

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů
Storage of energy gained from renewable sources

2011

Bc. Jan Vaculík

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Jan Vaculík

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Akumulace energie získané z obnovitelných zdrojů
Storage of energy gained from renewable sources

Zásady pro vypracování:

1. Systémy akumulace elektrické energie.
2. Alternativní posouzení jednotlivých systémů akumulace.
3. Výběr kritérií a jejich váhy pro rozhodování vybraných alternativ.
4. Výběr optimální varianty pro akumulaci elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů.
5. Zpracování akumulace solární energie do vodíkové technologie v laboratoři VŠB-TU Ostrava.

Seznam doporučené odborné literatury:

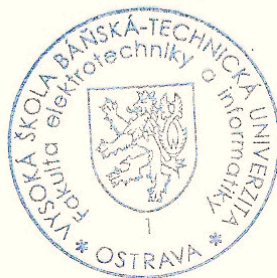
1. Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení. Kniha MONTANEX, 2009.
2. Sborník Mezinárodní vědecká konference EPE 2009 Dlouhé Stráně.
3. Sborník EPE-2010 VUT Brno
4. Sborník PE 2010 Polsko - Wisla
5. Sborník ELNET - 2010 VŠB-TU Ostrava
6. Hradílek, Z.; Moldřík, P.: Akumulace elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů. Časopis: ENERGETIKA č. 4 2010 str. 228


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Zdeněk Hradílek, DrSc.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011




prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení Studenta:

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 6. 5. 2011

.....

Pokládám za milou povinnost poděkovat panu Prof. Ing. Zdeňku Hradílkovi, DrSc., panu Ing. Petru Moldříkovi, Ph.D. a panu Ing. Romanu Chválkovi, z katedry elektroenergetiky VŠB – TU Ostrava, za velmi dobré vedení a podnětné rady při tvorbě své diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou akumulace elektrické energie ve vodíkovém systému, který je napájen z fotovoltaických panelů. Obsahuje přehled obnovitelných zdrojů elektrické energie a akumulačních systémů, popisuje jejich parametry, včetně základního rozdělení. Akumulační systémy jsou vyhodnoceny za pomoci multikriteriální analýzy metodou minimalizace vzdálenosti od ideální varianty (TOPSIS). Hlavním úkolem práce je vypočítat účinnost dílčích zařízení, která jsou zapojena v akumulačním systému laboratoře palivových článků VŠB – TU Ostrava, včetně fotovoltaických panelů určených k napájení tohoto vodíkového systému. Údaje pro výpočty byly získány z praktického měření v laboratoři. Doplňujícím měřením ke zjištění účinností bylo proměření zatěžovacích charakteristik a pracovních charakteristik palivového článku (technologie PEM) Nexa Power Module od firmy Ballard.

Klíčová slova

Akumulace, Obnovitelný zdroj energie, vodík, elektrolyzér, palivový článek, účinnost, fotovoltaika

Abstract

This thesis deals with the accumulation of electric energy in the hydrogen system, which is powered by photovoltaic panels. It contains a summary of renewable energy sources and storage systems and describes their characteristics, including the basic partition. The storage systems are evaluated using multi-criterial analysis by minimizing the distance from the ideal option (TOPSIS). The major task of this thesis is to calculate the efficiency of the component units, that are connected within the storage system of the fuel cells laboratory VŠB-TU Ostrava, including photovoltaic panels for the hydrogen supply system. Data for calculations was obtained by practical measurement in the laboratory. The complementary measurement to determinate the efficiency comprised the measurement of load characteristics and performance characteristics of fuel cell (PEM technology) Nexa Power Module made by Ballard company.

Key words

Accumulation, renewable energy source, hydrogen, electrolyzer, fuel cell, efficiency, photovoltaics

Seznam použitých symbolů a zkratk:

AC	střídavé
Al	hliník
atd.	a tak dále
C	kapacita (F)
CAES	Compressed Air Energy Storage
cca	přibližně
CO ₂	oxid uhličitý
CO	oxid uhelnatý
Cr	chrom
dB	decibel
DC	stejnoseměrné
DDZ	denní diagram zatížení
DOD	Depth of Discharge (hloubka vybití)
ES	elektrizační soustava
FV	fotovoltaika
H	vodík
h	hodin
H ₂ O	voda
h/rok	hodin za rok
I	proud (A)
J	Joule
kg	kilogram
kg·m ²	kilogram krát metr čtvereční
kWh	kilowatt hodina
Li	Lithium
m	hmotnost (kg)
MCA	multikriteriální analýza
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
např.	například
O	kyslík
OZE	obnovitelný zdroj energie
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PbO ₂	oxid olovičitý
PČ	palivový článek
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
P _n	jmenovitý výkon (W)

PV článek	polovodičový článek
PVF-PET-PVF	polyvinylidenfluorid-polyetylentereftalát-polyvinylidenfluorid
$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	radián krát sekunda na minus první
SMES	Supravodivý magnetický akumulátor energie
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SW	software
TSF	transformátor
U	napětí (V)
Wh/dm^3	watthodina na decimetr krychlový
Wh/kg	watthodina na kilogram
Wp	watt peak (špičkový výkon FV panelu)

Poznámka:

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

Obsah

Úvod.....	2
1 Systémy akumulace elektrické energie.....	3
1.1 Přehled obnovitelných zdrojů energie.....	3
1.1.1 Solární energie.....	3
1.1.2 Vodní energie	7
1.1.3 Větrná energie.....	9
1.1.4 Energie biomasy	10
1.1.5 Geotermální energie	11
1.1.6 Elektrárna OTEC využívající tepelnou energii moří a oceánů.....	12
1.2 Akumulace	13
1.2.1 Akumulátory.....	15
1.2.1.1 Ni-Cd (Nikl Kadmiové) akumulátory.....	15
1.2.1.2 Ni-MH (Nikl Metal Hydridové) akumulátory	15
1.2.1.3 Olověné akumulátory.....	16
1.2.1.4 Lithium-Iontové (Li-Ion)	17
1.2.2 Akumulace do vodíku.....	18
1.2.2.1 Elektrolyzéry.....	19
1.2.2.2 Palivové články.....	20
1.2.3 Průtokové baterie.....	25
1.2.4 CAES (Compressed Air Energy Storage) systémy.....	26
1.2.5 Superkapacitory	27
1.2.6 Setrvačníky	28
1.2.7 Supravodivé magnetické akumulátory energie.....	30
2 Alternativní posouzení jednotlivých systémů akumulace	31
3 Výběr kritérií a jejich váhy pro rozhodování vybraných alternativ.....	34
4 Výběr optimální varianty pro akumulaci elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů.....	36
5 Zpracování akumulace solární energie do vodíkové technologie v laboratoři VŠB – TU Ostrava .	38
5.1 Laboratoř palivových článků – stručný popis	38
5.1.1 Vybavení laboratoře	39
5.1.2 Rozbor a popis systému akumulace.....	41
5.2 Vlastní měření a vyhodnocení dat z laboratoře palivových článků	42
5.2.1 Výroba vodíku z fotovoltaiky.....	42
5.2.2 Výroba elektrické energie z vodíku.....	50
5.2.3 Zhodnocení.....	52
5.2.4 Měření zatěžovací charakteristiky modulu palivových článků Nexa Ballard	53
Závěr.....	57
Použitá literatura.....	59
Seznam obrázků a tabulek.....	63

Úvod

V již nedaleké budoucnosti, dle předpovědí, dojdou ve velké míře zásoby fosilních paliv a postupně rovněž jaderného paliva, které dnes tvoří velký podíl ve výrobě elektrické energie a do popředí se dostanou právě obnovitelné zdroje. Právě některé z nich např. energie solární a větrná jsou bohužel velmi nestabilní, co se týče přímého zapojení do energetické soustavy. Jsou závislé na dostupnosti příslušného obnovitelného zdroje (energie slunečního záření, energie větru), jejichž rozložení na povrchu naší planety je velmi nerovnoměrně. Nejen v závislosti na poloze (rovník, střední část planety nebo polární oblasti), ale i na ročních obdobích. V oblastech s nízkou hustotou osídlení, např. pouště, je dostatek solární energie, která by mohla zásobovat velkou energeticky náročnou oblast, ale přenos na velké vzdálenosti je velmi ztrátový a neekonomický.

Možnou alternativou ke snížení energetických ztrát, a zároveň i odstranění nestabilních dodávek elektrické energie do energetické soustavy, jsou akumulární systémy. Spektrum akumulárních systémů je široké, ale všechny nezávisle na sobě mají různé nepřehlédnutelné nedostatky, jako například samovybíjení, opotřebení mechanických částí, krátkou dobu vybíjení, nízkou účinnost, životnost atd. Vědecký výzkum se snaží najít akumulární systém, který by tyto ztrátové atributy eliminoval na co nejnižší hodnoty. V této práci jsou některé akumulární systémy zmíněny a vyhodnoceny za pomoci multikriteriální analýzy (MCA), a sice metody TOPSIS. Značná pozornost je věnována akumulárnímu systému na bázi vodíkových technologií, které se ukazují velmi perspektivní.

1 Systémy akumulace elektrické energie

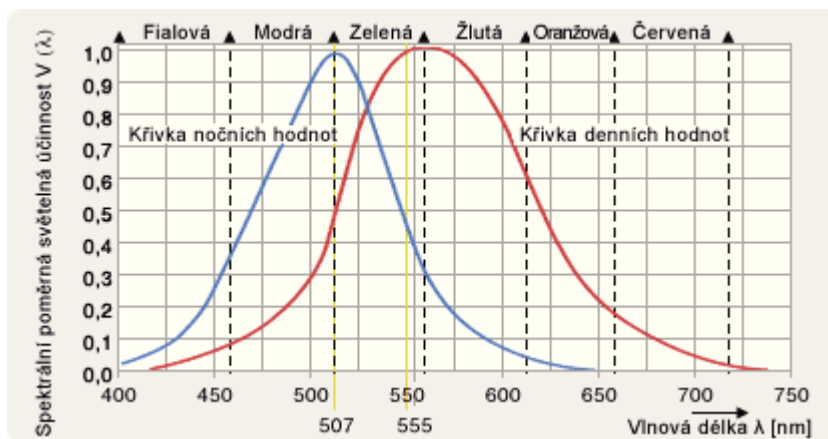
1.1 Přehled obnovitelných zdrojů energie

1.1.1 Solární energie

Slunce je velký termonukleární reaktor, jehož energie je 20 000 krát větší, než v dnešní době potřebuje celé lidstvo. Intenzita slunečního záření je na povrchu planety nerovnoměrná. Největší intenzita je u rovníku, a naopak nejmenší v polárních oblastech, a dále se také mění s ročním obdobím. Bohužel v noci a v zimě, kdy potřebujeme energie nejvíce, svítí Slunce málo nebo vůbec. Proto se snažíme učit energii také ukládat. Jednou z možností, která je zatím ve stádiu výzkumu, je vodíkový systém, který je v práci rozebrán podrobněji.

Solární energie je z hlediska životního prostředí nejšetrnějším a nejčistším způsobem výroby tepelné i elektrické energie. Účinnost přeměny na elektřinu z jednoho metru aktivní plochy je až 110 kWh elektrické energie za rok za pomoci současných solárních systémů. Na území ČR je celková doba svitu bez oblačnosti od 1400 do 1700 h/rok. Fotovoltaické panely dokážou pracovat, i když je slunce pod mrakem, ale v malých zlomcích %. Největšího výkonu dosahují kolem 12 hodiny, kdy je intenzita osvětlení největší.[1]

Spektrum slunečního záření se skládá z infračerveného (tepelného), viditelného a ultrafialového záření viz *obrázek 1*. V solárních zařízeních můžeme využívat přímo energii tepelnou, nebo měnit energii záření přímou přeměnou na energii elektrickou.



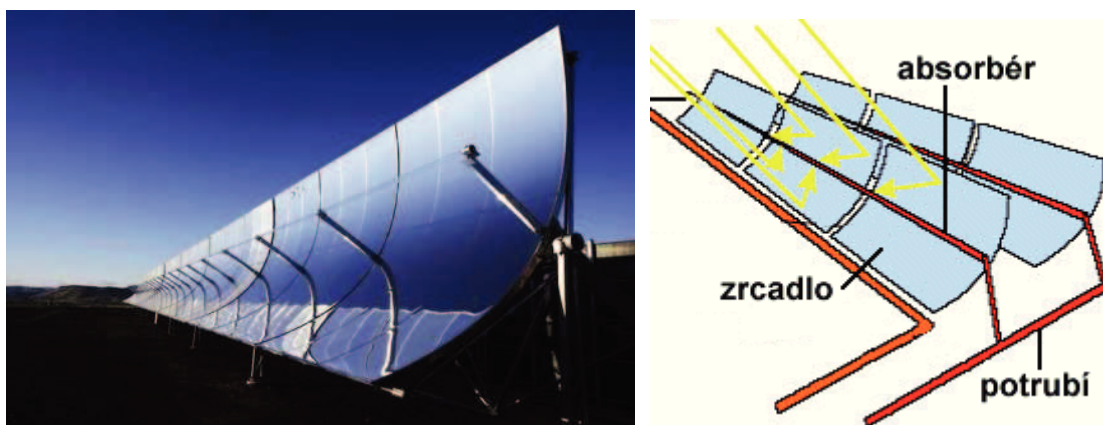
Obrázek 1: Spektrální křivka [39]

Tepelnou energii dokáží zpracovat **solární kolektory**, viz *obrázek 2*. Skládají se z izolační vrstvy, trubek s teplotnosnou kapalinou a černé desky, která absorbuje co největší množství solárního záření, které se tak mění v teplo. Systém je uzavřen skleněnou deskou. Izolace kolektorů musí být dostatečná, aby se teplo nevytrácelo vedením, prouděním a zpětným vyzářením. V kolektoru se ohřívá kapalina, která proudí v trubkách a přenáší teplo do místa spotřeby, kde ho odevzdává, nebo do výměníku tepla, kde ho předá jiné kapalině. Může se ukládat i do zásobníku tepla k využití v noci nebo zimě. Pro dosažení vyšších teplot v kolektoru se využívá koncentrace záření zrcadly. Zrcadla

mohou mít tvar paraboly, parabolického žlabu viz *obrázek 3*, kužele, nebo tzv. matrace. Během vzájemné přeměny energie dochází k nežádoucím ztrátám, a proto je snahou přeměnit přímo solární energii na elektrickou energii za pomoci **polovodičového fotovoltaického článku**.



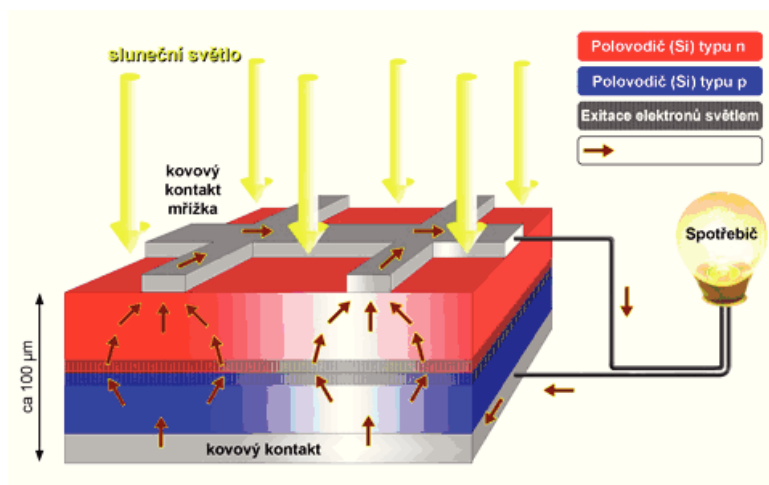
Obrázek 2: Solární kolektor [40]



Obrázek 3: Ukázka parabolických zrcadel [41.42]

Fotovoltaické články využívají fotoelektrický jev. Základním materiálem je křemík. Výroba čistého křemíku je velmi energeticky náročná. Vyrábí se v polotovarech, ze kterých je možno vyrábět polykrystalický, nebo monokrystalický ingot. Výroba fotovoltaických panelů je složitá a drahá. Ve fotovoltaickém panelu jsou jednotlivé články zapojeny v sérioparalelní kombinaci, aby při definovaném osvětlení poskytovaly žádané stejnosměrné napětí a výkon. Velikost tohoto výkonu je závislá od celkové plochy panelů. Konstrukce je zobrazena na *obrázku 4*. PV článek je složen z temperovaného skla, které je odolné vůči nárazu. Sklo je potaženo fólií (etylvinylacetát), na kterou se skládají propojené PV články. Propojení jednotlivých panelů je sériové za pomoci kovového pásku z přední i zadní strany. Kontakty jednoho článku jsou spojeny se zadním plošným kontaktem druhého

článku. Na spojené články se znovu pokládá fólie. Zadní strana panelu je z laminátové kompozice PVF-PET-PVF. Mezi vrstvami a panelem dojde k odčerpání vzduchu a zvýšení teploty nad tavný bod fólie. Etylvinylacetát se po roztavení rozteče jako zalévací hmota, která zalije PV články v prostoru mezi předním sklem a zadní laminátovou stranou panelu. Konečnou fází je rámování a zatmelení panelů silikonovým tmelem do hliníkových profilů a montování krabice s výstupními kontakty. PV panely jsou utěsněny proti vodě i jiným nečistotám. Kvalitní PV panely na bázi krystalických polovodičů mají životnost 20 až 30 let.



Obrázek 4: Konstrukce FV panelu [43]

Vzhledem k nízké účinnosti panelů je jejich výroba velmi energeticky náročná. Energetickou náročností se rozumí doba, za kterou vyrobí solární článek takové množství energie, která byla spotřebována na jeho výrobu, až po této době začíná vyrábět něco navíc. U fotovoltaických panelů se pohybuje kolem 10 let. Tedy pokud je životnost panelu 20 let, znamená to, že energetický zisk panelu je 10 let. Již existují systémy, jejichž energetická návratnost dosahuje 5 let. V létě je využitelnost panelů časově 20 % z celkové doby, v zimě pouze 5 %. Za celý rok je tedy doba využití panelů 10 %. Dnes mezi nejrozšířenější solární články vyrobené z krystalického křemíku patří monokrystalické s účinností 14 až 17 % nebo polykrystalické s účinností 12 až 15 %. Účinnosti v laboratorních podmínkách dosáhla 28 %. Výkon článků závisí na okamžité intenzitě slunečního záření, která udává jejich výkon jako tzv. špičkový, tedy při dopadajícím záření s intenzitou 10^3 W/m^2 při definovaném spektru. Článek s účinností 12 % má při ploše 1 m^2 špičkový výkon 120 W_p . [2, 3]

Fotovoltaické panely mohou být umístěny na stacionárních stojanech nebo pohyblivých stojanech. U pohyblivých stojanů je o cca 25 - 30 % výroba elektrické energie vyšší než u stacionárních stojanů. Pracují bez paliva, odpadu či znečišťování životního prostředí a zcela tiše.

Princip sluneční elektrárny

Energii ze Slunce můžeme získat buď nepřímou přeměnou za pomoci solárních kolektorů, nebo přímou přeměnou za pomoci polovodičových fotovoltaických panelů.

Nepřímá přeměna získává teplo slunečními sběrači. Sběrače jsou umístěny kolem ohniska, ve kterém jsou soustředěny termočlánky k přeměně tepla na elektrickou energii. Termoelektrická přeměna je založena na principu Seebeckova jevu – pokud je rozdílná teplota v obvodu spojů se dvěma dráty o různém materiálu, dojde ke vzniku elektrického proudu. V praxi se takovému zařízení říká termoelektrický článek. Vlastnosti a účinnost článku jsou závislé od vlastností obou kovů, z nichž jsou dráty vyrobeny, a dále na rozdílu teplot mezi teplým a studeným spojem. Skupina termoelektrických článků, které jsou vhodně spojeny, se nazývá termoelektrický generátor.

Přímá přeměna využívá fotovoltaického jevu, kdy se v dané látce uvolňují elektrony působením světla. K tomu dochází v některých polovodičích (křemíku, germaniu, selenu, kadmia atd.). Fotovoltaický článek se skládá z tenké monokrystalické, nebo polykrystalické křemíkové destičky, která je obohacena na jedné straně atomy trojmocného prvku (např. bóru) a na druhé straně atomy pětimocného prvku (např. arzenu). V okamžiku dopadu fotonu na destičku se záporné elektrony uvolní a zůstanou kladně nabitě „díry“. Pokud na obě strany destičky přiložíme elektrody a spojíme je vodičem, dojde k průtoku elektrického proudu. Jeden cm^2 solárních článků vyrobí proud kolem 12 mA, a jeden m^2 může v létě kolem poledne vyrobít až 150 A stejnosměrného proudu. Sérioparalelním spojením článků vzniká fotovoltaický panel.[1]

1.1.2 Vodní energie

Z pohledu na planetu Zemi je zřejmé, že v řekách a mořích jsou ukryty velké potenciály „nevyčerpatelného“ zdroje energie, který se stále obnovuje a cirkuluje. Velkou předností vodní energie je, že při jejím získávání nedochází k znečištění životního prostředí.

Ve velké míře se využívá energie vody jako energie polohové a pohybové. Koloběh vody spočívá v tom, že steče, např. z hor, cestou uvolní energii, kterou můžeme využít u vodních elektráren, a na původní energii se voda dostane za pomoci slunečního záření, které vodu odpaří a vrací v podobě dešťů a sněhu do míst vysoké potenciální energie.

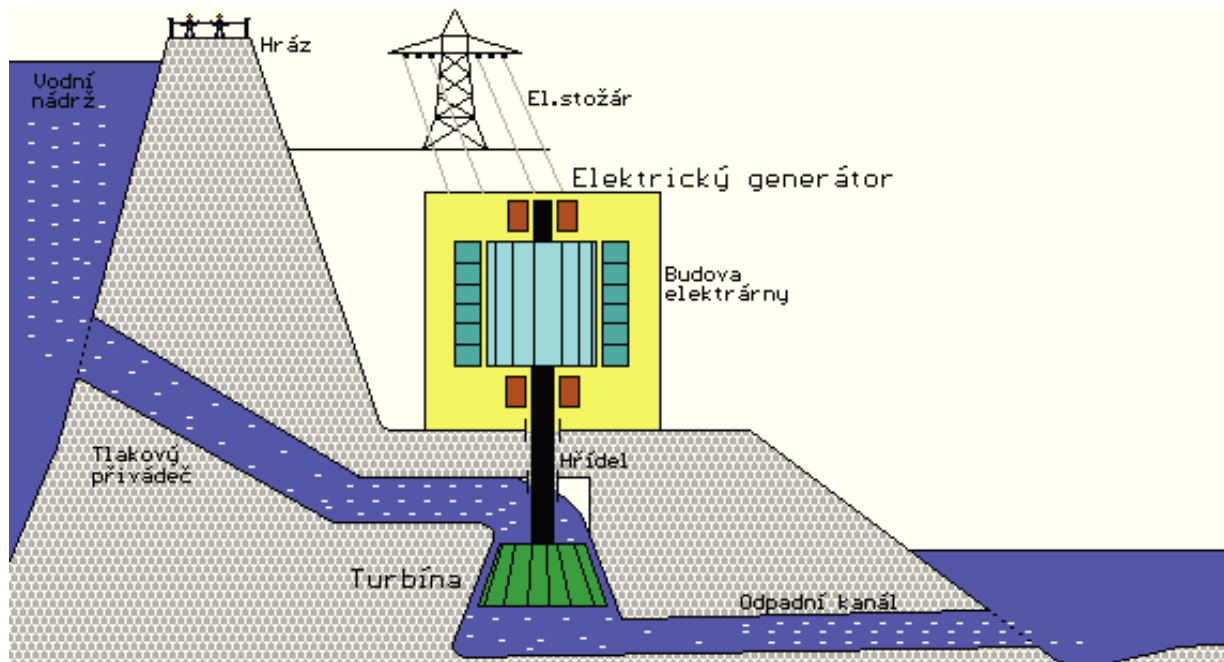
Princip vodní elektrárny

Ve vodní elektrárně viz *obrázek 5*, voda roztáčí turbínu, která je na společné hřídeli s elektrickým generátorem (turbogenerátor). Mechanická energie proudící vody se tak mění na energii elektrickou, která se transformuje a odvádí do míst spotřeby.

Výběr turbíny závisí na účelu a podmínkách celé vodní stavby. Nejčastěji se zapojují turbíny reakčního typu (Francoisova, Kaplanova turbína), a to v různých provedeních. Pro vysoké spády (až 500 m) se používá Peltonova turbína. V přečerpávacích vodních elektrárnách se používá turbína s reverzním chodem a s přestavitelnými lopatkami. V malých vodních elektrárnách je většinou malá horizontální turbína Bánkiho a upravená jednoduchá Francisova.

Umístění vlastní elektrárny může být různé dle výškových a spádových možností, tvaru terénu a objemu vody. Existují elektrárny budované přímo v hrázi nebo v podzemí. Voda se k nim přivádí tlakovým potrubím a odvádí se podzemním kanálem.

Kromě průtokových vodních elektráren patří mezi nejznámější vodní elektrárny akumulární. Jsou součástí vodních děl - nádrží. Nádrže slouží k akumulaci vody pro výrobu elektrické energie, ale stabilizují také průtoky říčním korytem, chrání před povodněmi a podporují plavební možnosti toku. Břehy nádrží mohou sloužit jako rekreační oblasti, zdroj pitné vody, technologické a závlahové vody pro různá odvětví průmyslu.[2, 3]



Obrázek 5: Ukázka vodní elektrárny [44]

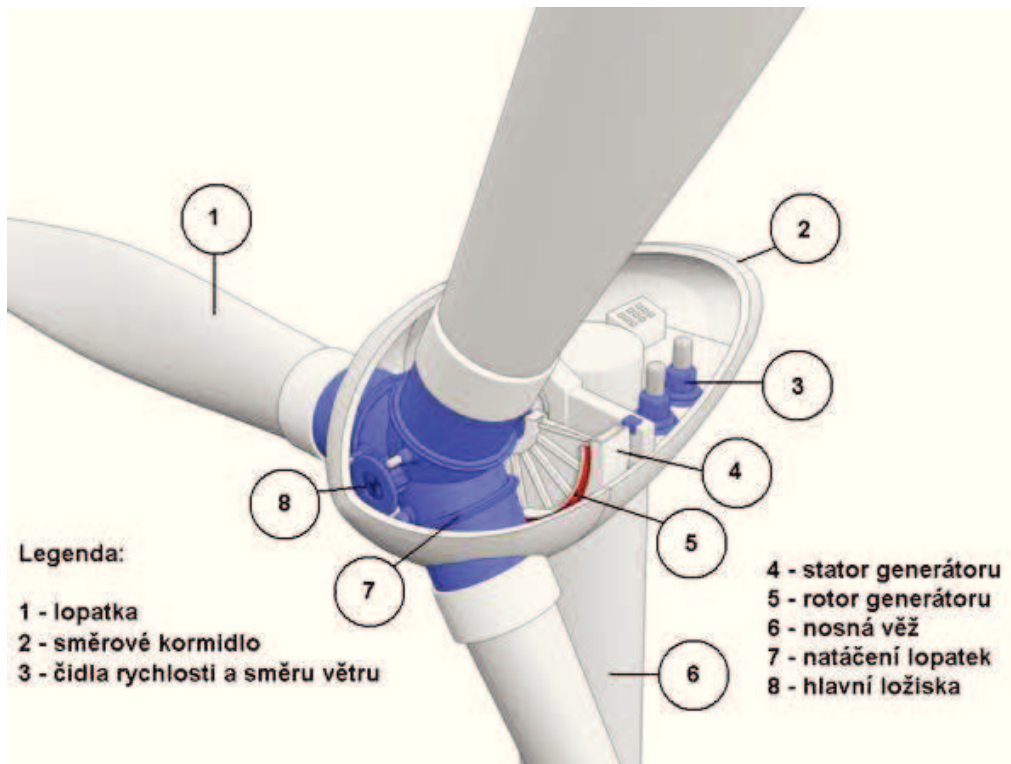
1.1.3 Větrná energie

Vítr vzniká prouděním vzduchu, které je způsobeno nerovnoměrným ohříváním vzduchu na Zemi (teplejší ohřátý vzduch je lehčí a stoupá vzhůru, chladnější těžší klesá k povrchu Země). Toho využívá k výrobě elektrické energie větrná elektrárna, viz obrázek 6.

Princip větrné elektrárny

Působením aerodynamických sil na listy rotoru převádí větrná turbína, umístěná na stožáru, energii větru na rotační energii mechanickou. Ta je poté prostřednictvím generátoru zdrojem elektrické energie (na podobném principu turbogenerátoru pracuje klasická, vodní či jaderná elektrárna). Podél rotorových listů vznikají aerodynamické síly, listy proto musejí mít speciálně tvarovaný profil, téměř identický profilu křídel letadla. Se vzrůstající rychlostí vzdušného proudu rostou vzlakové síly s druhou mocninou rychlosti větru, a energie vyprodukovaná generátorem s třetí mocninou. Je proto třeba zajistit efektivní a rychle pracující regulaci výkonu rotoru tak, aby se zabránilo mechanickému a elektrickému přetížení větrné elektrárny. Obsluha větrné elektrárny je automatická. Životnost nové větrné elektrárny se udává 20 let od uvedení do provozu.

U vysokých rychlostí větru musí však být lopatky zastaveny, aby nedošlo k mechanickému poškození větrné elektrárny. Větrnou energii můžeme získat pouze v místech s dostatečnými přírodními podmínkami. [3, 4]



Obrázek 6: Ukázka větrné elektrárny [45]

1.1.4 Energie biomasy

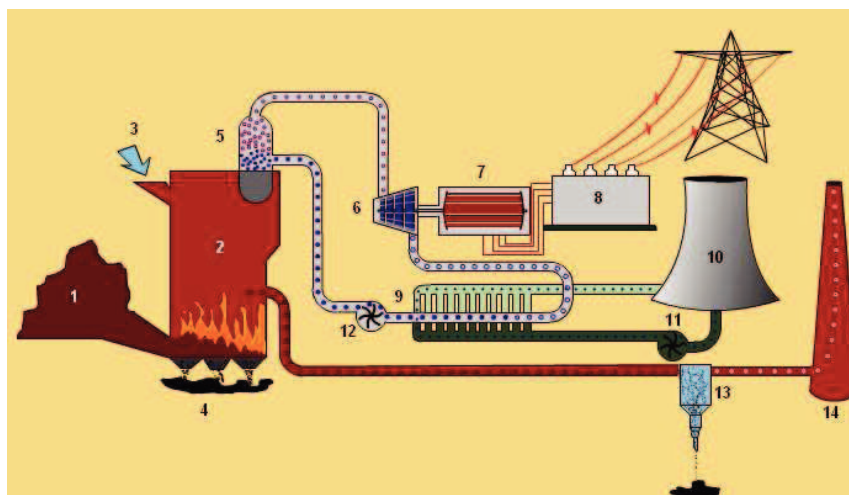
Biomasa je hmota organického původu. V energetice jde nejčastěji o dřevo, dřevní odpad, slámu, zbytky včetně exkrementů užitkových zvířat atd. Princip elektrárny na biomasu viz obrázek 7, je obdobný jako elektrárny tepelné.

Rozlišujeme biomasu "suchou" (např. dřevo) a "mokrou" (např. tekuté a pevné výkaly hospodářských zvířat promísené s vodou). Základní technologie zpracování se dělí na suché procesy - **termochemická přeměna** - spalování, zplyňování, pyrolýza a mokré - **biochemická přeměna** - zahrnují anaerobní vyhnívání (metanové kvašení), lihové kvašení a výrobu biovodíku. Zvláštní podskupinu tvoří lisování olejů a jejich úprava, což je v podstatě **mechanicko - chemická přeměna** (např. výroba bionafty a přírodních maziv). Energetické využití biomasy přispívá k náhradě ostatních druhů paliv.

V podmínkách České republiky přichází především v úvahu energetické využití následujících druhů biomasy:

- rychle rostoucí energetické plodiny
- řízené skládky pro využití bioplynu z odpadů (skládkový plyn)
- dřevní odpady
- sláma ze zemědělské produkce
- hnůj a chlévská mrva pro produkci a využití bioplynu

Nejvíce využívanou biomasou pro energetické účely jsou dřevní odpady. Mimo skutečnost, že se jedná o obnovitelný zdroj energie, je nutno dále upřednostnit i to, že energetické využití dřevní hmoty představuje palivo, které je bilančně neutrální s ohledem na emisi CO₂, z čehož vyplývá, že využití biomasy pro energetické účely se nepodílí nepříznivě na vytváření skleníkového jevu.[5]



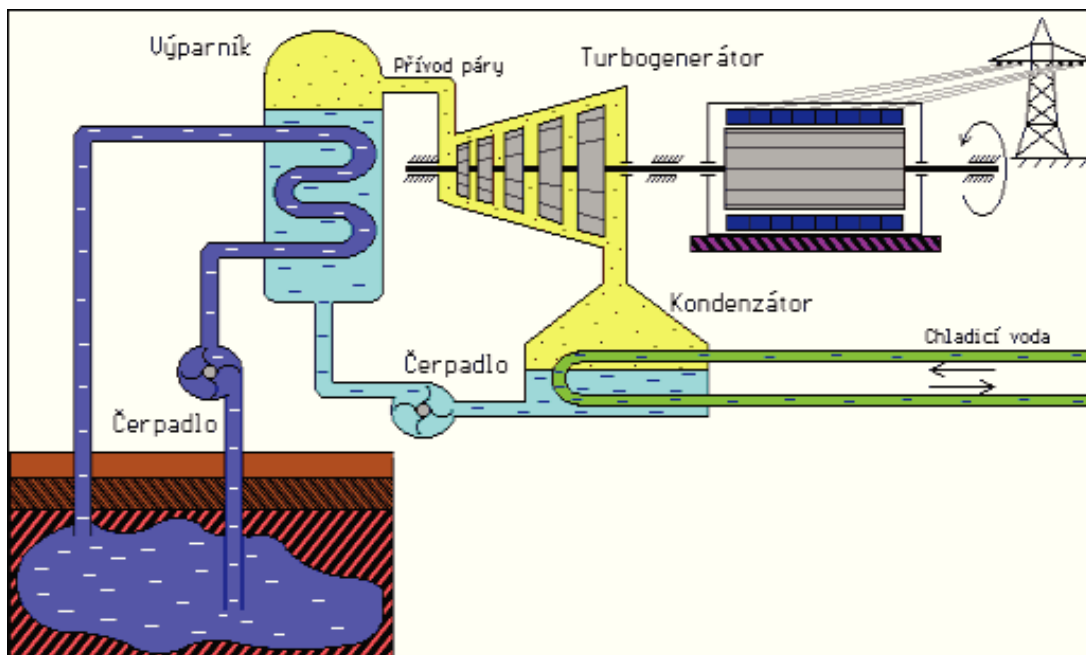
Obrázek 7: Elektrárna na biomasu [46]

1. biomasa; 2. kotel; 3. přístup vzduchu; 4. popel; 5. výparník; 6. turbína; 7. generátor; 8. TSF ;
9. kondenzátor; 10. chladičí věž; 11. a 12. oběhové čerpadlo; 13. odlučovač; 14. komín

1.1.5 Geotermální energie

Využívají k výrobě elektřiny tepelnou energii z nitra Země. Na některých místech je teplotní spád více než 55 °C na 1 km hloubky. Geotermální elektrárny na *obrázku 8* se staví zejména ve vulkanicky aktivních oblastech, kde využívají k pohonu turbín horkou páru, stoupající pod tlakem z gejzírů a horkých pramenů, nebo teplotnosné médium, které se vtlačuje do vrtů, v hloubi země se ohřívá a ohřáté jde na povrch.

Obecně lze ze zemských vrtů využívat nízko i vysokopotenciální teplou vodu. Celkový instalovaný výkon geotermálních elektráren ve světě se odhaduje kolem 8 - 10 GW. Na rozdíl od většiny jiných typů elektráren nepotřebují geotermální žádné palivo. Nevýhodou je dostupnost pouze na některých místech zemského povrchu. Ekonomicky je výstavba geotermální elektrárny 5x dražší než stavba jaderné elektrárny.[2]



Obrázek 8: Geotermální elektrárna [47]

1.1.6 Elektrárna OTEC využívající tepelnou energii moří a oceánů

Elektrárna OTEC na *obrázku 9* je obdobou geotermální elektrárny, kde se využívá teplotního rozdílu mezi vodou při hladině a vodou mořských hlubin. Systém pracuje tak, že teplá voda u povrchu hladiny ohřívá pracovní medium s nízkým bodem varu (amoniak). Plyn, který vzniká při této reakci, roztočí generátor a ten vyrábí energii elektrickou. Po předání energie se plyn ochladí studenou vodou a odvádí se zpět na hladinu. Účinnost se pohybuje cca 4 %. Výhodou je, že mohou pracovat stále, bez ohledu na přírodní podmínky.

Teplotního gradientu využívá pokusná malá elektrárna MINI OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) o instalovaném výkonu 50 kW. Nachází se u pobřeží Havajských ostrovů. Působením teplé mořské vody dochází ve výměníku tepla k odpařování amoniakových par, které pohánějí turbínu. Po průchodu turbínou páry opět kondenzují pomocí chladné hlubinné vody a cyklus se opakuje. Elektrárna MINI OTEC je instalována na palubě lodi, odkud je spuštěna v hloubce přes 60 m dlouhá hadice, pomocí níž se čerpá chladná voda potřebná ke kondenzaci par amoniaku.

Nedaleko této lodi je budováno jiné zařízení OTEC-2. Tato elektrárna, založená na stejné myšlence, je větší (instalovaný výkon 1 MW) a bude se podobat mořské bóji s teleskopickým potrubím dosahujícím do hloubky až 1km.[2]



Obrázek 9: Elektrárna OTEC [48]

1.2 Akumulace

Akumulace je proces umožňující “uskladnění energie” na vhodném místě, ve vhodné formě, aby byla připravena pro příští použití ve vhodný čas v požadované kvantitě i kvalitě. Akumulaci energie lze rozdělit do několika variant:

1. **Chemická nebo elektrochemická akumulace** – jde o akumulaci elektrické energie za pomoci chemické energie, tzn. v chemických bateriích nebo v akumulátorech. Akumulátory využívají přeměnu elektrické energie na chemickou, která může být v případě nutnosti přeměněna zpět na elektrickou.
2. **Mechanická akumulace** – jde o využití gravitační nebo kinetické energie v zařízeních umožňujících přeměnu své energie na vhodnější. V elektroenergetice se využívá u akumuláčnických vodních elektráren - mechanická akumulace nebo u přečerpávacích vodních elektráren - využívají přeměnu elektrické energie na potenciální, která se v případě potřeby mění zpět na elektrickou. Další formou mechanické akumulace jsou zásobníky stlačeného vzduchu. Kinetická akumulace energie využívá setrvačnicků.
3. **Elektromagnetická akumulace** – jde o akumulování energie za pomoci elektromagnetického pole kolem supravodivých vodičů.
4. **Tepelná akumulace** – jde o akumulaci energie formou tepla. Využívají se tepelné akumulátory, kterými jsou speciální zařízení, nebo součásti technologických celků (dlouhé teplovody), jež umožňují využít akumulované energie tepla k přeměně na jinou energii, nejčastěji elektrické.
5. **Kvantitativní akumulace** - zásoby pevných, kapalných nebo plyných paliv. Zde ale nelze hovořit přímo o akumulaci energie.

Akumulace elektrické energie je jedním z doposud nedořešených technických problémů. Nadále rostoucí nároky na její spotřebu souvisí s velmi rychlým nárůstem její ceny. Otázka výroby je důležitá také z hlediska produkovaných emisí. Řešením by mohlo být celosvětové snížení spotřeby elektrické energie, např. instalací spotřebičů s menší energetickou náročností nebo vydanou energií při rozběhu opět s určitou účinností získat zpět, tzv. akumuláčnickým systémem. Máme metody pro akumulaci energie přes energii elektrického, magnetického pole nebo elektrochemicky – akumulátor. Problémem tohoto způsobu ukládání je malá objemová a hmotnostní energetická hustota a dlouhá doba chemického procesu, která brání okamžitému pojmání poměrně velkého množství energie. I přesto, že došlo v poslední době k výraznému zlepšení těchto parametrů (Ni-MH, Li-Ion, Li-Pol akumulátory), stále je zde nevyřešený problém předání velké energie v krátkém intervalu a nízká účinnost

energetické přeměny. Možným řešením mohou být supravodivé magnetické akumulátory. Existují i další metody pro ukládání, které ji například uloží ve formě kinetické energie - setrvačnick. Tyto metody již používaly před II. světovou válkou Švýcarské dráhy. Zde dochází k uložení přes nutnou přeměnu energie z jedné formy do druhé, kde sehrává důležitou úlohu účinnost přeměny. Prvek, který splňuje požadavek vysoké energetické kapacity a účinnosti, je supekapacitor, který vznikl díky novým výrobním technologiím.

1.2.1 Akumulátory

Akumulátory mohou být:

a) Alkalické:

- nikl-kadmiové
- nikl-železné – vysoké samovybíjení
- nikl-zinkové
- stříbro-zinkové
- stříbro-kadmiové
- ...

b) Nealkalické:

- síra-sodíky
- brom-zinek
- ...

1.2.1.1 Ni-Cd (Nikl Kadmiové) akumulátory

Ni-Cd akumulátory byly vyvinuty k automobilovému využití, ale jsou využívány v elektronických zařízeních.

Vlastnosti:

- osvědčená spolehlivost za extrémních provozních stavů
- vysoká hustota energie na jednotku hmotnosti i objemu (100 Wh/dm³)
- dobrá tolerance na přebíjení i přepólování
- odolnost proti zvýšeným teplotám
- životnost je více než 500 cyklů nabití/vybití
- malé samovybíjení

Baterie jsou velmi citlivé na tzv. paměťový efekt. Vyznačuje se tím, že pokud dobíjíme zcela nevybitou baterii, klesá její kapacita. Cena baterií je vysoká kvůli recyklaci nebezpečných látek, které akumulátor obsahuje.[7, 8]

1.2.1.2 Ni-MH (Nikl Metal Hydridové) akumulátory

Ni-MH články se využívají ve spotřební elektronice i v elektromobilech.

Vlastnosti:

- vynikající objemová koncentrace energie, typicky 300 Wh/dm³.

- životnost je více než 500 cyklů nabití/vybití při 80 % DOD
- větší kapacita a výkon na jednotku hmotnosti i objemu než olovené akumulátory
- relativně vysoké samovybíjení až 30 % za období jednoho měsíce
- problematické určení stavu plného nabití (málo výrazný pokles napětí po dosažení plného nabití, tím se zvyšuje pravděpodobnost přebití, nadměrného vytváření tepla, špatně určené kapacity a kratší životnosti)

Cena akumulátorů je 10 – 12 krát větší než ekvivalentní olovený VRLA hlavně kvůli ceně slitiny titan-zirkon, a současná technologie výroby Ni-MH akumulátorů je složitá a drahá, recyklovatelnost je díky nepřítomnosti Cd levnější.

Řídicí metody nabíjení jsou tudíž komplexní a založené na následujících technikách:

- hlídání růstu teploty na konci nabíjení dT/dt
- detekce maximálního napětí
- hlídání poklesu napětí článku po dosažení maxima – dV/dt

Ni-MH baterie jsou dobrým kompromisem mezi výkonem, cenou a energetickou spotřebou pro dražší produkty např. přenosné počítače, bezdrátové spotřebiče,...[7, 8]

1.2.1.3 Olovené akumulátory

Olovené akumulátory jsou nejrozšířenější jako automobilové akumulátory 12 V, ale také v dopravě na podvozcích vagonů k akumulaci proudu z dynam, na lokomotivách mohou sloužit jako krátkodobý zdroj pohonu a také v elektromobilech.

Lze je rozdělit na dva základní typy:

- a) otevřené akumulátory se zaplavenou konstrukcí
- b) akumulátory bezúdržbové (VRLA) řízené ventilem

Další dělení může být podle typu elektrod

- a) akumulátory s elektrodami deskovými
- b) akumulátory s elektrodami trubkovými

Deskové olovené akumulátory se zaplavenou konstrukcí jsou cenově nejvýhodnější (50 EUR/kWh) na úkor hustoty energie na jednotku objemu (50 Wh/dm^3), životnost tohoto systému je 0,5 až 3 roky dle podmínek provozu. Díky ceně se tyto akumulátory používají v PV aplikacích pro domácí solární systémy. Díky malé životnosti však celkové náklady stoupají.

Trubkové olovené akumulátory se zaplavenou konstrukcí mají větší životnost – cca 8 let při 50 % DOD a jejich cena se pohybuje kolem 150 EUR/kWh. Využívají se u velkých, stacionárních PV aplikací se zaškolenou obsluhou (velké elektrárenské systémy na bázi PV, nebo hybridních systémů, venkovských elektrifikací, domácích aplikacích). Při jejich použití pro PV aplikace nastává jev, kdy

dochází k hromadění elektrolytu o vyšší koncentraci u dna nádoby s důsledkem postupné nevratné sulfatace (setrvání delší doby ve stavu i čistého vybití) elektrod akumulátoru a ukončení životnosti. Tomuto problému lze předejít nuceným pohybem elektrolytu speciálním míchacím zařízením, nebo upraveným dobíjecím režimem s úmyslným vývinem plynů při přebíjení. Základní problém akumulátorů se zaplavenou konstrukcí však spočívá ve vlastní konstrukci, která klade zvýšené nároky na obsluhu. Akumulátory nejsou bezúdržbové a vyžadují kontrolu stavu elektrolytu s doléváním destilované vody. [6]

1.2.1.4 Lithium-Iontové (Li-Ion)

Lithium - Iontová baterie se používá ve spotřební elektronice. Kvůli vysokému měrnému výkonu a energii (80 – 150 Wh/kg) se hodí pro přenosná zařízení. V současnosti je to v této oblasti asi nejvíce používaný typ.

Má vysokou účinnost 85 %, dobrou recyklovatelnost a nízkou hodnotu samovybití. Anoda je vyrobena z uhlíku, katoda je kovový oxid, a elektrolyt je lithiová sůl v organickém rozpouštědle. Má v sobě čip, který hlídá stav a kontroluje průběh nabíjení. Nevýhodou je vysoká cena a krátká životnost.[9, 10]

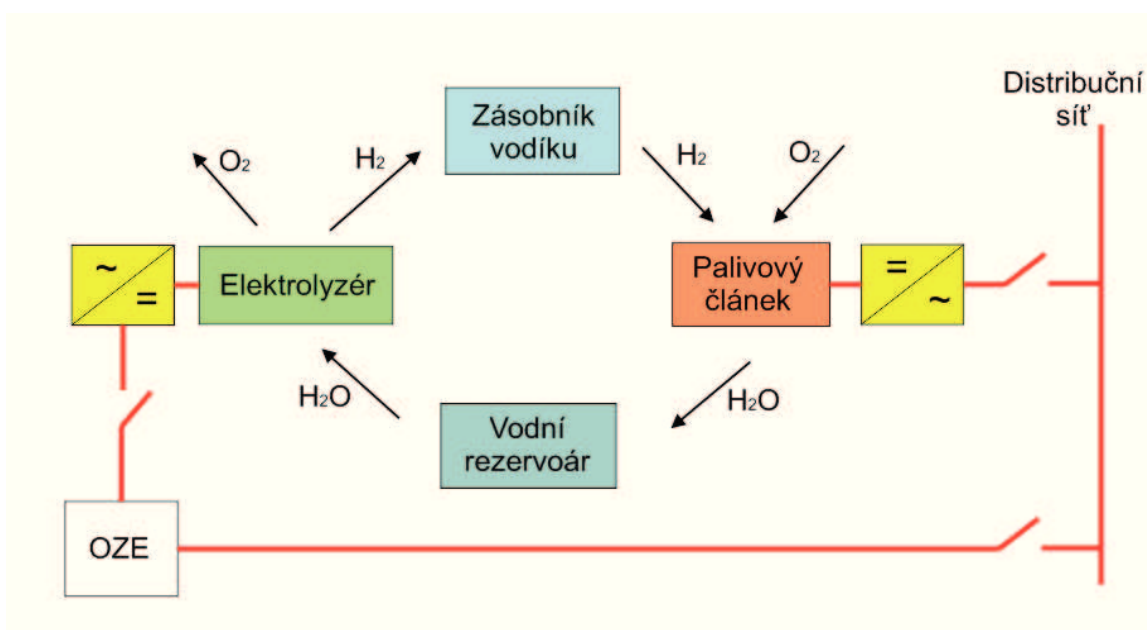
Srovnání zmíněných typů akumulátorů viz *tabulka 1*.

Tabulka 1: Srovnání vybraných typů akumulátorů [11]

Kritérium	Typ akumulátoru			
	Pb-PbO ₂	NiCd	NiMH	Li-Ion
Energie (Wh/kg)	30 ÷ 40	40 ÷ 60	60 ÷ 90	80 ÷ 150
Trvalý výkon (W/kg)	75	120	110	220
Špičkový výkon (W/kg)	700	200	1000	2000
Vybíjení za měsíc (%)	8	20	30	10
Životnost (cykly)	500	2000	1500	800
Účinnost (%)	70	80	80	85
Teplota (°C)	0 ÷ 45	0 ÷ 50	- 40 ÷ 50	- 40 ÷ 60

1.2.2 Akumulace do vodíku

Pro akumulaci el. energie pomocí vodíkových technologií a současně využívání výhod bezemisních obnovitelných zdrojů energie (OZE) je nutné vodík produkovat elektrolyzou vody. To znamená, že el. energie vyrobená v OZE se využije k výrobě vodíku z vody v elektrolyzáru, vždy v době nižšího zatížení ES. Vodík se uskladní v nádrži a v době zvýšeného zatížení ES se použije pro výrobu el. energie v palivovém článku, jehož dalšími odpadními produkty jsou voda a teplo. Schéma vodíkového akumulčního systému je na *obrázku 10*. [12]



Obrázek 10: Schéma vodíkového akumulčního systému [12]

Vodíkový akumulční cyklus má tři základní postupy:

- výroba** - elektrolyza vody probíhá v elektrolyzáru, který přeměňuje elektrickou energii na chemickou uměle vytvořeného paliva - vodíku.
- skladování** popř. transport vodíku
- výroba elektrické energie** - zpětný převod chemické energie vodíku na energii elektrickou, pomocí palivového článku

Hlavními částmi vodíkové akumulace jsou **elektrolyzáru** a **palivový článek**, které ovlivňují výsledné technické i ekonomické parametry vodíkového cyklu. Výkon jednotlivých prvků přímo souvisí s plochou elektrod, které se nejvíce podílejí na celkové ceně obou zařízení. Množství akumulované energie je závislé jen na velikosti zásobníku vodíku.

Pro skladování malého množství vodíku lze použít:

- jednoduché beztlakové plovákové zásobníky s vodním uzávěrem
- svařovací nádoby - využívají se pro skladování většího množství vodíku, mají skládané laminované stěny, tlak 103 MPa

- vnitřní stěna je z nerezové oceli, aby odolávala účinkům tlakového vodíku, a venkovní je z oceli, která je vhodná pro tyto tlaky
 - u nás je vodík běžně skladován a distribuován v tlakových nádobách při tlaku 20 až 35 MPa
 - při použití tlakových elektrolyzérů není potřeba kompresní zařízení, neboť ke stlačování plynu dochází přímo v elektrolyzáru
- c) využití podzemních zásobníků na skladování plynu
- při skladování zemního plynu se tento způsob už komerčně využívá
 - kapacity podzemních zásobníků dosahují hodnot až 10^8 m^3

Vodík lze za určitých podmínek zkapalnit, tím se mnohonásobně zvyšuje energetický obsah na jednotku objemu, na druhé straně jde o energeticky velmi náročný proces a na výrobu LH₂ (liquid H₂) je potřeba teoreticky $1,8 \text{ kWh.kg}^{-1} \text{ H}_2$. Malé zařízení s výkonem 2 tuny za den spotřebuje 25 kWh.kg^{-1} a velké s výkonem 10^3 tun za den 10 kWh.kg^{-1} . Tyto vysoké náklady jsou dané nízkou účinností Carnotova cyklu pro zkapalňovací proces.

Kapalný vodík se skladuje v kryogenních nádržích při teplotě $-253 \text{ }^\circ\text{C}$. Kapacita nádrže závisí na její konstrukci, pohybuje se od 100 m^3 až do několika milionů m^3 . Přes nízkou objemovou energetickou hustotu, má vodík nejvyšší poměr energie k hmotnosti ze všech paliv. Z plynů má nejnižší hustotu a druhý nejnižší bod varu ze všech známých látek. Může být skladován jako plyn při vysokých tlacích, jako kapalina v kryogenních zásobnících nebo jako plyn chemicky vázaný (např. v metalhydridech).

Systémy skladování v metalhydridech jsou založeny na principu snadné absorpce plynu určitými materiály za podmínek vysokého tlaku a mírných teplot. Tyto látky pak uvolňují vodík jako plyn v případě, kdy jsou zahřívány při nízkých tlacích a relativně vysokých teplotách. Přibližně lze uvést, že 1 cm^3 kovového hydridu absorbuje asi 1 litr vodíku v plynném stavu, což odpovídá chemickému tlaku okolo 100 MPa. Vázání vodíku je exotermická reakce, takže při plnění zásobníku se teplo uvolňuje a náplň se musí chladit. Naopak při vyprazdňování zásobníku je potřeba náplň zahřát nebo uvolnit tlak v nádrži. [12, 13]

1.2.2.1 Elektrolyzéry

V elektrolyzáru dochází k procesu rozkladu demineralizované vody tzv. elektrolýze. Jde o děj kdy je vodík získáván z vody. Pokud dodavatelem energie pro elektrolýzu je obnovitelný zdroj energie buď solární energie, jako tomu je v laboratoři palivových článků VŠB – TU Ostrava, nebo větrné energie, nedochází během tohoto výrobního procesu ke vzniku zplodin (např. CO₂, SO₂, NO_x,...), není třeba jako vstupu fosilního paliva a dochází k produkci vysoce čistého vodíku.

Elektrolyzáru je série článků s kladnou a zápornou elektrodou. Ty jsou ponořeny do vody, která má v sobě přísadu elektrolytu často KOH (alkalický hydroxid draselný KOH) pro zvýšení vodivosti.

Velmi perspektivně se jeví polymerní elektrolyt, tvořený iontoměničovou membránou. Pórovité elektrodové vrstvy jsou nanášeny na obě strany membrány, průchod proudu je zajištěn pomocí iontu H₃O⁺ u katodové nebo OH⁻ u anodové. Tloušťka membrán je při tom menší než 1 mm.

Elektrochemické reakce na elektrodách můžeme vyjádřit rovnicemi pro

katodu $4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- = 2\text{H}_2 + 4\text{OH}^-$

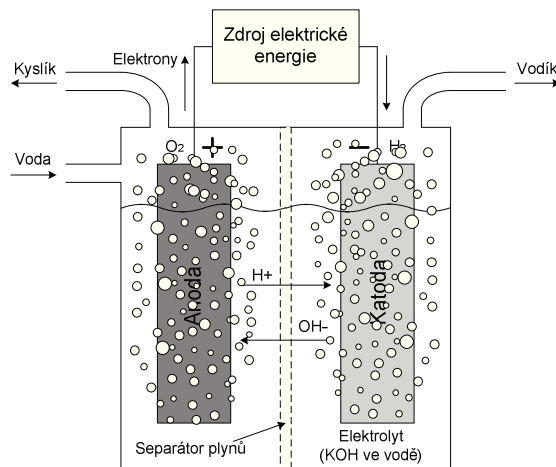
anodu $4\text{OH}^- = \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} - 4\text{e}^-$

Celková reakce při elektrolýze je rozklad vody na její složky: $2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$

Záporná elektroda bývá tvořena niklem potaženým platinou jako katalyzátorem, který způsobuje spojení atomárního vodíku do molekul H_2 na povrchu elektrody a tím narůstá produkce vodíku. Pokud by nebyl na katodě katalyzátor, došlo by ke hromadění atomárního vodíku na elektrodě a tudíž k blokadě průchodu proudem.

Kladnou elektrodu tvoří nejčastěji měď a nikl. Povrch je pokryt oxidy manganu, ruthenia, nebo wolframu. Tyto kovy způsobují spojení atomárního kyslíku do molekul O_2 . K oddělení těchto dvou částí během volného průchodu iontů slouží v elektrolyzátoru membrána, na bázi azbestu odolná teplotám $>80\text{ }^\circ\text{C}$, aby nedocházelo k vzájemnému promísení kyslíku a vodíku. Funkce elektrolyzátoru je zjednodušeně znázorněna na obrázku 11.

Možnou kompenzací úspory elektrické energie může být energie tepelná, kterou do reakce dodáme. Je to výhodné hlavně kvůli tomu, že tepelná energie je levnější než elektrická a také, že s rostoucí teplotou roste i účinnost elektrolýzy. Pro reakci je minimální napětí 1,228 V při $25\text{ }^\circ\text{C}$ (298 K), ale tepelná energie není dostačující, a proto musí být dodána z okolí, jinak by zisk z výroby měl nulovou hodnotu. Zvýšením hodnoty napětí na 1,47 V při stejné teplotě $25\text{ }^\circ\text{C}$ (298 K) dochází ke zvýšení teploty v reakci, a není již potřeba další tepelnou energii dodávat. Kdyby hodnota napětí měla ještě vyšší hodnotu, přebytečná tepelná energie by se odváděla do okolí. [12, 38]



Obrázek 11: Funkce elektrolyzátoru [12]

1.2.2.2 Palivové články

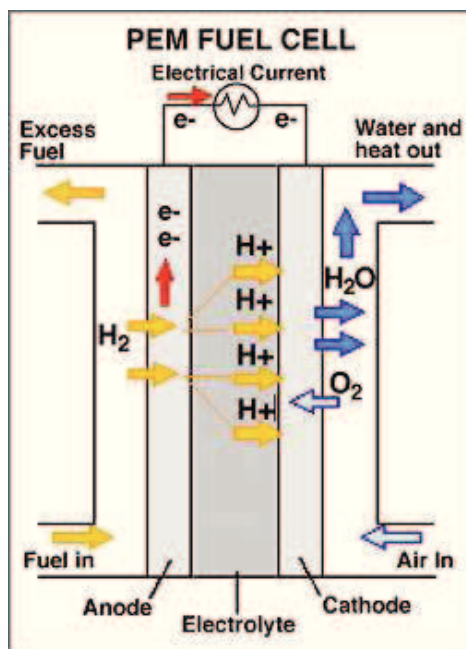
Palivový článek je elektrochemickým zařízením sloužícím k přeměně chemické energie vodíku na energii elektrickou za pomoci řízené elektrochemické reakce zvané „studené spalování“. V palivovém článku, při generování elektrického proudu, dochází ke katalytickým reakcím na elektrodách. Jako vedlejší produkt tohoto procesu je vzniklé teplo a voda. Kontinuálně musí být do procesu přeměny na elektrody přiváděno nejen palivo, ale i okysličovadlo a musí být odváděny spaliny. Můžeme říct, že jde o opačný proces, než při elektrolýze vody. Účinnost výroby elektrické energie se pohybuje až k 60 %

v laboratořích, nicméně v praxi 35 až 50 % v závislosti na typu palivového článku a jeho zatížení. Nižší účinnost může být dána přímou přeměnou energie vodíku na energii elektrickou bez mezistupně (tepelná a mechanická).

Vývoj palivových článků postupuje dále. V současné době máme několik druhů, které můžeme rozdělit na nízkoteplotní PEM FC s protonovými membránami, PAFC na bázi kyseliny fosforečné a vysokoteplotní MCFC na bázi tekutých uhličitánů, SOFC na bázi pevných oxidů, popřípadě středoteplotní SOFC s pevným elektrolytem. Palivové články se liší v palivu, složení elektrolytu a provozní teplotě. Kvůli odlišnému způsobu provozu mají také různá uplatnění (zdroje k tepelné a elektrické energii v budovách, záložní zdroje, atd.)

Princip palivového článku můžeme vysvětlit na technologii PEM FC, viz *obrázek 12*, která se používá v laboratoři palivových článků VŠB – TU Ostrava. Jde o technologii s polymerní membránou. Článek je složen ze dvou elektrod (anoda a katoda), které mají na svém povrchu vrstvu hliníku s nízkým obsahem platiny jako katalyzátoru. Oddělení elektrod je provedeno již zmiňovanou polymerní membránou. Tato membrána slouží k propouštění kladných iontů – vodíkové protony, které jsou přitahovány kyslíkovými ionty na straně katody. Na anodu palivového článku je přivedena molekula vodíku H_2 a na katodu molekula kyslíku O_2 . Při dotyku molekul vodíku H_2 s katalyzátorem dojde k reakci na povrchu protonové membrány, kdy se vodík rozloží na atomy H a následně se štěpí na H^+ a e^- . Elektrony procházejí vnější elektrickou zátěží a jsou přijímány na katodě atomy kyslíku za vzniku iontu O^{2-} , které vznikly štěpením molekul kyslíku O_2 na platinovém katalyzátoru. [12, 14]

Chemické reakce na anodě a katodě jednotlivých palivových článků jsou v *tabulce č. 2* a přehled dle pracovní teploty, palivového plynu a oksyličovadla palivových článků je uveden v *tabulce č. 3*.



Obrázek 12: Funkce palivového článku [49]

Tabulka 2: Přehled elektrochemických reakcí na palivových článcích [14]

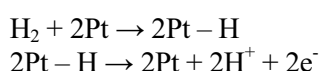
	Reakce na anodě	Reakce na katodě
PEMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
PAFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4 O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$

Tabulka 3: Charakteristiky jednotlivých typů palivových článků [14]

	Provozní teplota (°C)	Palivo	Okysličovadlo
PEMFC	50 ÷ 100	H ₂ , methanol ²	O ₂ ze vzduchu
PAFC	150 ÷ 220	H ₂ , zemní plyn ²	O ₂ ze vzduchu
MCFC	500 ÷ 700	H ₂ , CO, zemní plyn ³	O ₂ ze vzduchu
SOFC	600 ÷ 1000	H ₂ , CO, zemní plyn ³	O ₂ ze vzduchu

Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)

PEM FC jsou na bázi polymerní elektrolytické membrány. Tato membrána umožňuje zjednodušení těsnění chemického procesu, zvýšení účinnosti článku a snížení koroze. Mají vysokou proudovou vodivost, díky které se snižuje jejich hmotnost i velikost. Elektrolyt, kterým je perfluorovaný polymer kyseliny sulfonové (Nafion), umožní vést protony H⁺ od anody ke katodě a elektrony se dostávají ke katodě vnějším elektrickým obvodem. Elektrolyt se nachází mezi elektrodami, které mají v sobě platinu sloužící jako katalyzátor, který na sebe váže atomy vodíku z molekulárního vodíku a uvolní je v podobě H⁺ a e⁻



Platina se na elektrodách používá díky odolnosti vůči rozpuštění při výskytu síry. Na druhé straně elektrody se nachází vrstva teflonu, která zajišťuje odolnost vůči vodě. Pracovní teplota je mezi 50 až 100 °C s tlakem 1 až 2 bary, což zvyšuje jejich bezpečnost. [14]

Výhody:

- pracují s nízkými teplotami → rychlý start a vyšší bezpečnost PČ
- snášejí vysoký obsah oxidu uhličitého v palivu i okysličovadlu
- mechanická odolnost a konstrukční jednoduchost

Nevýhody:

- citlivé na oxid uhelnatý
- vyžadují zvlhčení reakčního plynu → energetická náročnost a větší rozměry systému → omezení provozní teploty → výrazná redukce potenciálu využitelného v kogeneraci

- drahé platinové katalyzátory membrány
- jsou citlivé na obsah CO a sloučenin síry v palivu

Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)

PAFC jsou na bázi kyseliny fosforečné a elektrolytem jsou vedeny vodíkové ionty H^+ od anody ke katodě. Provozní teplota je 150 – 220 °C s tlakem 1 bar. U nižších teplot má kyselina fosforečná H_3PO_4 horší protonovou vodivost a problém s CO, jako katalytického jedu pro Pt, se stává významnějším. Kyselina fosforečná je stabilnější než ostatní běžné kyseliny, a proto dokáže pracovat v širším rozsahu teplot. Navíc použití 100 % kyseliny minimalizuje parciální tlak vodních par, takže udržet správný vodní režim není složité.[14]

Výhody:

- stálá charakteristika elektrolytu
- nízká provozní teplota

Nevýhody:

- umožňují produktové vodě vstupovat a zředovat děj
- velká velikost a váha

Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

MCFC jsou na bázi tekutých uhličitánů s elektrolytem, který vede ionty (CO_3^{2-}) opačným směrem, než je tomu ve většině nízkoteplotních palivových článků, tedy z katody na anodu. Provozní teplotou je u MCFC 500 °C - 700 °C, kdy dosahuje vysoké vodivosti díky roztavené soli, kterou v rozmezí uvedených teplot produkuje.

Elektrolyt se skládá z uhličitanu lithia Li_2CO_3 a draselného K_2CO_3 . Směs uhličitánů se udržuje v krystalické mřížce z hlinitanu lithia $LiAlO_2$ za pomoci kapilárních sil. Anoda je tvořena slitinami niklu, nejčastěji Cr a Al, a katoda oxidy niklu NiO s příměsí Li, a díky vysokým teplotám se nemusí používat katalyzátory. Tlaky článků jsou 1 až 10 bar a jejich konstrukce je desková. [14]

Výhody:

- výroba vysokopotenciálního tepla
- vysoká rychlost a účinnost reakce

Nevýhody:

- tekutý elektrolyt
- dlouhý rozběh

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

SOFC jsou na bázi pevných oxidů, tedy jeho elektrolyt je pevný, neporézní kovový oxid, používá se Y_2O_3 stabilizovaný ZrO_2 . Pracovní teplota je 600 - 1000 °C, vodivost umožňují kyslíkové

anionty. Anoda je z Co-ZrO₂ nebo Ni-ZrO₂ a katoda LaMnO₃ dopovaná stronciem. Hlavně díky pevnému elektrolytu je systém zjednodušen a dochází k výskytu pouze dvou fází a to kapalně a plynně. [14]

Výhody:

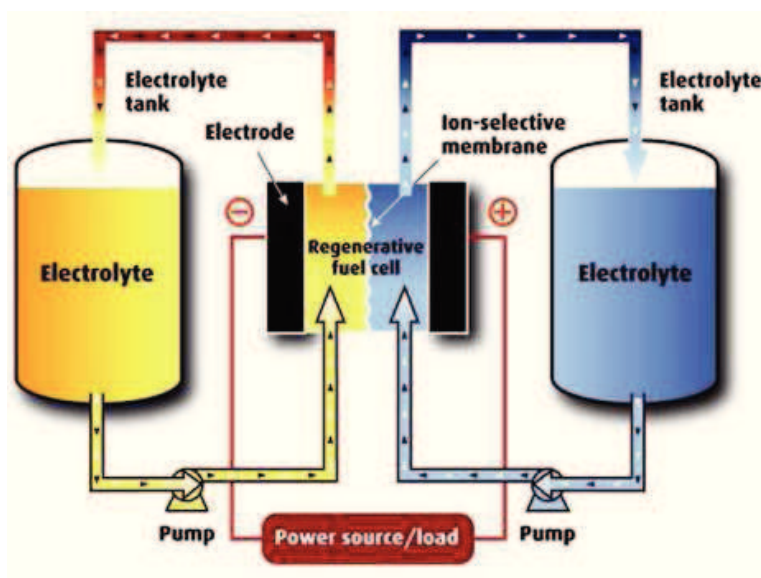
- dobře pracují s vlhkými a suchými palivy
- pevný elektrolyt
- nepotřebují katalyzátor

Nevýhody:

- nízká vspělost technologie
- citlivost na obsah síry

1.2.3 Průtokové baterie

Průtoková (flow) baterie je typem, která může být velmi flexibilní a je určena pro aplikace vyžadující velký výkon a kapacitu skladování elektrické energie. Princip je zobrazen na *obrázku 13*. Dochází zde k chemické reakci mezi dvěma elektrolyty, které jsou uloženy v oddělených zásobnících. Během provozu se elektrolyty čerpají přes elektro - chemický reaktor, ve kterém probíhá reakce a výroba elektřiny. Vzhledem ke skladování elektrolytu mimo reaktor, jsou kationy na baterii flexibilní, sílu a obsah energie může systém specifikovat samostatně. Množství elektrolytu je možné snadno měnit. Kromě toho může být výkon článku optimalizován na potřebný výkon, protože je nezávislý na množství použitého elektrolytu. Takže jejich výkon je dán konstrukcí zásobníků, kde dochází ke vratné chemické reakci.[15, 16]



Obrázek 13: Schéma průtokové baterie [17]

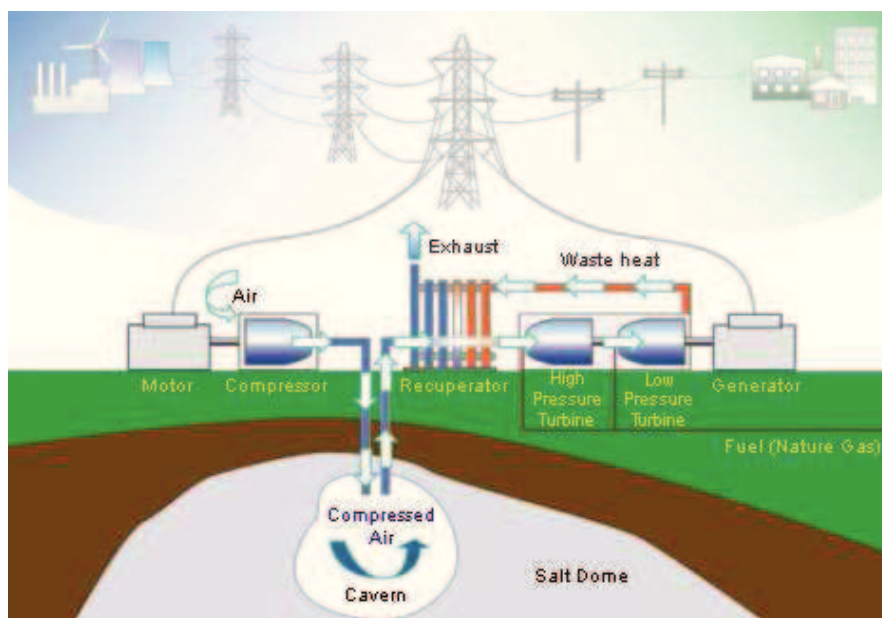
Jádro tvoří reverzibilní redukčně - oxidační článek, v němž dochází k přeměně elektrické energie na chemickou, která se váže v elektrolytu. U průtokových baterií se kontinuálně mění elektrolyt a je tedy zajištěna stálá výměna elektrolytu, dokud nedojde k jeho vyčerpání. Můžeme říct, že elektrolyt v nabitěm stavu během cirkulace, má jenom nepatrné samovybíjení, a pokud se jeho uskladnění nachází mimo článek, nedochází k samovybíjení prakticky vůbec. Cirkulace probíhá ve dvou oddělených okruzích vlastního článku, mezi nimiž se nachází membrána.

Velikost akumulací kapacity je závislá na množství elektrolytu v zásobnících. Uváděná energetická objemová hustota nejvyššího vybíjecího/nabíjecího cyklu je $15 \div 25 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ (ideálně dosažitelná hodnota činí $28 \text{ až } 43 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$). Měrná hustota elektrolytu se udává 1,4. 90 % hmotnosti kompletního zařízení je elektrolyt. Zařízení dokáže svoji kapacitu a účinnost udržet prakticky při více jak 12 000 nabíjecích cyklech a životnost „nejslabšího“ článku v systému, tedy membrány, se odhaduje na cca 15 let. [12, 16]

1.2.4 CAES (Compressed Air Energy Storage) systémy

Systém pracuje na principu stlačeného vzduchu, kdy turbína postupně dodává potřebnou energii ze zásobníku vzduchu a doplňuje tak energii pro špičky odběru elektrické energie. Srdcem CAES systému je špičková plynová turbínová elektrárna se spotřebou plynu menší než 40%, ve srovnání s obvyklými plynovými turbínami k výrobě srovnatelného množství elektrické energie. To je nutné z důvodu, že 2/3 vstupního paliva spotřebuje ke kompresi vzduchu. CAES vzduch stlačí mimo špičku a následně v době potřeby tuto energii generuje zpět na elektrickou energii. Zásoby stlačeného vzduchu jsou uskladněny ve vhodných podzemních jeskyních, dolech, ... viz obrázek 14.

Ve světě je komerčních jednotek CAES (s výkonem do 300 MW) zatím málo. Největší (2700 MW) je naplánovaná v USA (Norton, Ohio). V závodu má být 9 jednotek, které budou vzduch stlačovat na 10,42 MPa (102 atm.) v 670 m hlubokém vápencovém dole s účinností kolem 55 % (bez využití tepla vzniklého při kompresi a při pohonu generátoru stlačeným vzduchem se zemním plynem).[12]

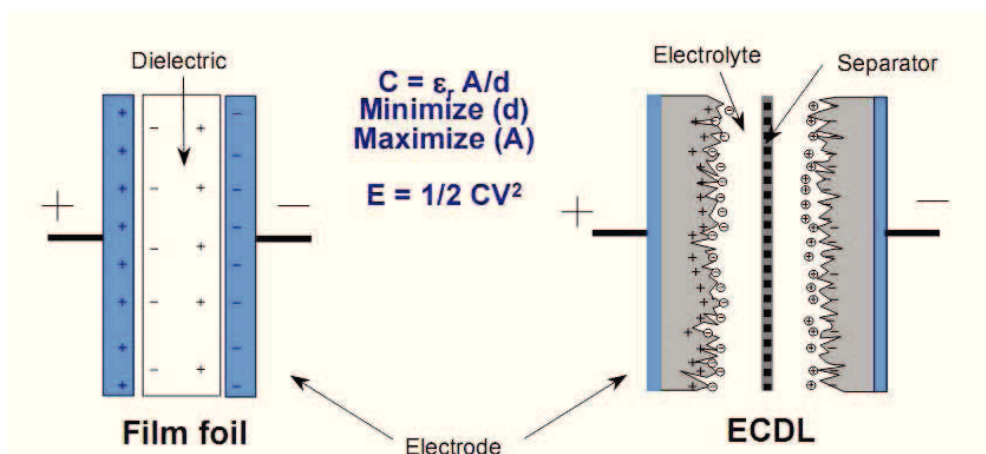


Obrázek 14: CAES systém [17]

1.2.5 Superkapacity

Princip funkce

Superkapacitor je elektrolytický kondenzátor vyrobený speciální technologií, která umožňuje dosažení velké kapacity řádu až 100 - 1000 F. Technologie je založena na tzv. elektrochemické dvouvrstvě, proto se superkapacity označují také zkratkou EDLC (Electrochemic Double Layer Capacitor). Srovnání běžného akumulátoru a superkapacitoru je na *obrázku 15*. Energie je v superkapacitoru uložena elektrostaticky, stejně jako u klasického kondenzátoru. Po přivedení vnějšího napětí dochází k přesunu kladných iontů v elektrolytu směrem k záporné elektrodě a záporných iontů ke kladné elektrodě. Životnost je definována poklesem kapacity na 80% jmenovité hodnoty nebo zvýšením odporu na dvojnásobek jmenovité hodnoty. Množství cyklů kolísá mezi $0,5 \cdot 10^6$ až $1 \cdot 10^6$. [12]



Obrázek 15: Struktura běžného kondenzátoru (vlevo) a superkondenzátoru (vpravo)

Jednou z nejdůležitějších částí je vrstva aktivního uhlíku nanosená na vnitřní stranu hliníkových elektrod, které tvoří hliníková fólie. Aktivní uhlík ve formě prášku je tvořen velmi malými částicemi, které v celém objemu vytvářejí velmi pórovitý povrch, s velkou plochou. Výrobci uvádí hodnotu až 2000 m² na jeden gram prášku. Aktivní uhlík tvoří pevný materiál s nízkou hustotou, vzniklý nahrazením tekuté složky gelu vzduchem (uhlíkový aerogel). Dalším používaným materiálem jsou uhlíkové polymery. Materiálem budoucnosti jsou uhlíkové nanotrubičky, které velmi zvyšují povrch částic. Elektrody kondenzátoru dělí separátor (polypropylenová fólie) a jsou obklopeny tekutým nebo gelovým elektrolytem. Tloušťka dielektrika je velmi malá, řádově 10⁻¹¹ m. Díky kombinaci velké plochy a velmi tenké dvouvrstvě se dosahuje velké schopnosti vázat náboj a tedy vysoké kapacity superkondenzátoru při malém sériovém odporu. Určitou nevýhodou, vzhledem k vlastnostem elektrolytu a možnému průrazu elektrické dvouvrstvy, je nízké provozní napětí, jehož hodnota se pohybuje v rozmezí 2,3 – 2,7 V v případě velmi používaného organického elektrolytu. Na větší napětí je nutné řadit superkondenzátory do série, což vyžaduje použití ochranných balančních obvodů. Energie superkapacitorem je závislá na počátečním a koncovém napětí. [18]

1.2.6 Setrvačníky

Setrvačnick je historicky prvním akumulátorem energie. Jeho princip spočívá v roztočení kotouče s poměrně velkou hmotností. Po odpojení od vnějšího zdroje energie kotouč setrvačností dále rotuje a stává se tak sám zdrojem naakumulované kinetické energie. Skládá se z hřídele, na něj je rotor setrvačnicku a elektrického stroje, dohromady vytváří rotující hmotu, díky které ukládáme energii a přetváříme z elektrické na kinetickou a naopak. Setrvačnick je na *obrázku 16*.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (J; kg \cdot m^2; rad \cdot s^{-1}) \quad (1)$$

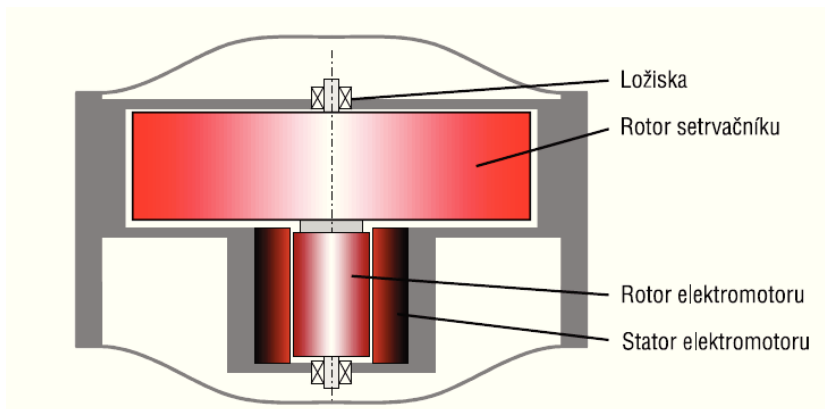
J.....moment setrvačnosti tělesa vzhledem k ose otáčení

ωúhlová rychlost, se kterou se těleso otáčí

$$J = \frac{1}{2} \cdot r^2 \cdot m \quad (kg \cdot m^2; m; kg) \quad (2)$$

r.....poloměr tělesa setrvačnicku

m.....hmotnost setrvačnicku



Obrázek 16: Setrvačnick [18]

Když je elektrická energie přeměněna na kinetickou, je elektrický stroj v režimu elektromotoru (akumulace brzděné energie). Až rekuperovaná energie nestačí na další urychlení setrvačnicku, je elektromotor odpojen. V případě potřeby se akumulovaná energie mění zpět na elektrickou – elektrický stroj je v režimu generátoru.

Vysoké otáčky i u lehčích setrvačnicků mají spoustu energie. Nejběžnějšími nízkootáčkovými (zhruba do 8 000 ot/min) jsou s ocelovým rotorem. Nové technologie v oblasti kompozitních materiálů umožnily vývoj lehčích vysokootáčkových setrvačnicků (100 000 ot/min). Tření omezuje rychlost rotoru, proto se točí ve vakuu a jsou magneticky nadnášeny, jeho součástí jsou i permanentní magnety, které rotor roztáčejí nebo umožňují brzdění a generují proud v cívkách. Jako vospělou aplikaci možno uvést nasazení v kosmu, kde setrvačnick kromě akumulace energie ze slunečnick kolektorů plní i funkci prostorové stabilizace tělesa v beztížném stavu.

Některé setrvačníky dokáží po dobu 30 s dodávat výkon. Na dosažení delší doby skladování na vysoké hladiny výkonu je nutno jejich parametry změnit. Moderní setrvačnickové systémy akumulace obsahují masivní rotační válce, které se nachází na vnějším okraji a zvyšují moment setrvačnosti a maximalizují množství uložené energie. Takové setrvačníky lze provozovat ve vakuu a mohou být na magneticky levitujících ložiskách. Mají maximální rychlost otáčení 60 000 ot/min. Skutečná dodaná energie závisí na rozsahu otáček setrvačníku. V současné době jsou vysokorychlostní setrvačníky se jmenovitým výkonem 1 MW (15 minut) [6, 12, 19]

1.2.7 Supravodivé magnetické akumulátory energie

Supravodivé magnetické akumulátory energie dovolují rychle absorbovat a vydávat energii bez omezení a ztrát. U tohoto akumulátoru, označovaného jako SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), je energie akumulována v magnetickém poli cívky protékané proudem, která je uložena v kryostatu.

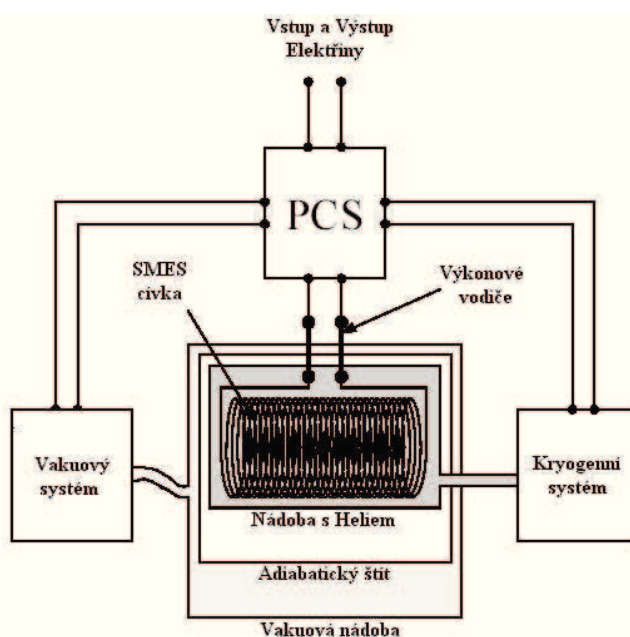
Cívka je zhotovena ze supravodivého vodiče, takže v ní nedochází k žádným odporovým ztrátám. Jde tedy o velmi výkonný způsob akumulace el. energie. Energetické ztráty však vznikají při chodu chladicí jednotky, která udržuje cívku pod kritickou teplotou supravodiče.

Systém SMES umožňuje uskladňovat až tisíce MWh (jeden z prvních návrhů byl cca 5 GW) a dá se tak využít pro vyrovnávání špiček spotřeby el. energie. Vlastní supravodivou cívku může být, v závislosti na rozměrech a použití, solenoid nebo toroid. Hlavní výhodou solenoidu je nižší cena pro velké SMES systémy (více jak 5 MWh), protože pro stejné množství akumulované energie v toroidu je potřeba většího množství supravodivého vodiče. Cívky solenoidu jdou také snadno vyrábět.

Hlavní nevýhodou solenoidu je nehomogenita magnetického pole na koncích cívky, která je eliminována v toroidu.

Z důvodu nutného chlazení na podkritické teploty je tento systém akumulace ovšem příliš nákladný ve srovnání s jinými technologiemi. V současné době jsou systémy navrhovány ve více stupních, s určitým plánem řízení jednotek. Blokové schéma je na *obrázku 17*.

Vstupující a odebíraná elektřina prochází systémem stavu energie (PCS), který je napojen na supravodivou cívku, uvnitř nádoby s heliem, přes výkonové vypínače. Kryogenní okruh zajišťuje chlazení důležité k udržení chladiva (zpravidla tekuté hélium) a tím i supravodivé cívky na požadované teplotě. Podle použití může být oddělen zdroj energie pro obslužné systémy z důvodu prodloužení doby funkčnosti zařízení a tím i doby překlenutí výpadku energie. [20]

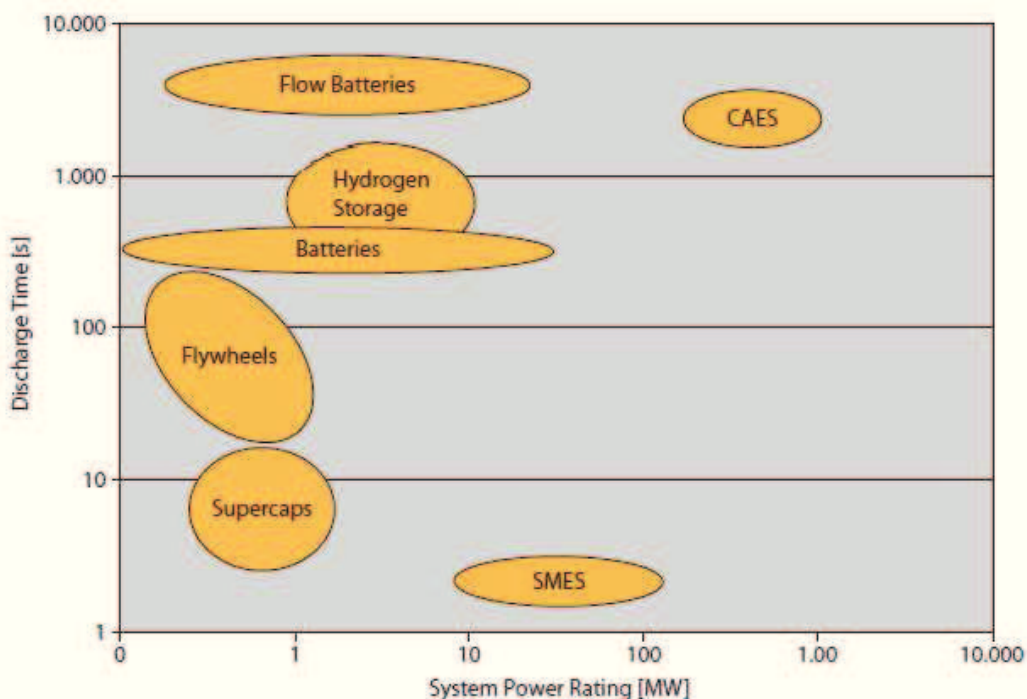


Obrázek 17: Blokové schéma SMES [20]

2 Alternativní posouzení jednotlivých systémů akumulace

Akumulace el. energie je důležitá zejména v podmínkách masivního vstupu neregulovatelných obnovitelných zdrojů do ES. Existuje několik systémů pro akumulaci elektrické energie, ale všechny mají různá omezení. Akumulační systémy pro elektrickou energii lze rozdělit z dvou hledisek, na akumulaci krátkodobou a dlouhodobou. Akumulační výkony jednotlivých systémů jsou zakresleny do obrázku 18.

- krátkodobé akumulátory umožňují zajistit vysoké nabíjecí a vybíjecí výkony pro krátkou dobu (supravodivé magnetické akumulátory, setrvačníky a superkapacitory); akumulační kapacita je malá
- dlouhodobé akumulátory mají velkou akumulační kapacitu (MWh), schopnou akumulovat a předávat elektrickou energii po dobu více hodin (chemické akumulátory, průtokové (flow) baterie, vodíkové systémy a systémy CAES)
- další možností dlouhodobé regulace jsou PVE, které jsou jenom prvním nárazovým stupněm rozpadu systému, kvůli jejich velkým investičním nákladům nebudou dále v práci zmiňovány



Obrázek 18: Srovnání typů skladování elektrické energie [15]

a) Akumulátory

- slouží k opakovanému uchovávání energie
- jde o zařízení, do kterého je nutné energii vložit a teprve potom energii čerpat
- využívají se v dopravě, ve spotřební elektrotechnice a jako autobaterie
- široké spektrum výběru se společnou nevýhodou, kterou je samovybití, jehož velikost se liší druhem akumulátoru, největší samovybití mají Ni-MH a nemění Ni-Cd akumulátory
- životnost závisí od množství cyklů nabíjení a vybití.

b) Akumulace do vodíku

Akumulace do vodíku může být využívána ve spojení s větrnou nebo solární elektrárnou. Je v budoucnosti nadějná a již technicky k dispozici elektrolyzou:

- přeměňuje elektrickou energii na chemickou a to vratně za pomoci palivového článku
- nevýhodou tohoto procesu je nutnost dodání množství určité energie a hlavně spotřebovaná voda, na kterou je vodík vázán

System má několik postupů:

- výroba vodíku
- uskladnění vodíku
- transport

Hlavními částmi vodíkového systému jsou napájecí zařízení, elektrolyzér a palivový článek, jež velmi ovlivňují účinnost výroby vodíku a přeměny na elektrickou energii. Palivový článek je vhodnou technologií pro akumulaci elektrické energie získané z OZE, bezpečným a technologicky velmi vyspělým zařízením s vysokou cenou, nízkou životností a účinností v rozmezí 35 – 60%.

c) Průtokové (flow) baterie

- náklady na systém baterií můžeme rozdělit na elektrochemickém reaktoru a elektrolytů se skladovacími nádržemi, nicméně to není efektivní na reaktor, proto se náklady na kWh uložené nebo dodané do systému budou snižovat
- skladovací kapacita závisí pouze na velikosti nádrže elektrolytu, což není omezení a díky tomu mají slibnou budoucnost v technologii velkého měřítka pro skladování elektrické energie
- mají nízkou úroveň samovybití a velkou životnost

d) CAES systémy

- výstavba je závislá na technických, ale i geologických podmínkách s náročnou realizací
- dutiny v podzemí, které jsou např. k uskladnění zemního plynu, mohou být v budoucnu použity k výstavbě těchto systémů
- k naplnění akumulacího prostoru využívají přebytečnou (levnou) energii mimo špičku DDZ

e) Superkapacitory

- jsou vhodné k pokrytí velké spotřeby na krátkou dobu

- umožňují dodat energii pro akceleraci a naopak umožňují rekuperaci
- jsou „střední cestou“ mezi klasickým kondenzátorem a elektrochemickým akumulátorem
- hlavní oblast využití je doprava nebo zapojení ve větrné elektrárně, kde vyrovnává kolísání výkonu
- výhodou je nízká hodnota vnitřního odporu a rychlé nabíjení/vybíjení

f) Setrvačnick

- jde o elektromechanický systém akumulování, založený na principu kinetické energie
- v energetice se široce používají například pro plynulý doběh napájecích čerpadel při výpadku elektrického napájení
- moderní typy setrvačnick představují lehké a menší čočkovité kotouče z vyztužených plastů, které ve speciálních ložiskách a ve vakuové nebo heliem plněné skříní rotují až $1 \cdot 10^4$ ot/min
- v průmyslu se využívají pro překonání krátkodobých výpadků sítě nebezpečných pro řídicí a počítačové systémy
- vstupní a výstupní výkon je limitován typem motor/generátor a výkonovou elektronikou
- rotující setrvačnick postupně ztrácí naakumulovanou energii (odpor ložisek, aerodynamika), tomu lze předejít inertním plynem, odčerpáním atmosféry ze setrvačnicku nebo elektromagnetickými ložisky

g) Supravodivé magnetické akumulátory energie

- supravodivé akumulátory energie jsou určeny především k překonávání špiček odběru elektřiny, dodání elektřiny v případě výpadku některých zdrojů a zlepšení kvality dodávané energie.

Výhody

- efektivnost akumulace energie > 95 %
- krátký čas reakce na výkyvy v připojené síti (milisekundy)
- krátké časy celkového nabití a vybití (1-2 sekundy)
- miliony cyklů nabití - vybití a dosahované vysoké proudové hustoty

Nevýhody

- je požadavek na kryogenní (velmi nízké teploty v prostoru naplněném heliem) systém a problémy s ním spojené
- menší hustota akumulované energie než například u bateriových systémů

3 Výběr kritérií a jejich váhy pro rozhodování vybraných alternativ

K vyhodnocení jednotlivých akumulčních systémů jsou důležitým hlediskem vhodně zvolená kritéria, z nichž jsou vypočteny jejich váhy, dalším krokem je vyhodnocení akumulčních systémů za pomoci multikritériální metody. Výběr subjektivně zvolených akumulčních systémů, a k nim přiřazených kritérií, je uveden v *tabulce 4*. Vybrané alternativy akumulčních systémů lze rozdělit na akumulční systémy dlouhodobé, tudíž vhodné pro tzv. ostrovní režim (*Jedná se o schopnost provozu elektrárenského bloku do vydělené části vnější sítě tzv. ostrova. Ostrovní provoz se vyznačuje velkými nároky na regulační schopnosti bloku. Schopnost Ostrovního provozu bloku je nezbytná pro předcházení a řešení stavu nouze*) [21], a krátkodobé, tudíž vhodné pouze k dorovnání špiček výkonu v DDZ. Uvedené hodnoty jsou vyhledány z různých literatur, starých i nových, proto může být následná analýza multikritériální metodou zkruslena.

Tabulka 4: Hodnoty k výpočtu

Druh systému	Kritéria				
	Účinnost (%)	Životnost (roky)	Doba vybíjení (h)	Výkon (nejvyšší) (MW)	Náklady (Kč/kW)
Baterie (olověné)	85 [22]	0,583 [6]	3 [22]	0,5 [15]	12 500 [23]
Vodíkový systém (technologie PEM)	25 ¹	0,17 ² [24]	5 [15]	10 [15]	100 000 [23]
Flow baterie	75 [25]	15 [12]	10 [15]	5 [15]	11 250 [23]
CAES	60 [6]	22,5 [6]	20 [15]	1 500 [15]	7 500 ³ [19]
SMES	90 [6]	30 [6]	0,5 [15]	5 [15]	6 000 ³ [26]
Superkapacitory	95 [6]	30 [6]	0,017 [15]	0,25 [15]	6 000 ³ [26]
Setrvačníky	95 [6]	30 [6]	0,083 [15]	0,75 [15]	6 000 ³ [26]

¹ Předpokládána hodnota účinnosti

² Pro životnost vodíkového systému uvažujeme nejslabší místo, kterým je membrána palivového článku (hodnota je platná u PEMFC článku)

³ Suma je vypočtena dle aktuálního kurzu ČNB 1.5.2011

K výpočtu vah kritérií byl použit SW MCA 7, v němž byla sestavena matice Saatyho metody viz *tabulka 5*. Saatyho metoda viz *příloha I*. byla použita ke vhodné eliminaci subjektivního náhledu na zvolené hodnoty vah. Následně byly vypočteny v SW MCA 7 jednotlivé váhy kritérií, viz *tabulka 6*, a pro větší přehlednost seřazeny sestupně dle důležitosti viz *tabulka 7*.

kritérium f_1účinnost

kritérium f_2životnost

kritérium f_3doba vybíjení

kritérium f_4výkon (nejvyšší)

kritérium f_5náklady Kč/kW

Tabulka 5: Matice Saatyho metody

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
f_1	1,000	1,000	2,333	1,500	1,000
f_2	1,000	1,000	2,333	1,500	0,667
f_3	0,429	0,429	1,000	1,000	0,667
f_4	0,667	0,667	1,000	1,000	0,833
f_5	1,000	1,500	1,500	1,200	1,000

Tabulka 6: Spočtené váhy kritérií

Kritérium	v_i
kritérium f_1	0,2459
kritérium f_2	0,2303
kritérium f_3	0,1277
kritérium f_4	0,1578
kritérium f_5	0,2383
<i>Suma vah všech kritérií</i>	1,0000

Tabulka 7: Seřazení vah kritérií

1.	Účinnost	0,2459
2.	Náklady	0,2383
3.	Životnost	0,2303
4.	Výkon (nejvyšší)	0,1578
5.	Doba vybíjení	0,1277

4 Výběr optimální varianty pro akumulaci elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů

Vyhodnocení variant akumulčního systému bylo provedeno v SW MCA 8. Metodou pro výpočet multikriteriální analýzy byla metoda TOPSIS. K vyhodnocení byly použity váhy kritérií, vypočtené v předchozí kapitole. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v *tabulce 8*.

Metoda TOPSIS

V případě metody TOPSIS se jedná o princip minimalizace vzdálenosti od ideální varianty. Ideální variantou nazveme variantu, pro kterou všechny hodnoty kritérií dosahují nejlepších hodnot. Ideální varianta je většinou hypotetická, jako nejlepší se pak vybírá taková, která je podle určité metriky nejbližší k ideální variantě.

Metoda TOPSIS poskytuje úplné uspořádání množiny všech variant, tzn. je určena i pro výběr nejlepší varianty. Požadovanými vstupními údaji jsou kritériální hodnoty pro jednotlivé varianty a váhy jednotlivých kritérií.

Kritériální hodnoty pro jednotlivé varianty jsou uspořádány v kritériální matici $Y=(y_{ij})$, kde y_{ij} je hodnota i -té varianty hodnocené podle j -tého kritéria. [27, 28]

Podrobněji je metoda Topsis vysvětlena viz *příloha I*.

Tabulka 8: Vypočtená ideální metoda pomocí metody TOPSIS

Varianta	Ohodnocení
CAES	0,823
Setrvačníky	0,476
Superkapacity	0,476
SMES	0,474
Flow baterie	0,434
Baterie (olověné)	0,352
Vodíkový systém (technologie PEM)	0,100

Výpočtem za pomoci MCA metody TOPSIS byl stanoven jako nejvhodnější akumulční systém pro akumulaci z OZE systém stlačeného vzduchu CAES. Tento systém se především využívá v Německu. U nás není zatím rozšířen. Systém akumulace CAES je jedním ze systémů vhodných pro Ostrovní režim, takže by sám dokázal zálohovat určité izolované území bez větších problémů. Účinnost systému by mohla být zlepšena v hybridním spojení s dalším akumulčním systémem, například se setrvačníkem, nebo superkapacity, které vyšly v hodnocení akumulčních systémů jako první mezi systémy na pokrytí výkonových špiček DDZ, a nejsou vhodné k samostatnému napájení Ostrovního režimu.

Z těchto několika typů akumulčních systémů, buďto v kombinaci dvou či více nebo samostatného jednoho systému, je pro náš následující úkol nejdůležitější vodíkový akumulční systém s technologií PEM, který vyšel v hodnocení dle výše zmíněných kritérií na posledním místě. Umístění mezi ostatními systémy je nejvíce ovlivněno nízkou účinností, životností a hlavně vysokými náklady vztaženými na jednotku kW/Kč, které vysoce převyšují ostatní uvedené akumulční systémy. Akumulční vodíkový systém s technologií PEM se využívá v laboratorních podmínkách VŠB – TU Ostrava, která se výzkumem zabývá několik let. Systém je napájen z obnovitelného zdroje energie, kterým je v našem případě solární energie. S tímto systémem se může počítat v budoucnosti a odborníci jej považují za adekvátní ve využití jako zálohovacího systému, který by měl bez větších problémů pojmout energii a ve vhodnou dobu ji opět vydat. V zahraničí se systémy objevují spíše jako pokusné moduly, na kterých se schopnosti akumulčního systému testují. I tento systém by mohl být spojen s dalším špičkovým akumulčním systémem do hybridního soustrojí, například se superkondenzátorem nebo také olovenými gelovými bateriemi, jako tomu je v laboratoři palivových článků VŠB – TU Ostrava.

5 Zpracování akumulace solární energie do vodíkové technologie v laboratoři VŠB – TU Ostrava

5.1 Laboratoř palivových článků – stručný popis

K rozběhu programu palivových článků došlo v roce 2004. Laboratoř palivových článků byla zprovozněna 11. 6. 2007. Na *obrázcích 19, 20, 21* jsou zobrazeny některé části laboratoře.

V laboratoři probíhá výzkum v oblasti:

- mobilní prostředek využívající vodík jako pohon
- palivové články k výrobě a dodávce el. en.
 - v současnosti jde v laboratoři o výzkum akumulace el. en. do vodíku, které se získává za pomoci obnovitelného zdroje energie – FV panely
 - řeší se jako ostrovní režim



Obrázek 19: Laboratoř palivových článků



Obrázek 20: Sklad se dvěma svazky tlakových lahví



Obrázek 21: Rozvodná a redukční stanice provozních plynů s příslušenstvím

5.1.1 Vybavení laboratoře

Níže uvedené údaje o laboratoři se týkají převážně zařízení, která byla během laboratorního měření použita, nikoliv celkového popisu laboratoře palivových článků. V laboratoři se nachází vodíkové zařízení, včetně bezpečnostního rozvodu dusíku. Vyrobený vodík je uložen v tlakových lahvích, které jsou ve dvou svazcích po 12 tlakových lahvích. Každá láhev má tlak 200 bar a dokáže pojmout 9 m³ vodíku. Celková zásoba vystačí zhruba na 90 h provozu 2 modulů palivových článků typu PEM (Nexa Ballard Power Module) $P_n = 1,2 \text{ kW}$. Dále je zde umístěn elektrolyzátor (Hogen GC600). Může být napájen přímo ze sítě nebo pomocí FV panelů. Elektrolyzátor lze vodík generovat pomocí reverzibilních protonových membrán. K tomuto procesu je nutná demineralizovaná voda, která se připravuje v osmotické filtrační jednotce Demiwa viz příloha II. Vyrobený vodík (filtrovaný a sušený) se následně ukládá do zásobníků s hydridy kovů (metahydridy), o kapacitě 1x1500 (2x150), o nízkém plnicím tlaku 15 bar, nebo v tlakových lahvích. U skladování vodíku musíme brát zřetel na hodnotu rosného bodu, který nesmí být překročen, což znamená, že teplota nesmí klesnout pod 10 °C, a také nesmí být překročena hodnota výskytu vzduchu a vodíku v koncentraci mezi 4 – 68 %, což by mohlo způsobit explozi.

Všechna zařízení pracující s vodíkem, včetně elektrolyzátoru a palivových článků, jsou umístěna v bezpečnostních digestořích vybavenými ventilací a měřením koncentrace vodíku z důvodu poruchy nebo manipulaci s přívody.

V laboratoři se také nachází měřicí stanice realizovaná pomocí měřících čidel, jejichž signál se převádí a vyhodnocuje na měřící kartě a počítači. Slouží k měření neelektrických, elektrických veličin a vyhodnocení energetických parametrů palivového článku.

Soustavu můžeme rozšířit o dva moduly PEM. Pro dodávku elektrické energie do sítě jsou moduly spojeny s napěťovými měniči typu SunnyBoy 1100LV se jmenovitým výstupním výkonem 1,1 kW. Celkový výkon dodaný do sítě může dosáhnout hodnoty 2,2 kW.

Moduly palivových článků pro svůj provoz potřebují vodík, který je jim dodáván z tlakových lahví, a dále kyslík, který si odebírají ze vzduchu.

Měřená data (elektrické i neelektrické veličiny výrobních bloků) jsou zobrazována a archivována pomocí naprogramované aplikace v prostředí LABVIEW, v němž jsou realizovány i virtuální měřicí přístroje. Snímání parametrů a el. veličin střídače SunnyBoy se provádí jeho vlastním měřícím systémem. Data ze střídačů zajišťuje PC přes komunikační rozhraní RS - 485. Měřené veličiny jsou napětí a proudy stacku palivových článků, výstupní proudy (bez vlastní spotřeby), vstupní a výstupní proudy a napětí střídačů tzn. síťové výstupní veličiny výrobních bloků. Také mohou být měřeny proudové poměry v propojkách palivových článků.

Pro účely měření neelektrických a elektrických veličin a vyhodnocování energetických parametrů výrobní jednotky elektrické energie s palivovým článkem byla navržena a realizována měřicí stanice. Jde o systém tvořený měřícími čidly, jejichž signál je převáděn a vyhodnocován měřící kartou a dále zpracováván počítačem. Pracoviště palivových článků je zobrazeno na *obrázku 22*.

Čidla jsou realizována pomocí napěťových a proudových čidel typu LEM. Pro funkčnost čidel byly navrženy a zkonstruovány podpůrné obvody, které upravují měřící rozsah čidel a jejich propojení

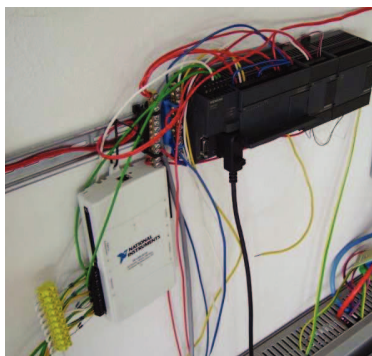
s měřicí kartou. Jedná se o 16 bitovou měřicí kartu (NI USB - 6218) s USB rozhraním, které zajišťuje její flexibilitu a mobilitu.[29]



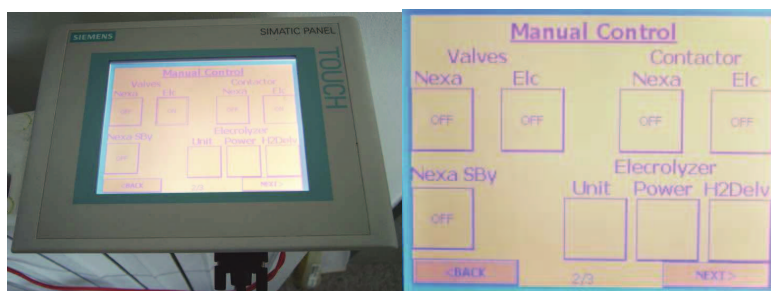
Obrázek 22: Pracoviště palivových článků

Celková účinnost jednoho výrobního bloku je kolem 35 %. Zatěžovací charakteristika v akumulacním systému použitých modulů PEM palivových článků je velmi měkká, a v rozsahu výstupního výkonu (0 – 1,2 kW) kolísá vstupní napětí až o 40 %, a proto jsou kladeny velké nároky na střídač napětí a jeho parametry z důvodu stabilizace výstupního střídavého napětí.

Za účelem zautomatizování provozu vodíkového akumulacního systému byl realizován řídicí systém na bázi PLC programovatelných automatů. Tento systém, využívající PLC moduly Siemens viz obrázek 23 (naprogramované v SW konfiguračním a vývojovém prostředí STEP 7 Simatic), je schopen na základě měřených a vyhodnocovaných elektrických veličin akumulacního systému provoz tohoto systému monitorovat a řídit. V současné době probíhá optimalizace tohoto systému. Na obrázku 24 je ukázka ovládacího dotykového displeje PLC řídicího systému. [30]



Obrázek: 23 PLC moduly



Obrázek 24: Ovládací dotykový displej PLC řídicího systému

5.1.2 Rozbor a popis systému akumulace

System je řešen jako ostrovní režim pro trvalé napájení střídavého spotřebiče, kterým je v současnosti světelný spotřebič o výkonu 200 W.

System tvoří dvě skupiny zařízení:

- pro výrobu vodíku
 - fotovoltaické panely, DC/DC měnič, baterie, DC/AC měnič, elektrolyzér
- pro přeměnu energie uskladněného vodíku na energii elektrickou
 - výrobní jednotka tvořená modulem palivového článku Nexa Ballard a DC/DC měničem

Vyrobený vodík je uskladněn v tlakových lahvích nebo v zásobníku s hydridy kovů (metalhydrid).

Vodíkový laboratorní systém, založen na ostrovním režimu se skládá z:

- Polykrystalických fotovoltaických panelů o celkovém instalovaném výkonu 1980 Wp s možností rozšíření na výkon 2970 Wp.
- Polovodičových měničů:
 - AC/DC Sunny Island 4248 (výrobce: SMA)
 - DC/DC Sunny Charger (výrobce: SMA) - na výstupu FV panelů
 - DC/DC SD-1000L-48 (výrobce: MeanWell) - na výstupu modulů pal. článků
- Baterií: olovené gelové Fiamm 12 FLB 300
- Generátoru vodíku (elektrolyzér) Hogen GC600: příkon: 1,2 kW, produkce H₂ : 600 ml/min. (výrobce: Proton Energy Systems)
- Zásobníků vodíku: tlakové láhve nebo láhve s metalhydridy (výrobce: Labtech Int. Co. Ltd., Bulgary)
- Modulů nízkoteplotních PEM palivových článků typu Nexa Power Module: výkon: 1,2 kW (výrobce: Ballard)
- Zátěže (např. svítidla)
- Zařízení tvořící řídicí systém (PLC moduly Siemens) a zařízení pro měření elektrických a neelektrických veličin (měřicí karty, napěťová a proudová LEM čidla, PC měřicí stanice, hmotnostní průtokoměry) [29, 30]

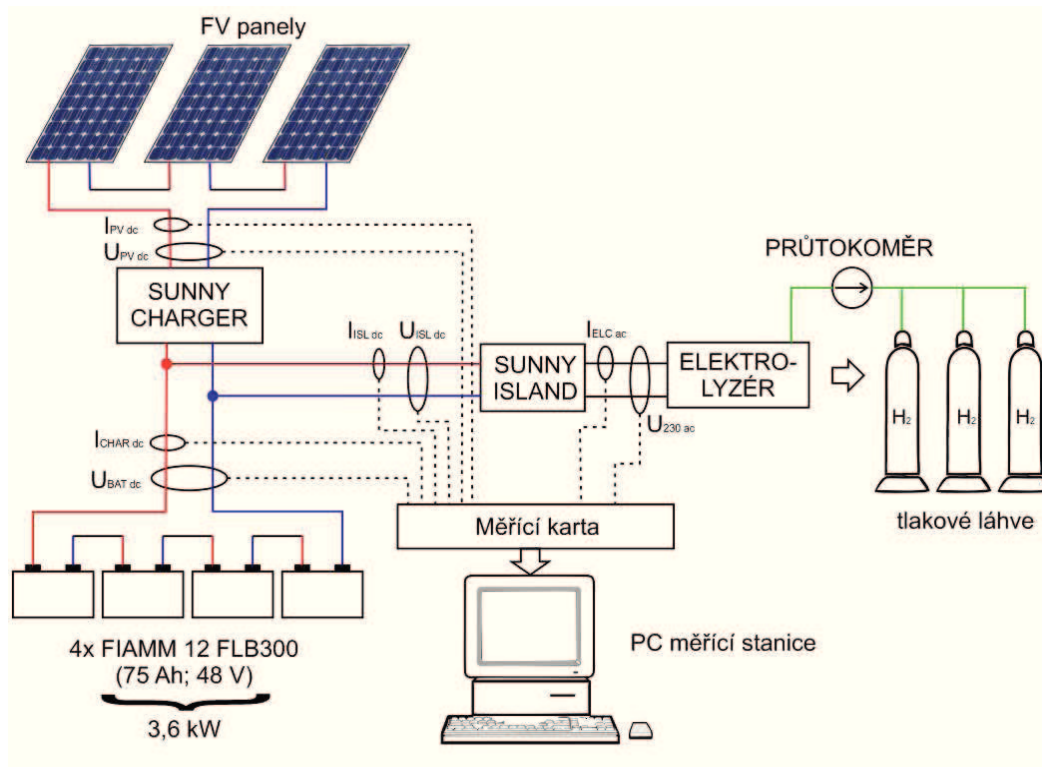
5.2 Vlastní měření a vyhodnocení dat z laboratoře palivových článků

Měření v laboratoři palivových článků se skládalo z výroby vodíku v elektrolyzáru napájeného z fotovoltaických článků, který byl následně přeměněn zpět na elektrickou energii, a měření zatěžovacích charakteristik modulu palivových článků PEM typu Nexa; Modul Ballard Nexa výkonem 0 – 1200 W a 1200 – 0 W.

Cílem měření bylo zjistit účinnosti jednotlivých částí zařízení akumulčního systému, určené k výrobě vodíku, a dále účinnost výroby elektrické energie z akumulovaného vodíku v modulu palivových článků Nexa Ballard.

5.2.1 Výroba vodíku z fotovoltaiky

Napájení elektrolyzáru Hogen GC600 viz příloha II., pro výrobu vodíku ze solární energie, bylo zajištěno pomocí solárních polykrystalických panelů Schott Poly 165, viz příloha II., o celkovém instalovaném výkonu 1980 Wp s možností rozšíření na výkon 2970 Wp. Na níže uvedeném schéma viz obrázek 25 je vyobrazeno propojení jednotlivých částí systému, včetně měřících bodů. Měřené elektrické veličiny jsou zpracovávány pomocí měřící karty (NI USB - 6218). Veškerá energie z fotovoltaických panelů byla určena k výrobě vodíku v elektrolyzáru Hogen GC600, tudíž nebyla připojena zátěž na střídavé sběrnici.



Obrázek 25: Blokové schéma výroby vodíku z fotovoltaických panelů

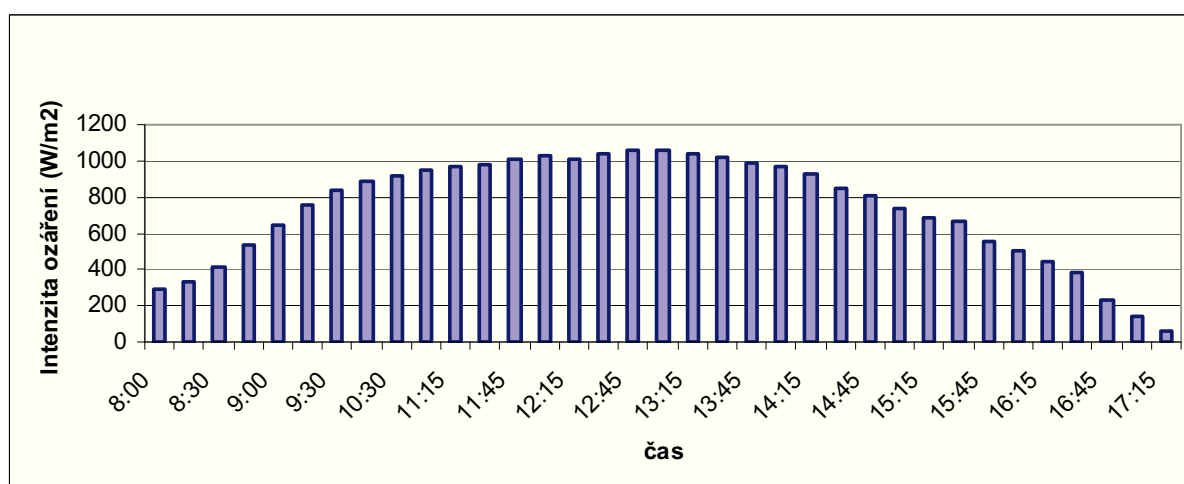
Během výroby vodíku přes elektrolyzáru Hogen GC600 probíhalo také venkovní měření intenzity ozáření FV panelů pomocí přístroje Mavolux. Sklon panelů vůči vodorovné rovině činí 50°. Naměřené

hodnoty intenzity ozáření jsou uvedeny v *tabulce 9* a graficky vyneseny v *obrázku 26*. Nejvyšší hodnotu intenzity ozáření naměřil měřicí přístroj Mavolux ve 12:45 hodin a to 1058 W/m².

Tabulka 9: Hodnoty intenzity ozáření FV panelů

Čas (s)	8:00	8:15	8:30	8:45	9:00	9:15	9:30	10:00	10:30	11:00	11:15	11:30
Hodnota (W/m ²)	289	337	412	532	645	754	842	891	920	950	972	980
Čas (s)	11:45	12:00	12:15	12:30	12:45	13:00	13:15	13:30	13:45	14:00	14:15	14:30
Hodnota (W/m ²)	1011	1030	1011	1040	1058	1057	1040	1014	987	970	932	846
Čas (s)	14:45	15:00	15:15	15:30	15:45	16:00	16:15	16:30	16:45	17:00	17:15	
Hodnota (W/m ²)	811	740	690	661	557	507	445	381	230	137	56	

Intenzita ozáření M_e (W/m²) je fotometrická veličina, definovaná jako měrná veličina zářivého toku na ozařované ploše.



Obrázek 26: Intenzita ozáření FV panelů

Účinnost FV panelů (12 ks Schott Poly165)

Intenzita ozáření polykrystalických panelů Schott Poly 165 dosahovala nejvyšších hodnot v intervalovém časovém období 12:45 – 13:00 hodin. Z výkonu, během tohoto časového intervalu viz *obrázek 27*, byla vypočtena účinnosti FV panelů.

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{S \cdot M_e} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3)$$

$$\eta_{PV} = \frac{422,11}{15,75 \cdot 1057,5} \cdot 100 = 2,53 \%$$

kde η_{PV}je účinnost FV panelů (%)
 Sje plocha FV panelů (12 ks) (m²)
 M_eje intenzita ozáření FV panelů (W/m²)

$$S = p \cdot (a \cdot b) \quad (m^2) \quad (4)$$

$$S = 12 \cdot (1,62 \cdot 0,81) = 15,75 \text{ m}^2$$

kde Sje celková plocha FV panelů (m^2)
 a, bjsou rozměry 1 FV panelu (m)
 pje počet FV panelů

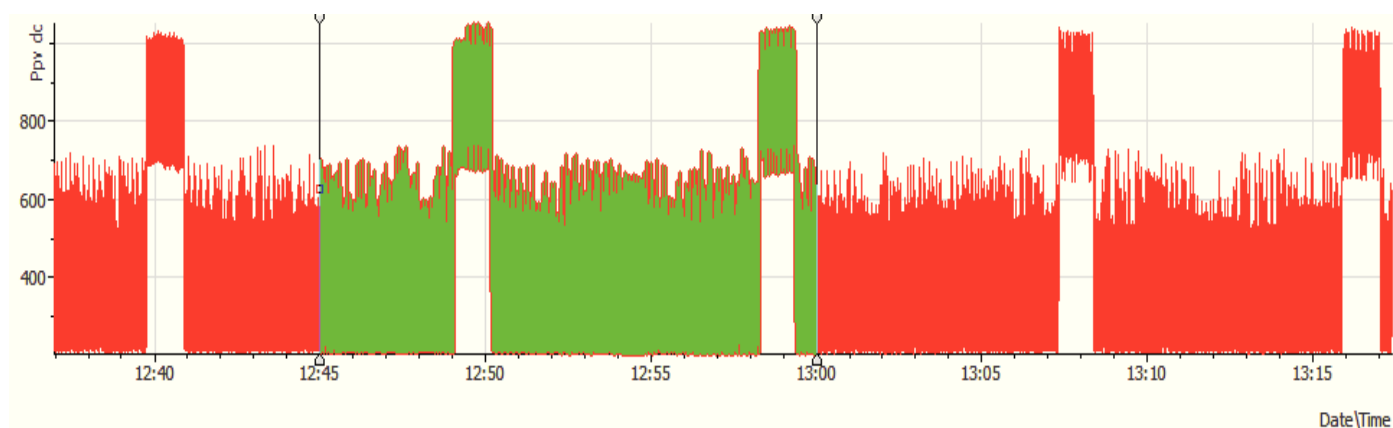
$$M_e = \frac{M_{e1} + M_{e2}}{2} \quad (\text{W} / \text{m}^2) \quad (5)$$

$$M_e = \frac{1058 + 1057}{2} = 1057,5 \text{ W} / \text{m}^2$$

kde M_eje intenzita ozáření FV panelů (W/m^2)
 M_{e1}, M_{e2} ...je intenzita ozáření FV panelů v časovém intervalu 12:45 – 13:00 (W/m^2)

$$P_{PV} = I_{PV} \cdot U_{PV} \quad (\text{W}) \quad (6)$$

kde P_{PV}je průměrná hodnota ze všech naměřených vzorků v časovém intervalu 12:45 – 13:00 s maximální intenzitou ozáření $M_{e\text{max}}$



Obrázek 27: Výkon FV panelů při maximální intenzitě ozáření

Účinnost přeměny energie slunečního záření na energii elektrickou u skupiny 12 ks FV panelů tedy vychází 2,53 %, což je ve srovnání s údaji od výrobce 12,6 % velmi malá hodnota.

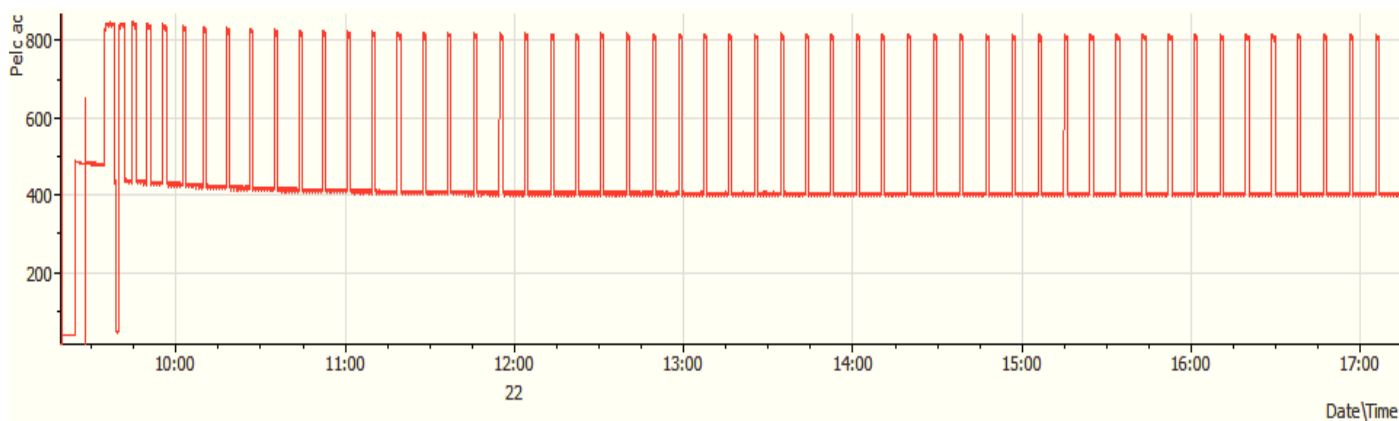
Měřená data při výrobě vodíku ze solární energie pomocí polykrystalických panelů Schott Poly 165 a elektrolyzérů Hogen GC600 byla zálohována softwarovou aplikací Datalogger, vytvořenou v prostředí LABVIEW, a to jako soubor TDMS, který umožňuje ukládat a pracovat s velkým množstvím dat. Vyhodnocení dat bylo provedeno v programu DIAdem 2010 a MS Excel 2003. Z důvodu zajištění dostatečné dodávky výroby energie z fotovoltaických panelů na provoz elektrolyzérů bylo nutné započít s výrobou vodíku a měření až v čase, kdy byla stanovena dostatečná intenzita ozáření panelů. Měření trvalo od 9:18:26 hodin do 17:13:41 hodin tedy cca 475 minut. Slunečný den se dá brát jako podprůměrný, ale dostačující k provozu elektrolyzérů Hogen GC600.

K ukazatelům průběhu výkonů viz obrázky 28, 29, 30, 32 patří cyklický děj, na němž je zachycen cyklicky se zvyšující příkon elektrolyzáru Hogen GC600 v téměř pravidelných intervalech. Tyto změny výkonu odebíraného elektrolyzárem jsou způsobeny jeho provozem a pravděpodobně souvisejí s tlakováním a obnovou reakční vody uvnitř elektrolyzáru.

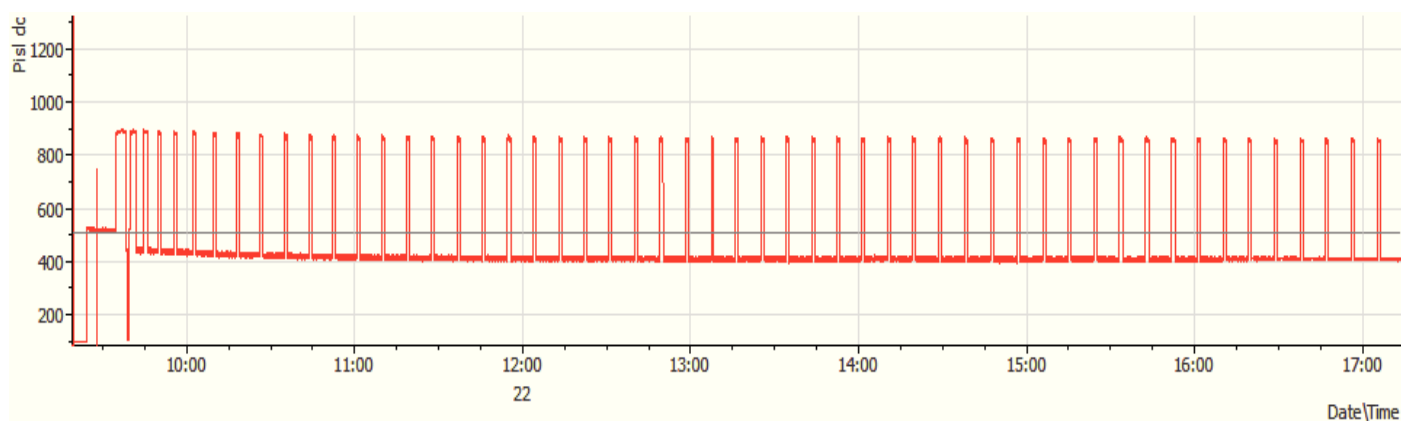
Data zálohována softwarovou aplikací Datalogger vytvořenou v prostředí LABVIEW a uloženou jako soubor TDMS, byla pro dílčí části systému, u kterých se zjišťovala účinnost, zpracována a vyhodnocena v programu DIAdem 2010. Podstatnými hodnotami bylo napětí a proud polykrystalických panelů (Schott Poly 165), Sunny Island Charger (nabíječ) viz příloha II., Sunny Island 4248 (střídač) viz příloha II. a elektrolyzáru (Hogen GC600), ze kterých byl vypočítán výkon a následně z výkonů účinnost zařízení Sunny Island Charger, Sunny Island 4248, elektrolyzáru Hogen GC600 a palivových článků Nexa Ballard (kapitola 5.2.2 Výroba elektrické energie z vodíku)

Než dojde k úplnému rozběhu elektrolyzáru Hogen GC 600, je nutné provést několik úkonů. Všechny uvedené fáze jsou graficky znázorněny v příloze IV. Jde o průběhy, na kterých je zaznamenán příkon elektrolyzáru a fotovoltaických panelů odpovídající startovací sekvenci spouštěcích procesů elektrolyzáru Hogen GC600, kde začala dodávka. Startovací sekvence se stává z části zahřívání stacku elektrolyzáru na provozní teplotu obvodu a tlakování na hodnotu nastavenou uživatelem.

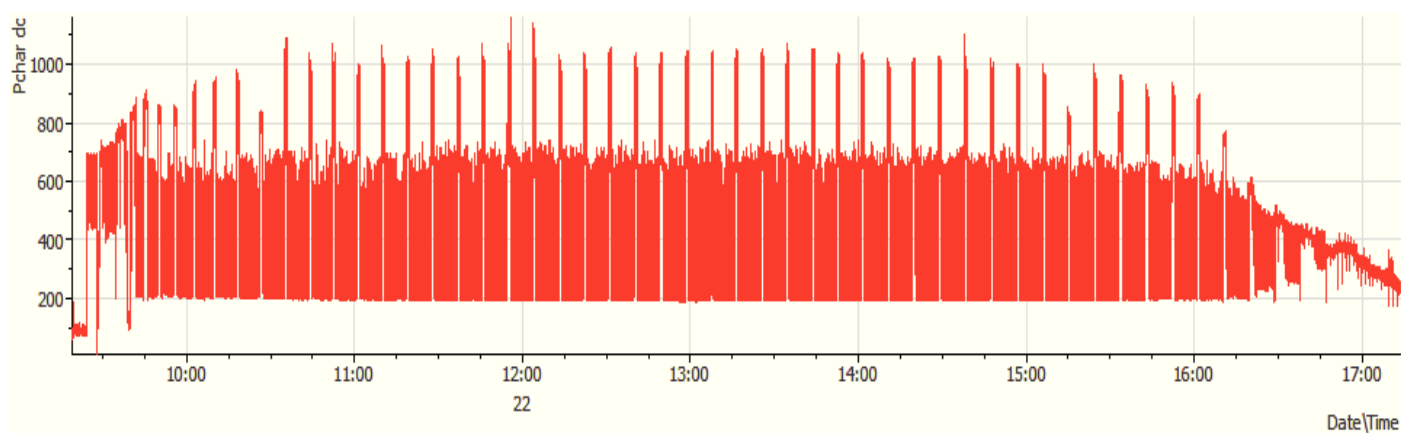
Následující grafy na obrázcích 28, 29, 30, 32 znázorňují časové průběhy jednotlivých výkonů v systému.



Obrázek 28: Příkon pro elektrolyzáru Hogen GC600

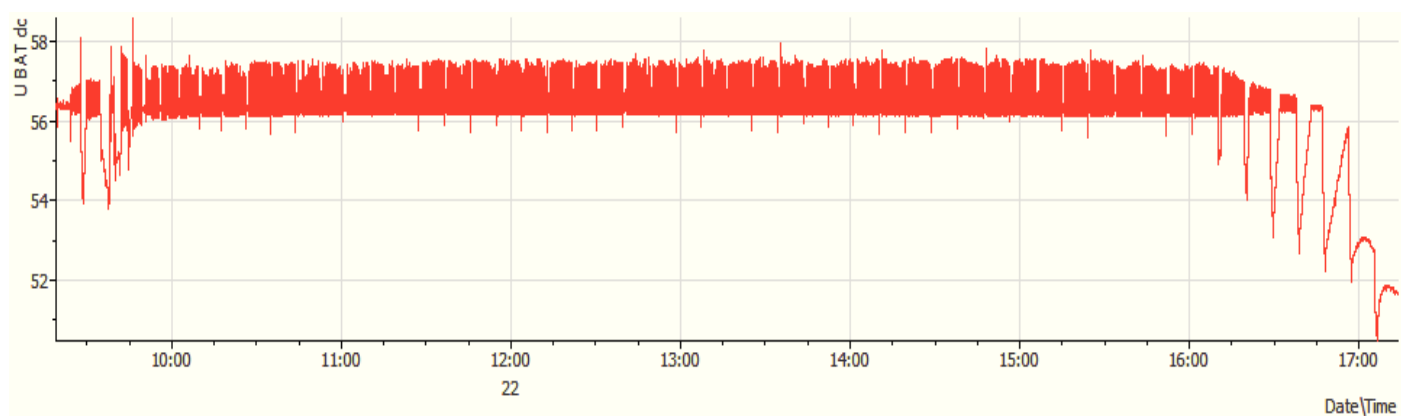


Obrázek 29: Výkon na vstupu střídače Sunny Island 4248

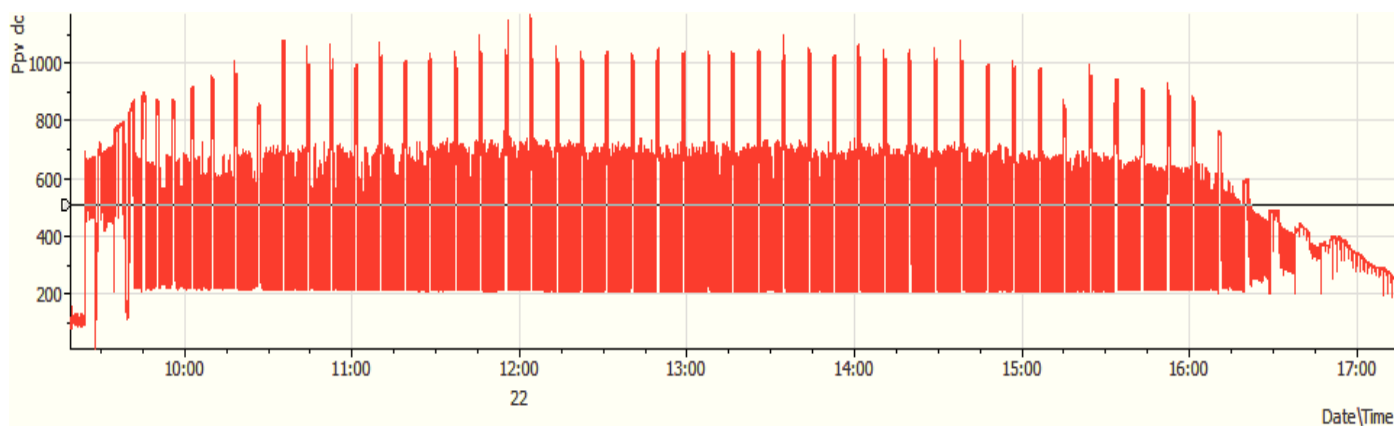


Obrázek 30: Výkon nabíječe Sunny Island Charger

Výkon dodávaný FV panely přestal být dostatečný pro napájení elektrolyzéry v čase cca 16:56 hodin. Poté byl elektrolyzér napájen cca 35 minut z baterií, což lze sledovat na *obrázku 31*, kde napětí pokleslo z 56,4 V na cca 52 V, a následně došlo k vypnutí elektrolyzéry.



Obrázek 31: Průběh napětí na bateriích



Obrázek 32: Výkon na fotovoltaických panelech

Celkové množství vyrobeného vodíku bylo 316,15 l. Uvedené množství bylo odečteno z hmotnostního průtokoměru. Přeměnou vyrobeného vodíku na elektrickou energii se zabývá následující kapitola 5.2.2 *Výroba elektrické energie z vodíku*.

Výpočet účinnosti

1) Účinnost nabíječe (Sunny Island Charger)

$$\eta_{CHAR} = \frac{E_{CHAR}}{E_{PV}} \quad (-) \quad (7)$$

$$\eta_{CHAR} = \frac{3159,02}{3290,78} = 0,9599$$

$$\eta_{CHAR\%} = \eta_{CHAR} \cdot 100 \quad (\%) \quad (8)$$

$$\eta_{CHAR} = 0,9599 \cdot 100 = 95,99 \%$$

kde E_{PV} ... je energie dodaná FV panely za dobu t_1 , vypočítaná z výkonu P_{PV}
(průměrná hodnota ze všech naměřených vzorků: $P_{PV} = I_{PV} \cdot U_{PV}$):

$$E_{PV} = P_{PV} \cdot t_1 \quad (Wh) \quad (9)$$

$$E_{PV} = 415,55 \cdot 7,9191 = 3290,78 \text{ Wh}$$

a E_{CHAR} ... je energie dodaná nabíječem za dobu t_1 , vypočítaná z výkonu P_{CHAR}
(průměrná hodnota ze všech naměřených vzorků: $P_{CHAR} = I_{CHAR} \cdot U_{BAT}$):

$$E_{CHAR} = P_{CHAR} \cdot t_1 \quad (Wh) \quad (10)$$

$$E_{CHAR} = 398,91 \cdot 7,9191 = 3159,02 \text{ Wh}$$

2) Účinnost střídače (Sunny Island 4248)

$$\eta_{ISL} = \frac{E_{ELC}}{E_{ISL}} \quad (-) \quad (11)$$

$$\eta_{ISL} = \frac{3629,71}{3952,93} = 0,9182$$

$$\eta_{ISL\%} = \eta_{ISL} \cdot 100 \quad (\%) \quad (12)$$

$$\eta_{ISL} = 0,9182 \cdot 100 = 91,82 \%$$

kde E_{ELC} ...je energie spotřebovaná elektrolyzérem (dodaná střídačem) za dobu t_1 , vypočítaná z výkonu P_{ELC} (průměrná hodnota ze všech naměřených vzorků: $P_{ELC} = I_{ELC} \cdot U_{230}$):

$$E_{ELC} = P_{ELC} \cdot t_1 \quad (Wh) \quad (13)$$

$$E_{ELC} = 458,34 \cdot 7,9191 = 3629,71 Wh$$

a E_{ISL} ...je energie odebraná střídačem za dobu t_1 , vypočítaná z výkonu P_{ISL} (průměrná hodnota ze všech naměřených vzorků $P_{ISL} = I_{ISL} \cdot U_{ISL}$):

$$E_{ISL} = P_{ISL} \cdot t_1 \quad (Wh) \quad (14)$$

$$E_{ISL} = 499,16 \cdot 7,9191 = 3952,93 Wh$$

3) Účinnost elektrolyzéru (Hogen GC600)

$$\eta_{ELC} = \frac{E_{H_2}}{E_{ELC}} \quad (-) \quad (15)$$

$$\eta_{ELC} = \frac{958,89}{3629,71} = 0,2641$$

$$\eta_{ELC\%} = \eta_{ELC} \cdot 100 \quad (\%) \quad (16)$$

$$\eta_{ELC} = 0,2642 \cdot 100 = 26,41 \%$$

kde E_{H_2} ...je ekvivalentní množství energie ve vodíku, vyrobeného elektrolyzérem za dobu t_1 :

$$E_{H_2} = \frac{V_{H_2}}{V_{molH_2}} \cdot Q_t \cdot U_{rov} \quad (Wh; dm^3; dm^{-3}; Ah; V) \quad (17)$$

kde V_{H_2} je množství vyrobeného vodíku (dm^3)

V_{molH_2} ...je objem jednoho molu H_2 (dm^3)

Q_t je velikost elektrického náboje potřebného pro výrobu jednoho molu H_2 (Ah)

U_{rov} je rovnovážné napětí chemické reakce probíhající v elektrolyzáru, resp. v palivovém článku (napětí reakce) (V)

$$E_{H_2} = \frac{316,15}{22,41} \cdot 55,35 \cdot 1,228 = 958,89 Wh$$

a E_{ELC} je energie spotřebovaná elektrolyzárem (dodaná střídačem) za dobu t_1 , vypočítaná z výkonu P_{ELC} (průměrná hodnota ze všech naměřených vzorků: $P_{ELC} = I_{ELC} \cdot U_{230}$):

$$E_{ELC} = P_{ELC} \cdot t_1 \quad (Wh) \tag{18}$$

$$E_{ELC} = 458,34 \cdot 7,9191 = 3629,71 Wh$$

Teorie potřebná k výpočtu E_h – Celková spotřebovaná energie k výrobě 316,15 dm³ vodíku viz příloha III.

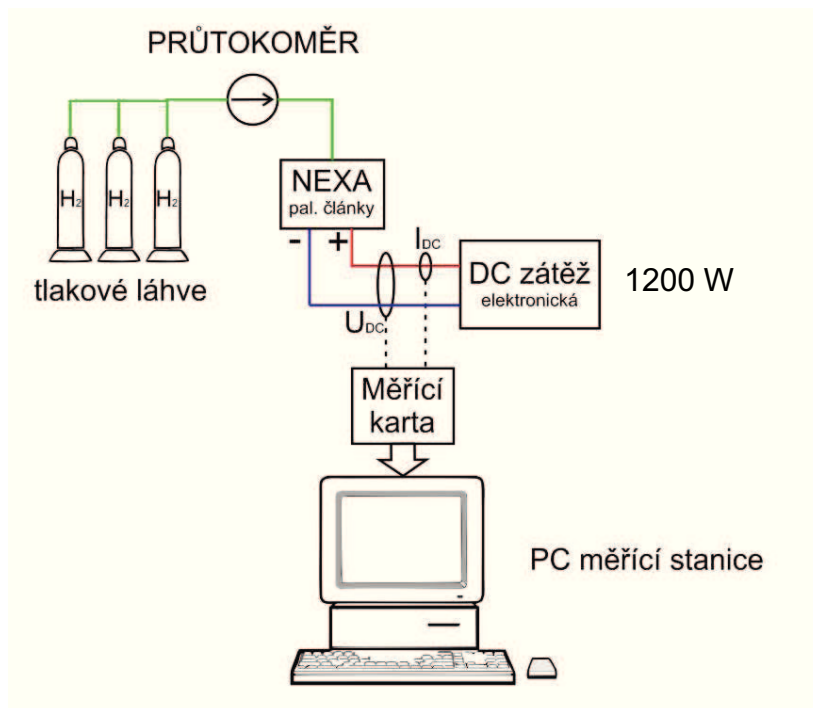
4) Celková účinnost výrobního procesu vodíku

$$\eta_{CEKL1} = (\eta_{CHAR} \cdot \eta_{ISL} \cdot \eta_{ELC}) \cdot 100 \quad (\%) \tag{19}$$

$$\eta_{CELK1} = (0,9599 \cdot 0,9182 \cdot 0,2641) \cdot 100 = 23,28 \%$$

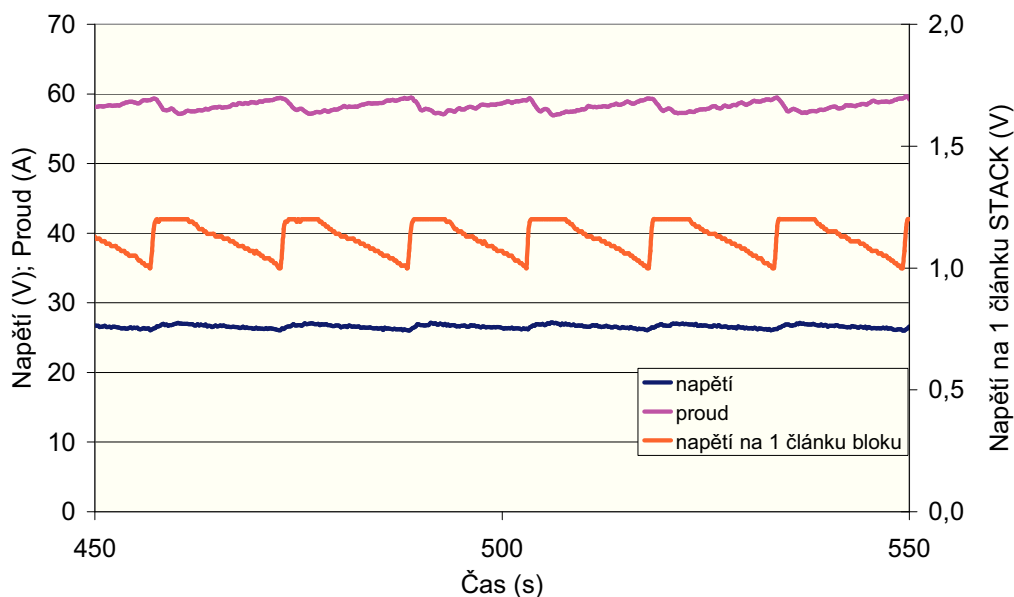
5.2.2 Výroba elektrické energie z vodíku

Měřená data při spotřebě vodíku na modulu palivových článků Nexa Ballard viz příloha II. byla zálohována v programech LABVIEW a NEXA, který byl od výrobce dodán jako součást palivového článku. K vyhodnocení této části úkolu byl použit MS Excel 2003. Obvod byl zapojen podle schématu na obrázku 33.



Obrázek 33: Blokové schéma spotřeby vodíku z tlakových lahví

V obrázku 34 jdou vidět opakující se výkyvy, které jsou způsobeny dynamickými parametry článků typu PEM, jedná se o jev „čištění“ palivové části modulu na straně anody, který se projevuje na výstupním napětí v intervalech v závislosti na spotřebě vodíku. Čištění je důležité z hlediska hromadění nečistot a kondenzované vody na chladnějších částech anody, které mohou způsobit neprůchodnost rozvodných kanálků a katalyzátoru, tzn. snížení reakční plochy. Čištění je podmíněno pronikáním dusíku a vody do proudu reakčního vzduchu přes membrány; postupně se dostává do proudu vodíku. Tento cyklus způsobí snížení výkonu na určitých místech modulu palivových článků označovaných „očistné články“, na nichž dochází k měření a následnému vysílání čistícího impulsu na ventil. Nečistoty jsou odplaveny vodíkem, dojde k obnovení výkonu palivového článku a viditelnému nárůstu napětí.[29]



Obrázek 34: Část úseku průběhu výstupního napětí při zátěži 1200 W

Celkové množství vyrobeného vodíku z fotovoltaiky činí 316,15 l. Hodnota byla odečtena z hmotnostního průtokoměru, který je součástí obvodu vodíkového systému. Těchto 316,15 l vodíku bylo následně pomocí modulu palivových článků Nexa Ballard přeměněno na elektrickou energii. Celková doba spotřeby při neměnném zatížení 1200 W byla 16 minut 56 vteřin. Jak bylo již zmíněno, během měření byly použity dva různé programy ukládání dat LABVIEW a NEXA. Jedním z důležitých rozdílů je, že program LABVIEW měří data bez vlastní spotřeby modulu palivových článků Nexa Ballard. Výslednou hodnotou vyrobené elektrické energie z programu LABVIEW je tedy 344,2 W/h a z programu NEXA je hodnota 436,5 W/h. Z těchto dvou hodnot lze tedy spočítat, že u plného zatížení spotřeba modulů činí 92,3 W/h.

Výpočet účinnosti

Účinnost modulů palivového článků (Nexa Ballard Power System)

$$\eta_{FC} = \frac{E_{FC}}{E_{H_2}} \quad (-) \quad (20)$$

$$\eta_{FC} = \frac{344,31}{958,89} = 0,3591$$

$$\eta_{FC\%} = \eta_{FC} \cdot 100 \quad (\%) \quad (21)$$

$$\eta_{FC} = 0,3591 \cdot 100 = 35,91\%$$

kde E_{FC} je energie vyrobená modulem palivových článků za dobu t_2 , vypočítaná z výkonu P_{FC} (průměrná hodnota ze všech naměřených vzorků:

$$P_{FC} = I_{FC} \cdot U_{FC} \text{):}$$

$$E_{FC} = P_{FC} \cdot t_2 \quad (Wh) \quad (22)$$

$$E_{FC} = 1219,98 \cdot 0,282 = 344,31 Wh$$

- a E_{H_2} je ekvivalentní množství energie ve vodíku spotřebovaného modulem palivových článků za dobu t_2 (totožné s ekvivalentním množstvím energie ve vodíku, vyrobeného elektrolyzérem za dobu t_1).

Teorie potřebná k výpočtu E_h – Celková spotřebovaná energie k výrobě $316,15 \text{ dm}^3$ vodíku viz Příloha III.

5.2.3 Zhodnocení

I přesto, že systém pro akumulaci elektrické energie z fotovoltaiky do vodíku je určen na trvalé pokrytí spotřeby AC zátěže, nebyla tato zátěž k systému během měření připojena, a veškerý vyrobený výkon z fotovoltaických panelů byl spotřebován elektrolyzérem pro výrobu vodíku. Vodík byl uskladněn v tlakových lahvích a následně přeměněn za pomoci modulu palivových článků Nexa na elektrickou energii spotřebovanou v přesné DC elektronicky řízené odporové zátěži viz obrázek 38. Z tohoto důvodu byl vyřazen řídicí systém určený pro autonomní provoz akumulačního systému.

Na základě měření byly vyhodnoceny účinnosti polovodičového měniče Sunny Island Charger (nabíječ) a Sunny Island 4248 (střídač), zapojených v systému mezi fotovoltaické panely a elektrolyzér viz obrázek 25, dále účinnost elektrolyzéro u při výrobě vodíku a účinnost modulu palivových článků při výrobě elektrické energie.

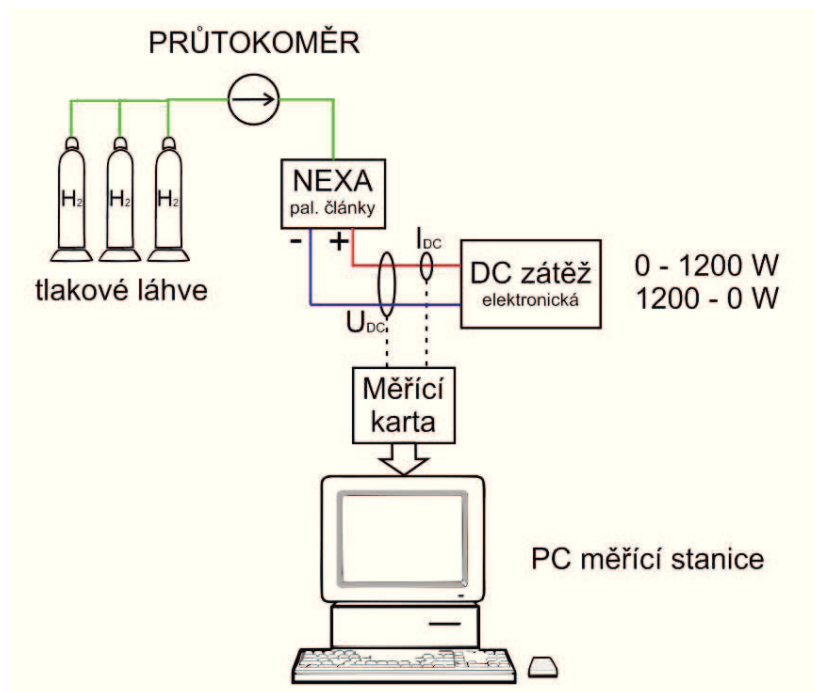
Celková účinnost přeměny energie získané z FV na elektrickou energii vyrobenou modulem palivových článků:

$$\eta_{celk} = (\eta_{celk1} \cdot \eta_{NEXA}) \cdot 100 \quad (\%) \quad (23)$$

$$\eta_{celk} = (0,2328 \cdot 0,3591) \cdot 100 = 8,35 \%$$

5.2.4 Měření zatěžovací charakteristiky modulu palivových článků Nexa Ballard

Schéma zapojení pro změření zatěžovacích a pracovních charakteristik je zobrazeno na *obrázku 35*. Pro měření napětí a proudu byla využita LEM čidla připojená k měřicí kartě (NI USB - 6218)



Obrázek 35: Blokové schéma výroby el. en. z vodíku přes modul palivových článků Nexa

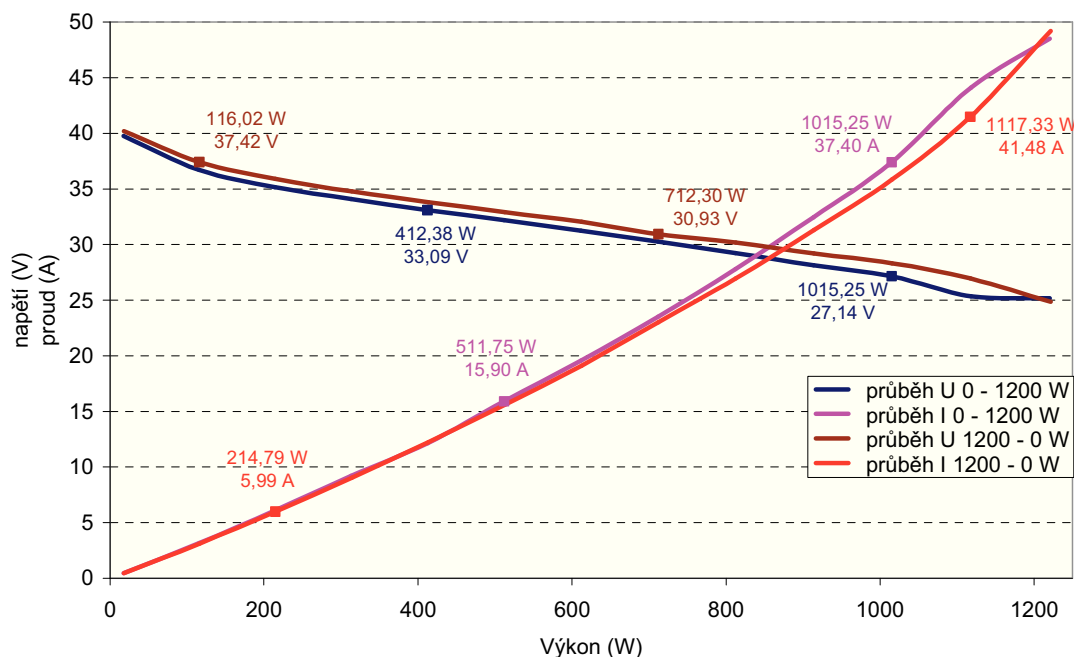
Výkon lze také dodávat palivovým článkem přes střídač do sítě, ale z důvodu eliminace rušivých vlivů této sítě byl výkon modulu palivových článků Nexa vyveden do přesné DC elektronicky řízené odporové zátěže (*obrázek 38*).

Během měření zatěžovacích a pracovních charakteristik modulu palivových článků Nexa Ballard byla ukládána data jak v programu LABVIEW tak i NEXA. Vyhodnocení bylo provedeno v programu MS Excel 2003. Vzhledem k velkému množství těchto dat byla v MS Excel 2003 použita funkce median⁴ pro snadnější vyhodnocení a lepší přehlednost v tabulce viz *příloha V*.

Za důležité charakteristiky jsou považovány charakteristiky zatěžovací, viz *obrázek 36*. Výstupní svorkové veličiny (napětí a proudy) jsou vyneseny v závislosti na výstupním výkonu, který byl dodáván modulem palivových článků do přesné DC elektronicky řízené odporové zátěže. Hodnoty se postupně nastavovaly po 100 W v rozmezí vzestupně 0 – 1200 W a sestupně 1200 – 0 W. V zatěžovací charakteristice lze vidět drobné rozdíly hodnot napětí a proudů při růstu a následně poklesu výkonu. Příčinou této hysteréze jsou rozdílné provozní teploty modulu palivových článků při

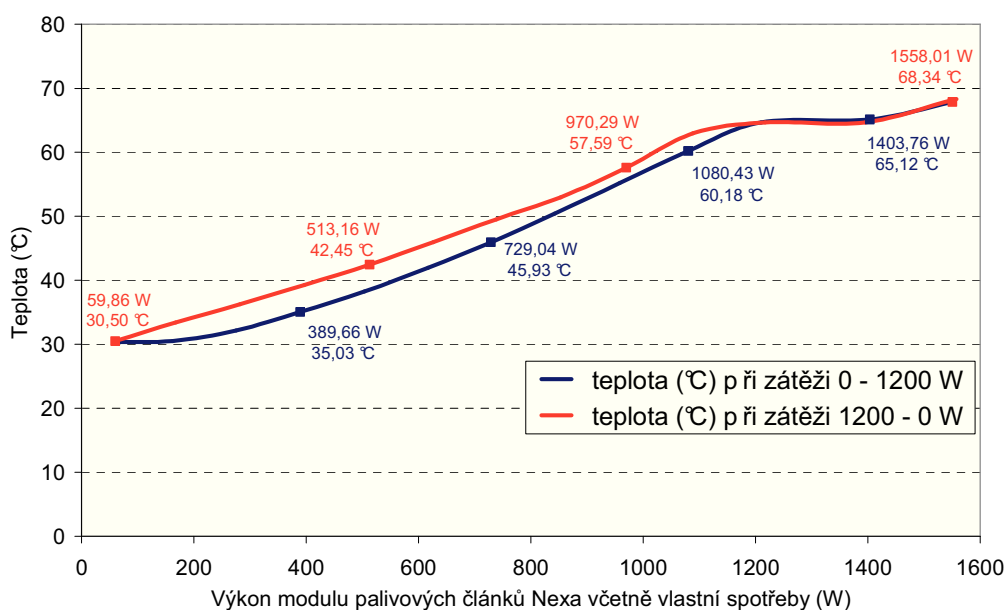
⁴ Medián je číslo, které leží uprostřed podle velikosti uspořádaného souboru čísel. Polovina čísel má tedy hodnotu, která je větší nebo rovna mediánu a polovina čísel má hodnotu, která je menší nebo rovna mediánu. [51]

zvyšování a snižování jeho zatížení. Zdrojová data jsou uvedena v tabulce viz příloha V. V grafu jsou vyneseny některé body z tabulky pro přehlednost.



Obrázek 36: Zatěžovací charakteristiky (bez vl. spotřeby) modulu pal. čl. Nexa Ballard

Jednou z důležitých součástí modulu palivových článků je chladicí ventilátor. Chladicí proces se nejvíce projevil cca u 1100 W, kdy došlo téměř k ustálení provozní teploty stacku (bloku) palivových článků viz obrázek 37 díky chladicímu ventilátoru modulu palivových článků. Toto zvyšování teploty souvisí se zvyšováním výkonu odebíraného přesnou DC elektronicky řízenou odporovou zátěží. Viditelná je zde také hysterézní smyčka, která má počátek i konec obou charakteristik ve stejném teplotním bodu.

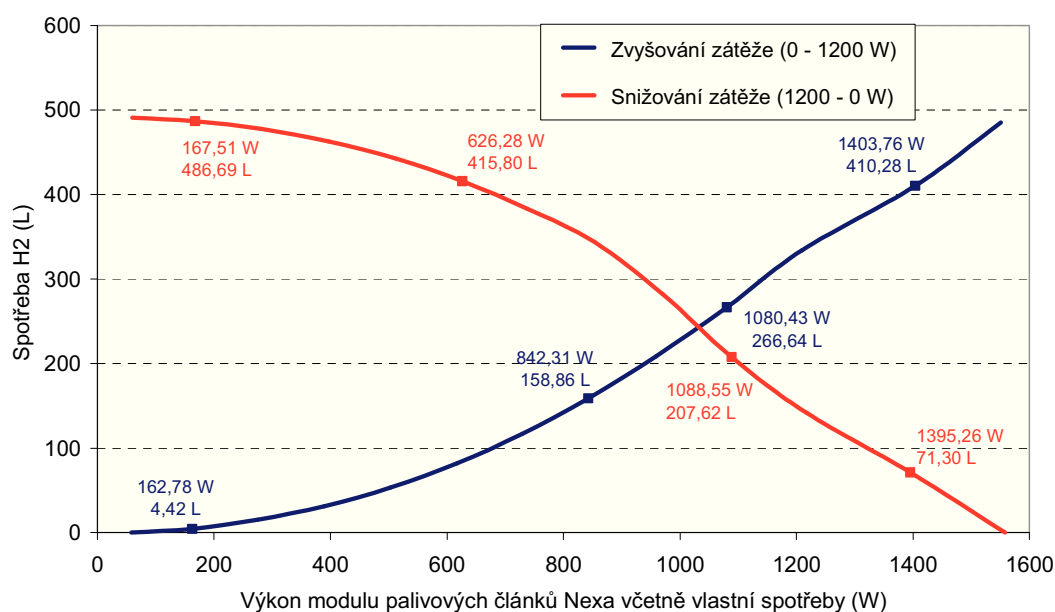


Obrázek 37: Teplotní závislost palivového článku na výkonu včetně vlastní spotřeby



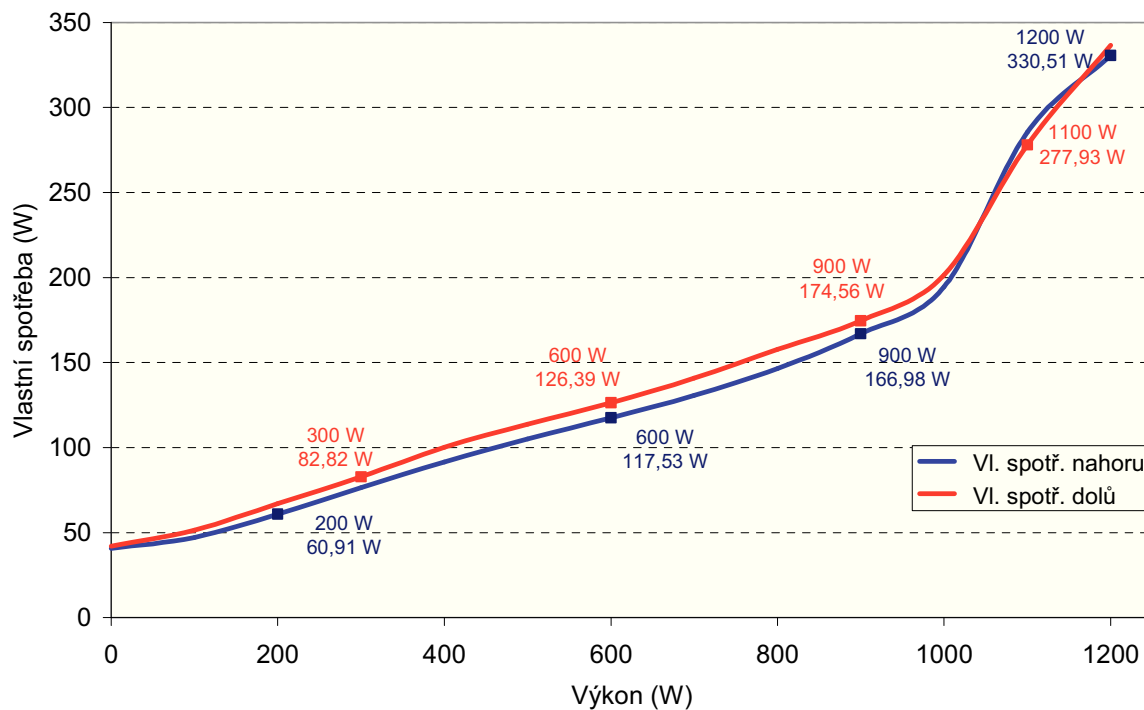
Obrázek 38: DC zátěž Electronic load IT8514C

K reakčním plynům pro modul palivových článků patří plynný vodík a vzduch. Ze vzduchu si palivový článek odebírá reakční kyslík. Důležitým hlediskem je také odvod vodních par od katody, u níž se nachází reakční prostor, za pomoci reakčního vzduchu. V *obrázku 39* je vynesena spotřeba palivového plynu (vodíku) v litrech v závislosti na nastavené zátěži. Hodnoty jsou brány z dat při měření zatěžovací charakteristiky. Modrá křivka zobrazuje spotřebu vodíku při zvyšování výkonu na přesné DC elektronicky řízené odporové zátěži v intervalu 0 – 1200 W. Za dobu 60 minut, kdy byl tento interval proměřen, činila spotřeba vodíku 485,06 l. Červená křivka zobrazuje spotřebu vodíku při snižování výkonu v intervalu 1200 – 0 W. Zdrojová data jsou uvedena v tabulce viz *příloha V*.



Obrázek 39: Spotřeba palivového plynu (H₂) 0 - 1200W a 1200 - 0W

Na obrázku 40 je vidět vlastní spotřeba modulu palivových článků Nexa při měření zatěžovacích charakteristik s výkony v intervalu 0 – 1200 W a 1200 – 0 W. Tyto rozdíly ve vlastní spotřebě modulu palivových článků jsou dány jeho různou provozní teplotou. V případě vyšší provozní teploty, je tedy i vyšší vlastní spotřeba. Zdrojová data jsou uvedena v tabulce viz příloha V.



Obrázek 40: Křivky vlastní spotřeby modulu palivových článků Nexa

Měřicí přístroje použité k laboratoři jsou uvedeny v tabulce viz příloha VI.

Závěr

V teoretické části práce jsem se zabýval získáním určitého přehledu o vybraných obnovitelných zdrojích energie, především solární energii, která je hlavním obnovitelným zdrojem v laboratoři palivových článků VŠB – TU Ostrava. V další části práce jsem popsal různé způsoby akumulace elektrické energie, které jsem následně vyhodnotil dle subjektivně zvolených kritérií. Toto vyhodnocení jsem provedl pomocí multikritériální metody TOPSIS implementované v podpůrném SW MCA 8.

Hodnoty kritérií pro jednotlivé varianty akumulčního systému, které jsou uvedeny v *tabulce 4*, mohou být zkresleny, jelikož byly brány z různých zdrojů. U kritéria účinnosti vodíkového systému byla zvolena očekávaná hodnota z měření 25 %. Ta se v laboratorním měření nepotvrdila a vyšla v zapojeném vodíkovém systému FV – nabíječ – baterie – střídač – elektrolyzér – tlakové láhve – palivový článek – spotřebič pouhých 8,35 %.

Výsledkem výpočtu metodou TOPSIS bylo jednoznačné umístění akumulčního systému CAES na první příčku výsledného pořadí, které je uvedeno v *tabulce 8*. Tohoto umístění systém dosáhl svou dostupnou účinností cyklu 60 %, životností 20 let a především nízkými náklady v Kč vztaženými na kW. Jeho ohodnocení v metodě dosáhlo 0,823, což je ve srovnání s akumulčním vodíkovým systémem, který se umístil jako poslední s ohodnocením 0,100, velmi propastné.

Umístění vodíkového systému na posledním místě bylo očekáváno, jelikož jeho výroba je velmi nákladná a náklady v Kč vztažené na kW vysoce převyšují náklady u ostatních akumulčních systémů. Dalším důležitým hlediskem, které dopomohlo vodíkovému systému k umístění na poslední příčku výsledného pořadí zmiňovaných akumulčních systémů, je velmi nízká životnost. Ta se odvíjí od nejslabšího místa vodíkového systému, kterým bezpochyby je membrána palivového článku. Tato hodnota, uvedená v *tabulce 4*, je platná pro palivový článek PEMFC, který je používán v laboratoři palivových článků VŠB – TU Ostrava.

Vodík je nejvíce rozšířeným prvkem ve vesmíru, na Zemi se vyskytuje ve sloučeninách, nejvíce v H₂O. U povrchu planety ho téměř nenajdeme, protože dochází u jeho výskytu k okamžité reakci s ostatními prvky. Vyskytuje se také v podobě plynu H₂ ve vysokých vrstvách stratosféry kvůli své nízké měrné hmotnosti.

Vodík se vyrábí převážně v místě spotřeby. V dnešní době je výrobní cena velmi vysoká, kvůli jeho energetické náročnosti, jelikož extrahování vodíku ze sloučenin s nízkou energetickou úrovní, jako je v našem případě voda, dochází k vysoké spotřebě energie, která musí být při procesu elektrolyzy dodána.

Na základě praktických měření v laboratoři, můžeme konstatovat, že výroba vodíku je cyklická, přičemž je část energie během startu z elektrolyzéro zmařena během jeho zahřívání a tlakování. Jde o nevratnou ztrátu, během které vodík není vyroben. Čím by se elektrolyzér častěji spouštěl, tím více by rostly ztráty. Za účelem snížení těchto ztrát, by bylo vhodné měření laboratorní systém optimalizovat.

V praktické části práce bylo úkolem provedení a vyhodnocení laboratorního měření. A to zahrnovalo výpočet účinností jednotlivých částí akumulčního systému realizovaného v laboratoři palivových článků VŠB – TU Ostrava. Praktická část zahrnovala také měření zatěžovacích a provozních charakteristik modulu palivových článků Nexa Ballard. Laboratorní měření se tedy skládalo z výroby vodíku z fotovoltaiky, výroby elektrické energie z vodíku a měření charakteristik palivového článku.

Nejdříve jsem vyhodnotil účinnost souboru fotovoltaických panelů Schott Poly 165, které napájely elektrolyzátor. Jejich účinnost (2,53 % ve srovnání s 12,6 % udaných výrobcem je velmi malá), byla dána nízkou intenzitou slunečního záření dopadajícího na fotovoltaické panely. I přes tuto nízkou hodnotu byla elektrická energie k napájení elektrolyzátoru dostatečná a bylo možné vodík vyrábět. Účinnost byla vypočítána v časovém intervalu 12:45 – 13:00 hodin, kdy intenzita ozáření fotovoltaických panelů dosahovala nejvyšších hodnot v průměru 1057,5 W/m².

Dále jsem vyhodnotil účinnost čtyř hlavních částí akumulčního systému, kterými byly nabíječ Sunny Island Charger, střídač Sunny Island 4248, elektrolyzátor Hogen GC600 a palivový článek Nexa Ballard. Účinnosti jsem vypočítal z naměřených dat prostřednictvím programů DIAdem 2010, LABVIEW a NEXA. Pro nabíječ vyšla účinnost 95,99 %, střídač 91,82 %, elektrolyzátor 26,41 % a palivový článek 35,91 %. Ukazatelem spolupráce těchto dílčích částí v jeden systém je celková účinnost, která vychází velmi malá, a sice 8,35 %. Tato hodnota je významně ovlivněna nízkou účinností elektrolyzátoru, který je v tomto ohledu nejslabším článkem uvedeného řetězce. Jde ale pouze o účinnost elektrolyzátoru Hogen GC600, který je určen pro produkci vodíku vysoké čistoty 99,9999 %. Tak vysoká čistota vodíku není z energetického hlediska nutná a je spíše vhodná zejména pro diagnostické účely. Obecně se účinnost elektrolyzátorů pohybuje 65 až 80 %.

I přes zjištěnou nízkou účinnost laboratorního vodíkového systému a výsledky stanovené multikriteriální analýzou se ukazují vodíkové technologie jako vysoce perspektivní pro spojení s nespolehlivými obnovitelnými zdroji energie. Vodíkovým akumulčním systémem lze řešit akumulaci obnovitelné energie ve velkém výkonovém rozsahu, závislém pouze na velikosti akumulčního zásobníku. I když je v tomto případě vodík jen přenašečem energie, nikoliv zdrojem, jeho použití je velmi výhodné z hlediska poměru chemické energie a hmotnosti.

Použitá literatura

- [1] LIBRA, Martin; POULEK, Vladislav. Fotovoltaika : Teorie i praxe využití solární energie. Praha : ILSA, 2009. 160 s. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [2] QUASCHNING, Volker . Obnovitelné zdroje energií. Praha : Grada, 2010. 296 s. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [3] CENEK, Miroslav, et al. Obnovitelné zdroje energie. 2. Praha : FCC PUBLIC, 2001. 208 s. ISBN 80-901985-8-9.
- [4] ŠEFTER, Jakov Iosifovič. Využití energií větru. Praha : SNTL, 1991. 272 s. ISBN 80-03-00616-3.
- [5] PASTOREK, Zdeněk; KÁRA, Jaroslav; JEVIČ, Petr. Biomasa : Obnovitelný zdroj energie. Praha : FCC PUBLIC, 2004. 288 s. ISBN 80-86534-06-5.
- [6] DWIVEDI B., SAHAY K.: Leonardo Energi, Electrical Power Quality & Utilization Magazine Volume 4, Issue 1, 2009
- [7] Kozumplík J., Jindra J. a kolektiv autorů: Akumulátory od principu k praxi, FCC PUBLIC 2003, ISBN 80-86534-03-0
- [8] BRADFORD R., Capturing Grid Power, IEEE power & energy magazine, 2009
- [9] CENEK, M. a kol., Akumulátory od principu k praxi., 248 s. ISBN 80-86534-03-0
- [10] Křivák P.: Současné možnosti akumulace elektrické energie ve fotovoltaických aplikacích, VUT Brno
- [11] PARKHIDEH, B. Technologies for Hybrid Electric Buses. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen – Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe. 2006, Dostupný také z WWW: <http://www.euromatic.no/ZEBRA_Aug17.pdf>.
- [12] HRADÍLEK, Zdeněk; MOLDRÍK, Petr; ŠEBESTA, Robert. Storage of electric energy gained from renewable sources. Proceedings of the IASTED International Conference Beijing, China. 2009
- [13] Sokanský, K. Palivové články v energetice, Ostrava, 2007

- [14] PORŠ Z.: Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s. Divize jaderné bezpečnosti a energetiky, Palivové články, 2002
- [15] DE BOER, Petra; RAADSCHELDERS, Jillis. Flow batteries. Leonardo ENERGY. 2007.
- [16] GREGOR, Jan; RADIL, Likáš; UHER, Jiří. Nové možnosti akumulace velkých objemů elektrické energie. ELECTRIC POWER ENGINEERING 2008. 2008
- [17] HRADÍLEK, Zdeněk; MOLDRÍK, Petr; CHVÁLEK, Roman. Electrical Energy Storage Systems. VŠB - Technical University of Ostrava, Department of Electrical Power Engineering, 2008.
- [18] Černožský T.: Hybridní posunovací lokomotiva – diplomová práce, Dopravní fakulta Jana Pernera, Pardubice, 2009, str 24-25
- [19] Batsaikhan Nyamdash: The Viability of Balancing Wind Generation with Large Scale Energy Storage in Ireland, 2009
- [20] Kazda J.: Supravodivý akumulátor energie - bakalářská práce, ZCU Plzeň, FEL 2004, str.13-16
- [21] Vzdělávací materiály společnosti ČEPS a.s.: Kodex přenosové soustavy (část II. a III)
- [22] MAŠEK, Zdeněk, et al. Superkapacitory v dopravní technice. Vědeckotechnický sborník ČD [online]. 2008, 25/2008, Dostupný z WWW: <<http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/vts25/2511.pdf>>.
- [23] VYSLOUŽIL M., HRADÍLEK Z. :Výběr systému akumulace energie z větrných elektráren multikriterální analýzou
- [24] Nexa™ Power Module User's Manual
- [25] Vanadium redox battery. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 9.8.2005, last modified on 6.12.2010 [cit. 2010-12-12]. Dostupné z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Vanadium_redox_battery
- [26] SCHOENUNG M. S.: Hydrogen Energy Storage Comparison, 1999

- [27] HRADÍLEK, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení. Ostrava : MONTANEX, 2008. 364 s. ISBN 978-80-7225-291-6.
- [28] GURECKÝ J.: Projektování elektrických distribučních sítí - studijní materiály
- [29] SOKANSKÝ, Karel; MINAŘÍK, Daniel. Provozní charakteristiky palivového článku typu PEM a jeho laboratorní připojení do sítě. Sborník konferencí HT - FCA 2008. 2008
- [30] LABORATOŘ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ
- [31] FIALA, P. Modely a metody rozhodování. Praha : Oeconomica, 2008. 292 s. ISBN 978-80-245-1345-4.
- [32] Schott glas made of ideas [online]. 2011 [cit. 2011-04-21]. SCHOTT POLY 175. Dostupné z WWW: <http://www.schottsolar.com/no_cache/de/produkte/photovoltaikmodule/schott-poly-175/?cid=27&did=438&sechash=1aa82952>.
- [33] SMA Solar Technology [online]. 2011 [cit. 2011-04-19]. Sunny Island Charger 40. Dostupné z WWW: <www.sma-czech.com>.
- [34] SMA Solar Technology [online]. 2011 [cit. 2011-04-19]. Sunny Island 4282. Dostupné z WWW: <www.sma-czech.com>.
- [35] HOGEN® GC 300 and 600 Laboratory hydrogen generators User's Manual
- [36] Výukové materiály společnosti Ballard dodávané k palivovému článku Nexa Power Module
- [37] Encyklopedie fyziky [online]. 2011 [cit. 2011]. Faradayovy zákony elektrolýzy. Dostupné z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=279>>.
- [38] BALAJKA, Jiří. Vodík a jiné nové nosiče energie. Bratislava : ALFA, 1982. 312 s.
- [39] Spektrální křivka. Dostupné z WWW: <http://www.osram.cz/osram_cz/SVTELN_DESIGN/O_svtle/Svtlo_a_lovk/Vnmn/pics/lr_040259461.gif>.
- [40] Solární kolektor. Dostupné z WWW: <<http://www.tondach.cz/userfiles/image/tondach-solar/solar-panel.jpg>>.

- [41] Parabolický žlab. Dostupné z WWW: <<http://www.solarhaus.cz/img/180/skyfuel-solarni-termalni-elektrarna.jpg>>.
- [42] Parabolické zrcadlo. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/obr/akt5.gif>>.
- [43] Fotovoltaický panel. Dostupné z WWW: <<http://www.nemakej.cz/fotovoltaiicke-systemy/princip-fotovoltaiickeho-clanku.jpg>>.
- [44] Vodní elektrárna. Dostupné z WWW: <<http://www.energyweb.cz/web/EE/images/vodni.gif>>.
- [45] Větrná elektrárna. Dostupné z WWW: <http://www.energetickyporadce.cz/data/sharedfiles/Ilustracni-obrazky/obnovitelne-zdroje/vitr/popis_vetrne_elektrarny.jpg>.
- [46] Elektrárna na biomasu. Dostupné z WWW: <http://www.seas.sk/_cms/_files/822/schema_biomasa.htm>.
- [47] Geotermální elektrárna. Dostupné z WWW: <<http://www.energyweb.cz/web/EE/images/geotermalni2.gif>>.
- [48] Elektrárna OTEC. Dostupné z WWW: <<http://www.ekobydleni.eu/obrazky/elektrarna-OTEC.jpg>>.
- [49] Palivový článek. Dostupné z WWW: <<http://scitoys.com/board/messages/5/1553.gif>>.
- [50] Akumulátorová baterie FLB 300. Dostupné z WWW: <http://www.electroshop.ru/upload/iblock/33f/fiamm_12_flb_300.jpg>
- [51] MS Excel 2003. Nápořveda

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1: Spektrální křivka [39].....	3
Obrázek 2: Solární kolektor [40].....	4
Obrázek 3: Ukázka parabolických zrcadel [41.42]	4
Obrázek 4: Konstrukce FV panelu [43].....	5
Obrázek 5: Ukázka vodní elektrárny [44]	8
Obrázek 6: Ukázka větrné elektrárny [45]	9
Obrázek 7: Elektrárna na biomasu [46].....	10
Obrázek 8: Geotermální elektrárna [47].....	11
Obrázek 9: Elektrárna OTEC [48].....	12
Obrázek 10: Schéma vodíkového akumulčního systému [12].....	18
Obrázek 11: Funkce elektrolyzéro [12].....	20
Obrázek 12: Funkce palivového článku [49].....	21
Obrázek 13: Schéma průtokové baterie [17].....	25
Obrázek 14: CAES systém [17]	26
Obrázek 15: Struktura běžného kondenzátoru (vlevo) a superkondenzátoru (vpravo)	27
Obrázek 16: Setrvačnick [18].....	28
Obrázek 17: Blokové schéma SMES [20].....	30
Obrázek 18: Srovnání typů skladování elektrické energie [15]	31
Obrázek 19: Laboratoř palivových článků	38
Obrázek 20: Sklad se dvěma svazky tlakových lahví.....	39
Obrázek 21: Rozvodná a redukční stanice provozních plynů s příslušenstvím.....	38
Obrázek 22: Pracoviště palivových článků	40
Obrázek: 23 PLC moduly.....	40
Obrázek 24: Ovládací dotykový displej PLC řídicího systému	40
Obrázek 25: Blokové schéma výroby vodíku z fotovoltaických panelů	42
Obrázek 26: Intenzita ozáření FV panelů.....	43
Obrázek 27: Výkon FV panelů při maximální intenzitě ozáření.....	44
Obrázek 28: Příkon pro elektrolyzér Hogen GC600	45
Obrázek 29: Výkon na vstupu střídače Sunny Island 4248.....	46
Obrázek 30: Výkon nabíječe Sunny Island Charger	46
Obrázek 31: Průběh napětí na bateriích.....	46
Obrázek 32: Výkon na fotovoltaických panelech	47
Obrázek 33: Blokové schéma spotřeby vodíku z tlakových lahví.....	50
Obrázek 34: Část úseku průběhu výstupního napětí při zátěži 1200 W	51
Obrázek 35: Blokové schéma výroby el. en. z vodíku přes modul palivových článků Nexa	53
Obrázek 36: Zatěžovací charakteristiky (bez vl. spotřeby) modulu pal. čl. Nexa Ballard.....	54
Obrázek 37: Teplotní závislost palivového článku na výkonu včetně vlastní spotřeby	54

Obrázek 38: DC zátěž Electronic load IT8514C	55
Obrázek 39: Spotřeba palivového plynu (H ₂) 0 - 1200W a 1200 - 0W	55
Obrázek 40: Křivky vlastní spotřeby modulu palivových článků Nexa.....	56
Tabulka 1: Srovnání vybraných typů akumulátorů [11].....	17
Tabulka 2: Přehled elektrochemických reakcí na palivových článcích [14]	22
Tabulka 3: Charakteristiky jednotlivých typů palivových článků [14]	22
Tabulka 4: Hodnoty k výpočtu	34
Tabulka 5: Matice Saatyho metody.....	35
Tabulka 6: Spočtené váhy kritérií	35
Tabulka 7: Seřazení vah kritérií	35
Tabulka 8: Vypočtená ideální metoda pomocí metody TOPSIS.....	36
Tabulka 9: Hodnoty intenzity ozáření FV panelů	43