	100
Notebook	30	2	60	7	420
Plyn. kotel	1 100	1	1 100	2,1	2310
Pračka	2 100	1	2 100	2	4200
Celkem	–	–	–	–	15 780

Tabulka 4.1: Průměrná spotřeba elektrické energie v domě za 24 hodin

Úkolem je porovnat jednotlivé akumulční technologie. Pokud by se řešil i zdroj elektrické energie (fotovoltaická elektrárna, větrná elektrárna, apod.) a požadoval by se provoz rodinného domu v ostrovním režimu, tak by se muselo u návrhu např. fotovoltaické elektrárny zahrnout období, kdy dopadá nejméně slunečního záření. V Plzeňském kraji se jedná o měsíce prosinec a leden. U větrné elektrárny by to bylo období, kdy vítr vane nejméně. Z těchto zjištěných parametrů, by bylo možné provést návrh zdroje elektrické energie pro daný objekt.

4.1 Navržení vanadium - redox baterií na daný objekt

Určení spotřeby el. energie

Na začátku kapitoly bylo uvedeno, že celková denní spotřeba elektrické energie činí 15 780 Wh. Denní spotřeba elektrické energie se dá rozepsat do 8 hodinových intervalů. Tabulka 4.2 popisuje spotřebu elektrické energie v období od 00:00 - 08:00. Jak již bylo zmíněno na začátku 2. Kapitoly, tak v období mezi 00:00 - 06:00 není spotřeba skoro žádná a ranní špička nastává mezi 06:00 - 09:00 hodinou ranní. Průměrná spotřeba elektrické energie, na fiktivním rodinném domě, je za toto období 3 475 Wh.

Spotřebič	Výkon [W]	Množství [ks]	Celkem [W]	Hodin [h]	Celkem [Wh]
Žárovky	50	15	750	2	1 500
Lednice	140	1	140	8	1 120
MW trouba	950	1	950	0,1	95
Televize	100	2	200	0,5	100
Rádio	20	1	20	–	–
Notebook	30	2	60	–	–
Plyn. kotel	1 100	1	1 100	0,6	660
Pračka	2 100	1	2 100	–	–
Celkem	–	–	–	–	3 475

Tabulka 4.2: Průměrná spotřeba elektrické energie v období 00:00 - 08:00

Tabulka 4.3 udává spotřebu elektrické energie v období od 08:00-16:00. Ranní špička končí okolo 09:00. Od 09:00 do 17:00 je opět malý odběr elektrické energie.

Poslední Tabulka 4.4 zobrazuje spotřebu elektrické energie v období od 16:00-00:00.

KAPITOLA 4. POROVNÁNÍ AKUMULAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Spotřebič	Výkon [W]	Množství [ks]	Celkem [W]	Hodin [h]	Celkem [Wh]
Žárovky	50	15	750	0,4	300
Lednice	140	1	140	8	1 120
MW trouba	950	1	950	–	–
Televize	100	2	200	0,6	140
Rádio	20	1	20	1,5	30
Notebook	30	2	60	1	60
Plyn. kotel	1 100	1	1 100	0,4	440
Pračka	2 100	1	2 100	2	4200
Celkem	–	–	–	–	6 290

Tabulka 4.3: Průměrná spotřeba elektrické energie v období 08:00 - 16:00

Spotřebič	Výkon [W]	Množství [ks]	Celkem [W]	Hodin [h]	Celkem [Wh]
Žárovky	50	15	750	3	1 120
Lednice	140	1	140	8	1 120
MW trouba	950	1	950	0,1	95
Televize	100	2	200	2	400
Rádio	20	1	20	3	60
Notebook	30	2	60	4	240
Plyn. kotel	1 100	1	1 100	1	1 100
Pračka	2 100	1	2 100	–	–
Celkem	–	–	–	–	5 265

Tabulka 4.4: Průměrná spotřeba elektrické energie v období 16:00 - 00:00

Komerčně vyráběná jednotka vanadium - redox baterie

Z Tabulek 4.2, 4.3 a 4.4 vyplývá, že spotřeba elektrické energie v jednotlivých denních intervalech nepřesahuje hodnotu 6,3 kW/8h. Jako vhodná vanadium redoxová baterie se jeví Cellcube FB 10-100.

Zařízení Cellcube FB 10-100 je obří akumulátor s integrovaným systémem pro nabíjení a vybíjení. Ukládání a odběr elektrické energie je uskutečňován průtokem obou elektrolytů palivovým článkem. Akumulátor je připraven spolupracovat s fotovoltaickými panely v ostrovním i síťovém provozu. Zařízení je možné využít i jako záložní systém. Hlavní výhodou zařízení je jeho neklesající účinnost při ukládání a spotřebě energie díky tomu, že elektrolyty nestárnou.[24]

Tento druh baterie dokáže dodat výkon 8 kW po dobu 10 hodin. Z jednoduché rovnice 4.1. je zřejmé, že zvolená vanadium redoxová baterie vyhovuje našim požadavkům a dá se aplikovat na fiktivní rodinný dům. Dokonce disponuje i značnou rezervou, která by v případě pořízení nového elektrického zařízení mohla pokrýt jeho příkon.

$$6,3 \text{ kW}/8 \text{ h} \ll 8 \text{ kW}/10 \text{ h} \tag{4.1}$$

Technické parametry vanadium redoxové baterie Cellcube FB 10-100 jsou uvedeny v Tabulce 4.5.

Parametr	Cellcube FB 10-100
Nominální / maximální / stálý dobíjecí výkon	10 kW / 15 kW / 12 kW
Nominální / maximální / stálý výstupní výkon	10 kW / 15 kW / 8 kW
Energetická kapacita	100 kWh
Výstupní napětí	230 V 1f / 400 V 3f
Reakční doba (čas připojení výkonu)	menší než 60 ms
Účinnost nabití / vybití	až 80 %
Management dobíjení / vybití	3x SMA SunnyIsland 5048
Doba vybití při stálém výstupním výkonu	8 kW po dobu 10 hodin
Samovybití při stand-by módu	150 W
Samovybití elektrolytu v nádržích	menší než 1% za rok
Vzdálený monitoring (SoC, úroveň nabití, výkon)	ANO
Inteligentní management teploty	ANO
Výška zařízení	2.403 mm
Šířka zařízení	2.200 mm
Délka zařízení	4.500 mm
Hmotnost zařízení bez elektrolytů	3.500 kg
Hmotnost zařízení včetně elektrolytů	10.300 kg
Frekvence údržby	1x za 10 let
Náklady na údržbu (10 let)	15% ceny zařízení

Tabulka 4.5: Technické parametry vanadium - redox baterie, Cellcube FB 10-100, převzato z [24]

4.2 Navržení hydrogen generátorů na daný objekt

Navrhovaný systém by měl fungovat tak, že při nadbytku elektrické energie, by se v hydrogen generátoru vyráběl vodík. Vyrobený vodík by se ukládal do vysokotlakých

nádrží. Při nedostatku elektrické energie by se tento nashromážděný vodík uvolňoval do palivového článku, kde by docházelo k výrobě elektrické energie.

Komerčně vyráběný palivový článek

Jak již bylo řečeno, spotřeba elektrické energie v jednotlivých denních intervalech, nepřesahuje hodnotu 6,3 kW. Jako nejvhodnější palivový článek, k výrobě elektrické energie, se jeví palivový článek firmy BALLARD. Přímou se jedná o typ FCgen-1300, který dosahuje maximálního výstupního výkonu 6,6 kW. Tento článek je založen na technologii PEM. Všechny technické parametry navrhovaného palivového článku FCgen-1300, jsou uvedeny v Tabulce 4.6.

Parametr	FCgen-1300
Max. výkon	6,6 kW
Maximální proud	160 A
Napětí	48,5 V
Spotřeba paliva	74,1 SLPM
Hmotnost	15,5 kg

Tabulka 4.6: Technické parametry palivového článku FCgen-1300

Návrh hydrogen generátoru

U návrhu hydrogen generátoru musíme počítat s hodinovou produkcí vodíku. Pokud má palivový článek spotřebu paliva 4,44 m³/h, tak je ideální navrhnout vyvíječ vodíku, který dosahuje výroby 5 m³/h. Jeden z vhodných typů generátoru, vyrábí italská firma IDROENERGY Hydrogen generators a jedná se o model 11.0 Generator s hodinovou produkcí vodíku 7,4 m³/h. Jiným vhodným typem hydrogen generátoru, je

generátor od firmy HySTAT, který produkuje 10 m³/h vodíku. Technické parametry hydrogen generátoru 11.0 Generator a HySTAT-10-25 jsou uvedeny v Tabulce 4.7

Parametr	Model 11.0 Generator	HySTAT-10-25
Produkce vodíku	7,4 m ³ /h	10 m ³ /h
Maximální tlak	0,4 - 0,6 MPa	2,5 MPa
Čistota plynu	větší než 99,5%	99,9%
Napájecí napětí	400 V, 50 Hz	400 V, 50 Hz
Max spotřeba elektrické energie	40 kWh	4,9 kWh
Max proud	70 A	–
Délka x šířka x výška	2,2 x 1 x 1,5 m	1,7 x 1,85 x 2,6 m
Hmotnost	1 180 kg	1 400 kg

Tabulka 4.7: Technické parametry hydrogen generátorů: Model 11.0 Generator a HySTAT-10-25

Z tabulky je patrné, že hydrogen generátor HySTAT-10-25 disponuje větší hodinovou produkcí vodíku, než italský hydrogen generátor. Tato vlastnost je vykoupena jeho rozměry a hmotností.

Návrh systému akumulace

Vyrobený vodík je nutné uskladnit. Jako nejlepší varianta se nabízí použití vysokotlakových nádrží na plynný vodík. Firma VÍTKOVICE CYLINDERS a.s. nabízí ve svazku 12 lahví po 50 l, 200 bar. Do jedné padesáti litrové lahve lze uskladnit 9,0 m³H₂ při tlaku 20 MPa. Celkový objem uskladněného vodíku by dosahoval hodnoty 108 m³H₂. Takto uskladněný vodík, by stačil na 24 hodinový provoz palivového článku. Hydrogen generátor HySTAT-10-25, by zvládl tento objem vyrobit za 10,8 hodiny a italský model 11.0. Generator za 14,6 hodiny.

Poslední věc, co se musí zajistit, je tlak vodíku. Výstupní tlak vodíku z hydrogen generátoru HySTAT-10-25 je 2,5 MPa a z italského generátoru 0,4 - 0,6 MPa. Požadovaný tlak vodíku, ve vysokotlaké lahvi je 20 MPa, proto musíme vodík stlačit na vyšší tlak. Ke stlačení je vhodné použít suchý pístový kompresor. Mezi kompresor a hydrogen generátor je potřeba umístit vyrovnávací nádrž.

4.3 Navržení superkapacitorů na daný objekt

Mezi hlavní vlastnosti superkapacitorů patří: vysoká životnost a účinnost, časté nabíjení a vybíjení a možnost dodávat vysoký výkon po krátkou dobu. Z poslední vlastnosti vyplývá, že se zatím nehodí pro dlouhodobé skladování elektrické energie.

Pro zvolený fiktivní rodinný dům, je využití superkapacitorů nereálné. Superkapacitory sice dosahují výkonů, které požadujeme, nicméně jsou schopny je dodávat jen po krátkou dobu (cca 5 s).

Jedna z variant, jak by se daly superkapacitory využít, je spolupráce s klasickými olovněnými bateriemi. Tato kombinace má své výhody. Dá se špičkově odebírat několiknásobně vyšší výkon, než na jaký jsou akumulátory dimenzovány. Této výhody by se dalo využít například při náhlých změnách rychlosti větru a nebo intenzity slunečního záření. Superkapacitor by snižoval zatížení akumulátoru, což by vedlo k prodloužení životnosti akumulátoru.

4.4 Doba akumulace elektrické energie

Jednotlivé akumulační technologie se od sebe liší dobou, za kterou se nabíjí. Doba, za kterou se superkapacitor nabije, se pohybuje v rozmezí 5 - 10 s.

Vanadium - redoxová baterie se nabije za 6 - 10 h. Doba akumulace je závislá na dobíjecím výkonu a na kapacitě baterie. Použitá průtoková baterie Cellcube FB

10-100, by se při stálém dobíjecím výkonu 12 kW dobila za 8,3 h.

U akumulaci pomocí vodíku, bereme v úvahu celkovou kapacitu vysokotlakých lahví, palivový článek a hydrogen generátor. Celkový objem uskladněného vodíku, u fiktivního domu, ve vysokotlakých lahví dosahuje hodnoty $108 \text{ m}^3\text{H}_2$. Tento objem uskladněného vodíku stačí na 24 hodinový provoz palivového článku. Hydrogen generátor HySTAT-10-25 je schopný tento objem vyrobit za 10,8 hodiny a italský model 11.0. Generator za 14,6 hodiny.

4.5 Bezpečnost

Vodík

Vodík, společně s kyslíkem a vzduchem, tvoří výbušnou směs a hrozí nebezpečí exploze. Při manipulaci s vodíkem, je nutné dodržet hlavní bezpečnostní pravidlo. Vodík se nesmí dostat do kontaktu se vzduchem. Pokud by došlo ke vzniku směsi vodíku a vzduchu, tak jakýkoliv zdroj ohně (jiskra, cigareta) by způsobil výbuch. Při manipulaci s vodíkem se musí dodržovat bezpečnostní, technické a protipožární předpisy.

Trasa, po které je vodík přepravován od lahve nebo zásobníku ke spotřebiči, musí být po celé své délce dostatečně utěsněná, aby nedocházelo ke vzniku výbušné směsi. Tento požadavek klade na celý systém výroby a akumulace vodíku vysoké nároky. Samotné hydrogen generátory a komponenty (ventil, regulátor, rozvody) musí být vyrobeny tak, aby nedošlo k mechanickému poškození a následně k úniku vodíku.

Jelikož je vodík 14,4 krát lehčí než vzduch, tak se při úniku drží ve stropních prostorech. Proto na místech, kde se vodík skladuje, je nutné zajistit stropní větrání. Pokud se k akumulaci vodíku využívají vysokotlaké lahve, tak se musí splnit podmínka, aby teplota plynu v tlakové lahvi nepřesahovala hodnotu 50°C . Pokud by se tato podmínka nesplnila, tak by hrozilo nebezpečí mechanického poškození a tím i k úniku vodíku, protože s rostoucí teplotou se zvyšuje i tlak vodíku v lahvi.

Superkapacitory

Superkapacitory jsou nízkonapěťové zařízení, které jsou schopny dodávat extrémně vysoké proudy a to zejména v případě zkratu. Manipulace se superkapacitory by se měla provádět v nenabitém stavu.

Při navrhování systému, který počítá s vyšším napětím, musí být dodrženy standardní bezpečnostní postupy. Superkapacitor by měl být provozován na stanoveném jmenovitém napětí. Pokud jsou zařízení provozována na vyšších napětích, než je jejich jmenovité napětí, dochází ke zvýšení procházejícího proudu a zároveň k rychlejšímu rozkladu elektrolytu. Tento proces má za následek navýšení teploty superkapacitoru na 125°C - 150°C a zároveň k aktivaci vysokotlaké pojistky. Vysokotlaká pojistka se aktivuje při vnitřním tlaku 12 - 15 bar. Vadný superkapacitor by měl být odstraněn ze systému, jeho neodstranění by vedlo ke zvyšování odporu a nebo ke korozi.

Provozní teplota, při kterých superkapacitory pracují, se pohybuje v rozmezí -40°C až 65°C. Superkapacitory jsou schopny efektivně pracovat i při vysokých úrovních vlhkosti, během provozu nesmí docházet ke shromažďování kondenzátu na místech, které by mohli ovlivnit provoz superkapacitoru. Elektrolyt superkapacitoru má vysokou tenzi par a je klasifikován jako hořlavý.

Vanadium - redox baterie

Největším konstrukčním problémem, u vanadium - redox baterií, je těsnost ucpávek čerpadel a tím i celá bezpečnost systému. Elektrolyt je tvořen vanadovou solí a koncentrovanou kyselinu sírovou. Pokud by tento elektrolyt unikl, znamenalo by to velkou zátěž na životní prostředí.

Na druhou stranu je dobré zmínit, že tento systém neobsahuje kadmium, olovo nebo rtuť. Proto vanadium - redox baterie patří mezi nejvíce ekologické systémy založené na technologii elektrochemických akumulátorů.

4.6 Ekonomická bilance

Hydrogen generátory

Jako vhodnými kandidáty, na výrobu vodíku u fiktivního rodinného domu jsou: hydrogen generátor od italské firmy IDROENERGY Hydrogen generators, model 11.0 Generator a hydrogen generátor od firmy HySTAT. Cena hydrogen generátoru italské firmy IDROENERGY Hydrogen generators je 89 000 € (při dnešním kurzu 1 € = 25,86 Kč, 10.4.2013) **2 301 540 Kč**. Do celkové ceny se musí počítat s cenou za dopravu a s cenou za instalaci zařízení. Cena druhého hydrogen generátoru HySTAT, není bohužel známa.

K akumulaci vodíku, je vhodné použít vysokotlaké lahve. Firma VÍTKOVICE CYLINDERS a.s. nabízí ve svazku 12 lahví po 50 l, 200 bar. Cena za jednu lahev se pohybuje okolo 8 470 Kč (cena s DPH). Celková cena za 12 vysokotlakých lahví činí tedy **101 640 Kč** (s DPH). K této ceně se musí započítat cena za dopravu.

Cena palivového článku závisí na řadě faktorů, včetně množství vyrobených kusů, úrovni služeb požadované podpory a na dalších údajích uvedené v zákaznické smlouvě o dodávce. Při nízkých objemech výroby, je cena palivového článku FCgen - 1300 mezi 5 800 \$ - 19 620 \$ (při dnešním kurzu 1 \$ = 19,764 Kč, 10.4.2013) dosahuje cena částky **114 631,2 Kč - 387 769,68 Kč**. Dále se musí počítat s cenou za dopravu a s cenou za instalaci zařízení.

Do celkových nákladů se musí započítat cena za kompresor a cena za DC-AC měnič. Je-li hydrogen generátor napájen stejnosměrným napětím (DC), může být spojen se zdrojem elektrické energie přímo.

Celková cena systému, záleží na více faktorech. Jedním z faktorů je například kurz, další z faktorů je počet vyrobených jednotek. Hrubý odhad ceny systému používající hydrogen generátory, ve kterém není započítána cena za dopravu, cena za kompresor, cena za instalaci zařízení a cena za měnič, činí **2 790 949,68 Kč**.

Vanadium - redox baterie

Finanční náklady na akumulaci elektrické energie pomocí vanadium - redox baterie, která by byla aplikována na fiktivní rodinný dům, který byl popsán na začátku této kapitoly, dosahují částky **3 170 199 Kč**(cena včetně DPH 21%).[24]

Průtoková baterie vanadium - redox Cellcube FB 10-100 od firmy Cellstrom obsahuje 3x střídač SMA SunnyIsland 5048 (jednofázový měnič, regulátor dobíjení baterií a ovládání připojování k záložním zdrojům). Nicméně v ceně za baterii není zahrnuta cena za dopravu a cena za instalaci baterie. Dále se musí počítat s náklady na údržbu, které dělají 15 % ceny zařízení. Údržba se provádí 1x za 10 let.

Distribuci vanadium - redoxových baterií Cellcube FB 10-100 v České republice zajišťuje firma SOLARENVI a.s.

Hrubý odhad ceny systému používající vanadium - redox baterie, ve kterém není započítaná cena za dopravu, cena za instalaci zařízení a cena za údržbu, činí **3 170 199 Kč**.

Kapitola 5

Závěr

V teoretické části jsem popsal obnovitelné zdroje elektrické energie, způsoby akumulace elektrické energie a to především pomocí hydrogen generátorů, vanadium - redox baterií a superkapacitorů. Dále jsou v této části zmíněny výhody a nevýhody jednotlivých technologií a vhodnost použití.

V praktické části jsem aplikoval akumulční technologie na fiktivní rodinný dům. Je zde návrh akumulace pomocí hydrogen generátorů a pomocí vanadium - redox baterie. Pro zvolený fiktivní rodinný dům je využití superkapacitorů nereálné. Superkapacity dokáží dodávat vysoký výkon po krátkou dobu, a proto se nehodí pro dlouhodobé skladování elektřiny. Na konci kapitoly je uvedena bezpečnost jednotlivých technologií, ekonomická bilance a doba akumulace elektrické energie. Co se týče zastavěného prostoru, tak akumulace pomocí vanadium - redox baterií potřebují cca 10 m² plochy. Celková hmotnost systému, včetně elektrolytu se pohybuje okolo 10 000 kg. Celkový potřebný prostor pro akumulaci pomocí vodíku je 8,5 m². Ve výsledné ploše je započítána plocha jednotlivých dílčích subsystémů (hydrogen generátory, vysokotlaké lahve, palivový článek, atd.) Hmotnost akumulčního systému využívajícího vodík je cca 2 000 kg. Cena, v případě akumulace pomocí vanadium - redox baterií, dosahuje částky **3 170 199 Kč**, u akumulace pomocí vodíku a jed-

notlivých subsystémů cena činí **2 790 949,68 Kč**. Ceny záleží na více faktorech (kurz, množství vyrobených kusů, apod.) a není v nich započítána cena za instalaci, dopravu a údržbu. Po započítání veškerých nákladů je zřejmé, že celkové náklady by byly mnohonásobně vyšší, a dosahovaly by obrovských finančních částek.

Ani jeden z uvedených systémů akumulace, nemůže v současné době konkurovat zavedeným technologiím. Návratnost těchto technologií se pohybuje na hranici životnosti instalovaných zařízení.

Literatura

- [1] Ministerstvo životního prostředí. Zákon č. 17/1992 Sb., o životním prostředí, ve znění pozdějších předpisů. In *Zákon č. 17/1992 Sb., o životním prostředí, ve znění pozdějších předpisů*. Praha 10 : [s.n.], 1992. [online] [Cit. 11.11.2012, 15:20]. Dostupné z :
[http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/5B17DD457274213EC12572F3002827DE/\\$file/OL-zakon_o_ZP-20040809.doc](http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/5B17DD457274213EC12572F3002827DE/$file/OL-zakon_o_ZP-20040809.doc)
- [2] Mastný, P. a spol.: *Obnovitelné zdroje elektrické energie*
Praha, Vydavatelství ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2
- [3] Gatzen, Ch.: *The Economics of Power Storage*
Oldenbourg Industrieverlag, München, 2008).
- [4] Blažek, J., Rábl, V. *Základy zpracování a využití ropy. 2. vyd.*
Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha, 2006. ISBN 80-7080-619-2
- [5] HyFLEET:CUTE *Technology :: Hydrogen Production :: reforming.*
[online] [Cit. 19. 2. 2013]. Dostupné z: <http://www.global-hydrogen-busplatform.com/Technology/HydrogenProduction/reforming>

- [6] Petroleum.cz *Výroba vodíku parním reformováním*. [online] [Cit. 19. 2. 2013]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>
- [7] Somolová, M., Dlouhý, P. Hytep.cz *Česká vodíková technologická platforma*. [online] [Cit. 19. 2. 2013]. Dostupné z: <http://hytep.cz/?loc=article&id=6>
- [8] 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, 2005. ISSN 0360-3199
- [9] Doucek, A., Tenkrát, D., Dlouhý, P. *Vodíkové hospodářství a možnosti využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie*. [online] [Cit. 6. 3. 2013]. Dostupné z: http://paliva.vscht.cz/data/clanky/36_vodikove_hospodarstvi_a_moznosti_vyuziti_vodiku_k_regulaci_obnovitelnych_zdroju_energie.pdf
- [10] Tuček, V., Dvořáková, L., Hanzal, J. *Vodík*. [online] [Cit. 6. 3. 2013]. Dostupné z: <http://www.catp.cz/publikace/vodik.pdf>
- [11] Bača, P. *Akumulace energie z OZE - vodíkové hospodářství*. [online] [Cit. 6. 3. 2013]. Dostupné z: <http://energie.tzb-info.cz/7134-akumulace-energie-z-oze-vodikove-hospodarstvi>
- [12] http://www.es-systems.eu/images/fotovoltaika_prumerny_dopad.jpg
- [13] <http://energie.tzb-info.cz/docu/clanky/0065/006518o5.jpg>
- [14] <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/obr/k32-4.gif>
- [15] <http://www.ceps.cz/CZE/Data/Vsechna-data/Stranky/Vyroba.aspx>
- [16] <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>

- [17] http://www.itest.cz/solar/kolektor_koso.jpg
- [18] <http://www.petraenergy.cz/data/content/images/schema.jpgf>
- [19] <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/obr/k32-6.gif>
- [20] <http://www.energetickyporadce.cz/data/sharedfiles/Ilustracni-obrazky/obnovitelne-zdroje/vitr/rychlost-vetru.jpg>
- [21] <http://www.csve.cz/cz/kategorie/vzdelavani/13>
- [22] <http://www.oze.hu.cz/windenergy.php>
- [23] http://www.solarenavi.cz/assets/img-products/img_fv_Cellstrom-Cellcube_01.jpg
- [24] <http://www.solarenavi.cz/slunecni-elektrarny/produkty/vanadium-redox/cellcube-fb-10-100/>