ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Spojujeme elektrotechniku a informatiku

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

POROVNÁNÍ SOUČASNÝCH TECHNOLOGIÍ PRO AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE V SYSTÉMECH S OBNOVITELNÝMI ZDROJI ENERGIE

Autor práce: Vojtěch Knotek

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

Praha 2016

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou akumulace elektrické energie s ohledem na obnovitelné zdroje. Především je popsána akumulace energie pomocí sekundárních baterií.

Abstract

The bachelor thesis deals with the electrical energy accumulation with regard to renewable sources. Especially the accumulation of energy using secondary batteries is described.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Vojtěch Knotek**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Porovnání současných technologií pro akumulaci elektrické energie v systémech s obnovitelnými zdroji energie**

Pokyny pro vypracování:

1. Popište charakter vybraných zdrojů OZE s ohledem na vhodnost použití akumulace energie do elektrochemických systémů.
2. Definujte základní typy sekundárních bateriových systémů a uveďte jejich charakteristiky.
3. Popište další možnosti akumulace energie pro systémy s OZE .
4. Navrhněte doporučené kombinace zdroj-úložný systém a definujte jejich technické parametry.
5. Uveďte postupy testování baterií a určení základních doporučených parametrů pro testy s ohledem na použití v autonomních a hybridních systémech. Provedení vzorového testu.

Seznam odborné literatury:

[1] KEYHANI, Ali. Design of smart power grid renewable energy systems. Hoboken, N.J.: Wiley, 2011, xix, 565 p. ISBN 111800583x.
[2] REDDY, Thomas B a David LINDEN. Linden's handbook of batteries. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2011, 1 v. (various pagings). ISBN 9780071624213.
[3] Datové listy výrobců baterií, firemní literatura a zdroje v síti internet.

Vedoucí: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

Ing. Karel Dušek, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 8. 3. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 27. 5. 2016

Vojtěch Knotek

Obsah:

Úvod ... 6
1. Obnovitelné zdroje energie ... 6
1.1. Vodní elektrárny ... 9
1.2. Větrné elektrárny ... 11
1.3. Fotovoltaické elektrárny ... 13
1.4. Biomasa ... 17
2. Sekundární baterie ... 18
2.1. Lithium iontové akumulátory ... 20
2.1.1. $LiFePO_4$ (LFP) ... 21
2.1.2. $Li_4Ti_5O_{12}$ (LTO) ... 21
2.1.3. $LiNiMnCoO_2$ (NMC) ... 21
2.1.4. $LiMn_2O_4$ (LMO) ... 22
2.1.5. $LiCoO_2$ (LCO) ... 22
2.1.6. LiPo ... 22
2.2. Alkalické akumulátory ... 23
2.2.1. NiCd ... 23
2.2.2. NiMh ... 24
2.3. Olověné akumulátory ... 24
3. Další možnosti akumulace elektrické energie ... 25
3.1. Přečerpávací vodní elektrárny ... 25
3.2. CAES ... 27
3.3. Palivový článek ... 28
3.4. Setrvačník ... 31
3.5. Průtočné baterie ... 33
4. Akumulace energie z OZE ... 35
4.1. Akumulace energie z větrných elektráren ... 35
4.2. Akumulace energie z fotovoltaických elektráren ... 37
5. Testování baterií ... 39
5.1. Provedení vzorového testu ... 40
5.1.1. Zkouška kapacity ... 41
5.1.2. Měření vnitřního odporu ... 42
6. Závěr ... 43
7. Bibliografie ... 44

Úvod

Elektrickou energii doposud získáváme ze zásob, které jsou uloženy na zemi po několik set milionů let v případě uhlí nebo až miliardy let v případě radioaktivních látek. Tyto zdroje jsou však omezené a v budoucnu se lidstvo bude muset obejít bez nich. Dnes již díky fotovoltaice, větrným turbínám a jiným obnovitelným zdrojům sice není problém elektřinu v nemalém množství vyrobit, ale z hlediska potřeb energetiky narážíme zejména na potíže spojené s nevyzpytatelností a nerovnoměrnou výrobou obnovitelných zdrojů elektrické energie.

V současnosti jsou obnovitelné zdroje v ČR zastoupeny v energetickém mixu stále minoritně. Pokud se to v má v budoucnu změnit a obnovitelné zdroje mají konkurovat těm neobnovitelným, je třeba vyřešit otázky efektivního, ekonomického a spolehlivého způsobu akumulace elektrické energie. Existuje sice celá řada způsobů, jak energii ukládat, ale žádný, který by splňoval všechny tři výše zmíněné předpoklady. Nejčastěji narážíme na příliš vysoké investiční a provozní náklady.

V této práci se pokusím popsat známé způsoby ukládání elektrické energie a to zejména s ohledem na charakteristiku jednotlivých zdrojů. Největší část pak věnuji použití sekundárních baterií. V první kapitole definuji základní obnovitelné zdroje a popíšu jejich specifika ovlivňující návrh akumulačního systému. Ve druhé kapitole pak rozeberu nejznámější druhy sekundárních baterií. Ve třetí kapitole se budu zabývat ostatními způsoby akumulace energie, včetně definování jejich zásadních nedostatků a předností. Ve čtvrté kapitole pak vytvořím návrh bateriového systému pro nejzákladnější modelové situace výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů. V poslední kapitole popíšu základní metody testování sekundárních baterií a otestuji vzorek na dva nejzákladnější parametry - kapacitu a vnitřní odpor.

1.Obnovitelné zdroje energie

Za obnovitelný zdroj energie (dále jen OZE) je obecně považován takový zdroj, který je člověkem téměř nevyčerpatelný a má schopnost se obnovovat. Obecně definice obnovitelného zdroje dle zákona č. 17/1992 Sb. § 7, odstavec 2 zní: „Obnovitelné přírodní zdroje mají schopnost se při postupném spotřebovávání částečně nebo úplně obnovovat, a to samy nebo za přispění člověka. Neobnovitelné přírodní zdroje spotřebováváním zanikají.“

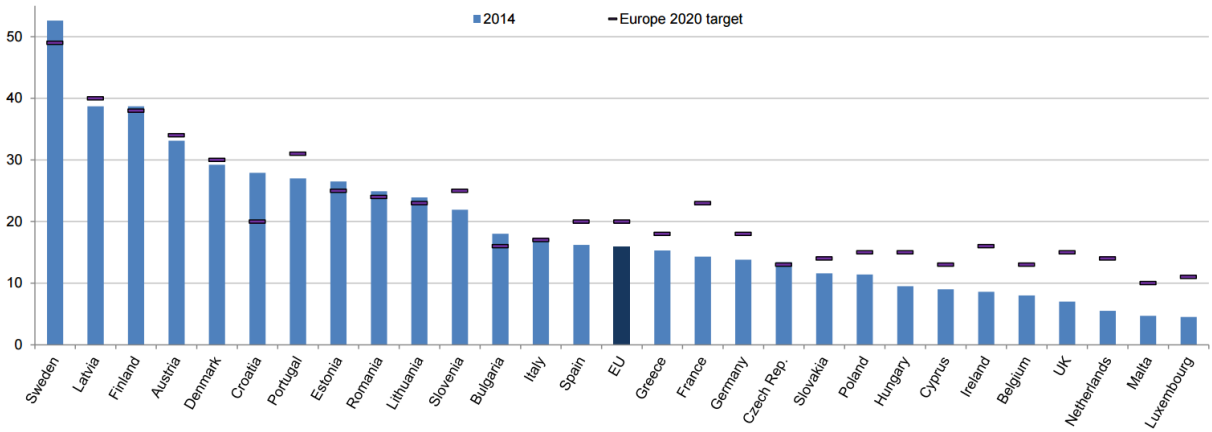
Ze samotné fyzikální podstaty zákona zachování energie vždy dochází při získávání jakékoliv energie pouze k přeměně energie. Většina OZE tedy využívá energie dopadajícího slunečního záření, která vzniká uvnitř Slunce díky přeměně vodíku na helium pomocí procesu zvaného termojaderná fúze. Přestože na Zemi dopadá pouze malý zlomek celkového výkonu Slunce (45 miliardtin), tak je tako hodnota rovna přibližně 1,4 $kW \cdot m^{-2}$ (tzv.

Sluneční konstanta). I energie Slunce se samozřejmě časem vyčerpá, ale vzhledem k odhadované délce života Slunce 5 až 7 miliard let je tento časový horizont tak vzdálený, že lze považovat OZE pro lidstvo jako téměř nevyčerpatelné.

Historicky byly OZE využívány dlouhou dobu před nástupem tzv. fosilních paliv. Již od pravěku lidé využívali tepelnou energii při spalování biomasy. Později energii větru používali při plavbě na plachetnicích nebo pohonu větrných mlýnů, vodní energii při pohánění různých strojů a splavování dřeva po říčních tocích. Od 19. století s nástupem průmyslové revoluce však tyto zdroje přestaly být schopny pokrýt potřeby po energii a došlo k rapidnímu nárůstu využívání fosilních paliv. Tento stav přetrvává do současnosti, ale stejně tak jako bylo lidstvo donuceno využívat energii z fosilních paliv, bude i v budoucnu nuceno najít jiné způsoby, které zajistí poptávku po energiích, až se fosilní paliva vyčerpají. Odhady zásob neobnovitelných zdrojů se velmi liší, ale obecně se očekává vyčerpání těchto zásob v horizontu několika stovek let.

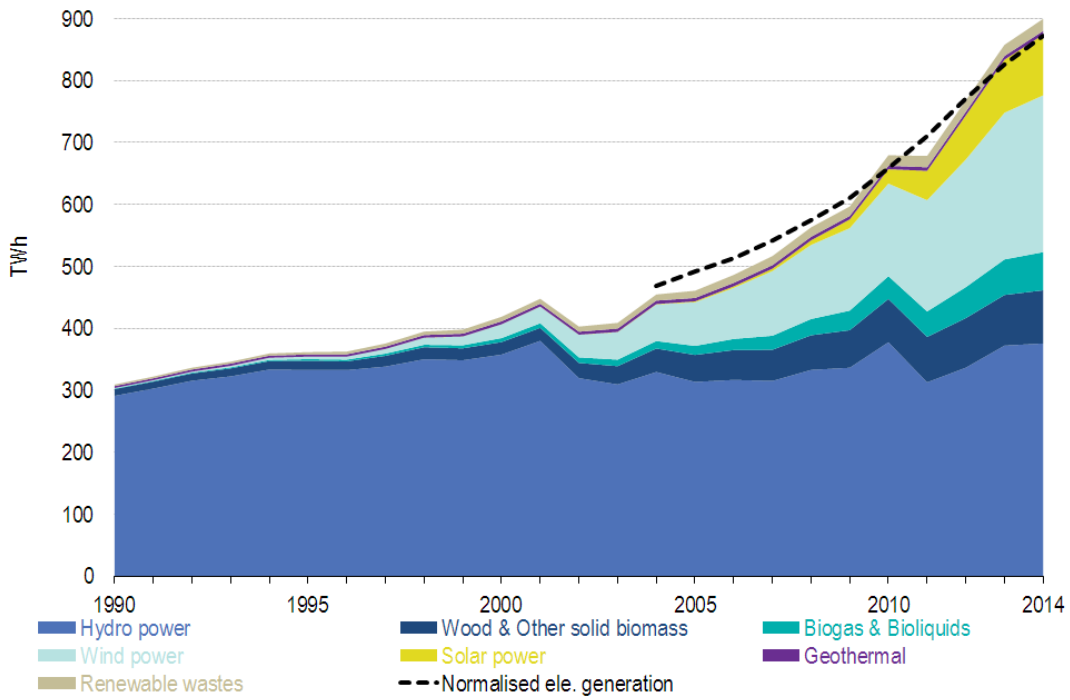
Velmi častým argumentem pro odklon od fosilních paliv směrem k OZE ještě před jejich vyčerpáním jsou klimatické změny. Při spalování fosilních paliv totiž vzniká oxid uhličitý, který je považován za hlavní skleníkový plyn. Vyšší koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře pak způsobuje zvýšení teploty na Zemi, což vede k mnoha sociálním, ekologickým i hospodářským problémům. [1]

Česká republika se zavázala přijetím evropské směrnice 2009/28/EC, že do roku 2020 budou OZE vykrývat 13% celkové spotřeby elektrické energie. Závazek pro celou EU je 20% podíl OZE na celkové evropské spotřebě v roce 2020. Jednotlivé státy tedy mají vyjednané různé podmínky reflektující přírodní i ekonomické možnosti každého státu. Z následujícího grafu je patrné, že ČR již v předstihu svůj závazek splnila.

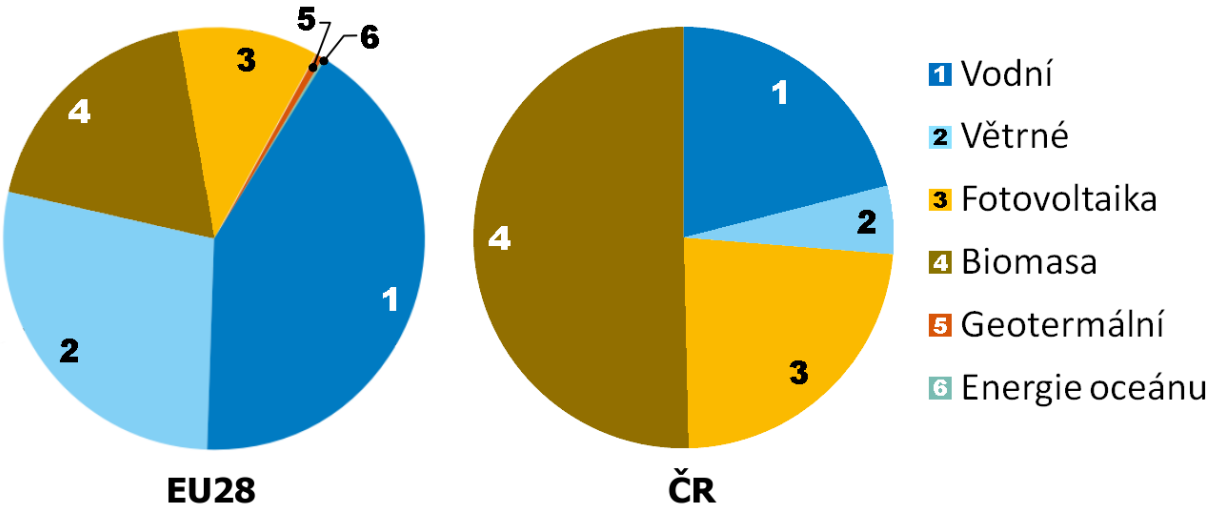


Graf 1.1: Závazek podílu OZE z celkové vyrobené elektřiny pro jednotlivé členské země EU pro rok 2020 s naznačeným průběhem v roce 2014, zdroj: Eurostat

Neméně důležitým argumentem pro OZE je energetická soběstačnost. V současnosti je přibližně polovina elektrické spotřeby vykrývána ze surovin dovážených mimo EU a dle současných odhadů se toto číslo má zvýšit až na 70%. [2] V současné době je zhruba polovina spotřeby zemního plynu v EU pokryta dodávkami z pouhých tří zemí (Rusko, Norsko a Alžír). Podle současných tendencí by se závislost na dovozu zemního plynu během příštích 25 let zvýšila na 80%. [2]



Graf 1.2: Produkce elektrické energie v zemích EU z OZE, zdroj: Eurostat



Graf 1.3: Podíly jednotlivých složek na celkové energii získané z OZE v roce 2014
Zdroj dat: Eurobserver, ERÚ

Z grafů 1.2 a 1.3 jsou patrná následující fakta:

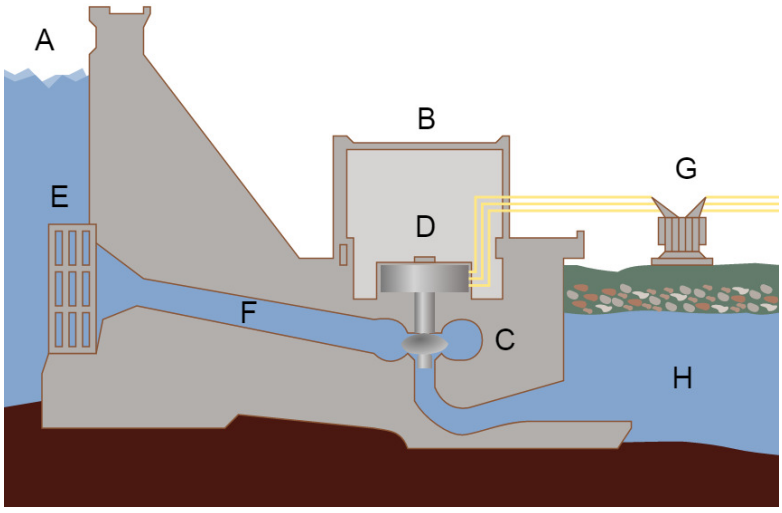
- vodní elektrárny:
  - stále mají v EU nejvyšší podíl mezi OZE
  - výkon vodních elektráren stagnuje již dlouhou dobu
- větrné elektrárny:
  - za posledních deset let zvýšily svůj výkon v EU několikanásobně
  - mají druhý nejvyšší výkon z OZE v EU
  - v ČR je podíl ve srovnání s EU malý
- fotovoltaické elektrárny:
  - přestože má ČR spíše podprůměrné podmínky pro fotovoltaiku (ve srovnání s EU), tak její podíl v celkovém mixu je přibližně dvojnásobný
- biomasa:
  - produkty biomasy tvoří v ČR přibližně polovinu výroby elektřiny z OZE

1.1. Vodní elektrárny

Vodní elektrárny jsou zařízení přeměňující potencionální energii vody na elektrickou energii. Voda stékající z vyšší nadmořské výšky rozpohybuje vodní turbínu, která je obvykle na společné hřídeli s elektrickým generátorem vyrábějící elektrický proud. Z hlediska využití vodního toku existuje několik druhů vodních elektráren:

- průtočné - voda proudí přes turbínu bez jakéhokoliv hromadění v nádrži
- akumulační - voda je zadržována v nádrži během nízkého odběru a elektřina je dodávána pouze v době vysokého odběru
- přečerpávací - slouží pouze jako stabilizátor elektrické sítě, více v kapitole 3.1
- přílivové - využívá energie mořského přílivu

Přestože je elektrická energie získávána přeměnou z potencionální energie vody, tak u průtočných a akumulačních vodních elektráren tato energie vznikla jako následek koloběhu vody, ke kterému dochází účinkem sluneční energie.



Popis obrázku:

A - hladina přehradní nádrže
B - budova elektrárny
C - turbína
D - generátor na společné ose s turbínou
E - česle a uzávěr
F - přívodní kanál
G - transformátor
H - odtok

Obr. 1.1.1: Řez vodní elektrárnou [3]

Celkový výkon vodní elektrárny je závislý na průtoku vody a výškovém rozdílu. Obvykle je třeba vybudovat umělý výškový rozdíl ve formě jezu nebo přehrady. Výkon turbíny lze spočítat na základě následujícího vztahu:

$$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot h \cdot \mu$$

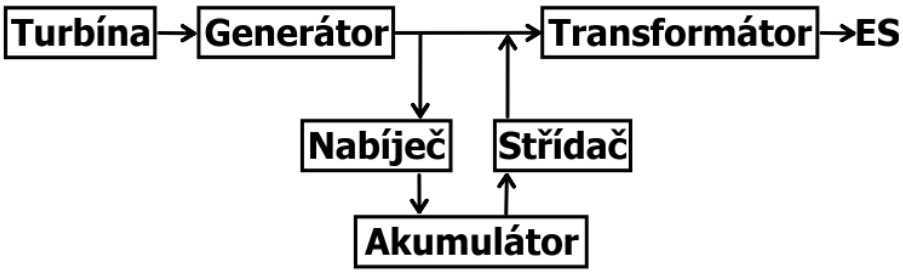
kde: $P - \text{výkon}\ [W],\ \rho - \text{hustota vody}\ [kg \cdot m^{-3}],\ Q - \text{průtok}\ [m^3 \cdot s^{-1}],$

$g - \text{tíhové zrychlení}\ [m \cdot s^{-2}], h - \text{výškový rozdíl}\ [m], \mu - \text{účinnost turbíny}\ [-]$

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1, v ČR je podíl vyrobené energie ve vodních elektrárnách nižší, než je průměr EU. Důvodem jsou především nízké spády našich hor spolu s jejich relativně malým průtokem. Například Rakousko díky své výhodné horské poloze pokrývá 67% své spotřeby z vodních elektráren. [4] Naproti tomu existuje řada evropských zemí, které mají buď úplně, nebo téměř nulový podíl vyrobené energie z vodních zdrojů. Je to například Belgie, Dánsko, Estonsko, Maďarsko, Malta a Nizozemsko. [4] Nespornou výhodou vodních elektráren je možnost rychlého náběhu na svůj maximální výkon a také možnost spuštění zdroje tzv. ze tmy.

V ČR sice ještě není vyčerpán veškerý potenciál vodních elektráren, avšak ten co zbývá, již zpravidla není ekonomicky tak výhodný. Jedná se především o lokality s nízkými spády. Další možností jak zvýšit celkový výkon vodních elektráren je zmodernizování zastaralých malých vodních elektráren (dále jen MVE), které byly zbudovány mezi léty 1920 až 1950. Jedná se o relativně vysoké číslo, protože těchto elektráren je mezi MVE přibližně 60% a celkově by tedy bylo možné zvýšit výkon o 12,5 MW, což činí nevyužitý potenciál okolo 100 000 MWh ročně. [2]

Napojení vodních elektráren na sekundární bateriový systém není možné generalizovat vzhledem k rozdílnému napětí generátorů. Generátory u velkých vodních elektráren pracují na výrazně vyšším napětí než například u MVE, které se obvykle připojují k rozvodům 400 V bez transformátoru. Smysl dává napojení akumulátoru k vodní elektrárně pouze v případě průtočných elektráren, čímž tato elektrárna získá výhodu regulace výkonu. Výkon vodních elektráren lze jasně predikovat a nepředstavuje z hlediska napojení na energetickou soustavu větší komplikace. Blokové schéma vodní elektrárny s napojením na sekundární bateriový systém může vypadat takto:



Obr. 1.1.2: Blokové schéma zapojení akumulátoru a vodní elektrárny

Výhodou takovéhoto zapojení je ušetření nákladů za jeden další transformátor, který by byl potřeba v případě úplně nezávislého energetického úložiště a pak také snížení ztrát, ke kterým by došlo v případě transformace napětí (transformátor mezi generátorem a ES + ES a nabíječem).

1.2. Větrné elektrárny

Větrné elektrárny využívají jako zdroj energie proudění vzduchu (větru), který předává svou kinetickou energii větrné turbíně roztáčející elektrický generátor. Základní příčina pohybu vzduchu je rozdílný tlak na planetě, způsobený nerovnoměrným zahříváním zemského povrchu. Opět je tedy prvotním zdrojem energie sluneční záření. Čím větší je rozdíl v tlaku, tím rychleji vítr vane.

Rozdíly v tlaku vzduchu jsou způsobeny mnoha faktory. Základním globálním principem je všeobecná cirkulace atmosféry, kdy jsou více nahřívány oblasti s vyšší intenzitou slunečního záření. Tyto oblasti se mění v závislosti na ročním období. Mimo tuto hlavní cirkulaci dochází k rozdílnému prohřátí vzduchu také díky fyzikálním odlišnostem jednotlivých lokalit. Kupříkladu pouště se zahřívají na vyšší teploty než například zalesněná krajina. Směr proudění však neovlivňují pouze rozdíly v tlaku, ale i Coriolisova síla způsobená rotací Země. Na severní polokouli je vítr stáčený vždy vpravo ve směru pohybu. Do tohoto už tak složitého mechanismu zasahují další atmosférické jevy a členitost terénu. I přes veškeré úsilí predikovat chování větru do budoucna je stále větrná energie jeden z nejvíce nepředvídatelných zdrojů energie.

Teoretický výpočet výkonu proudícího vzduchu vychází ze vztahu kinetické energie vzduchu:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2}{t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot A \cdot v \cdot t \cdot \rho \cdot v^2}{t} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3$$

kde: $P - \text{výkon } [W], E - \text{kinetická energie vzduchu } [J], t - \text{čas} [s],$

$m - \text{hmotnost proudícíhovzduchu} [kg], v - \text{rychlost vzduchu } [m \cdot s^{-1}],$

$A - \text{plocha přes kterou vzduch prochází } [m^2], \rho - \text{hustota vzduchu } [kg \cdot m^{-3}]$

Samozřejmě nelze využít veškerou kinetickou energii uloženou ve vzduchu (a to ani teoreticky). Na základě předchozího vztahu a odečtení kinetické energie výstupního vzduchu vypočetl německý fyzik roku 1919 teoretickou účinnost jako vztah:

$$P = c_P \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} \cdot \Pi \cdot \frac{r^2}{2}$$

kde: $P - \text{výkon } [W],\ {}^{*}c_P - \text{součinitel výkonnosti} [-], \rho - \text{hustota vzduchu } [kg \cdot m^{-3}],$
$v - \text{rychlost vzduchu } [m \cdot s^{-1}], r - \text{poloměr kruhové plochy } [m]$

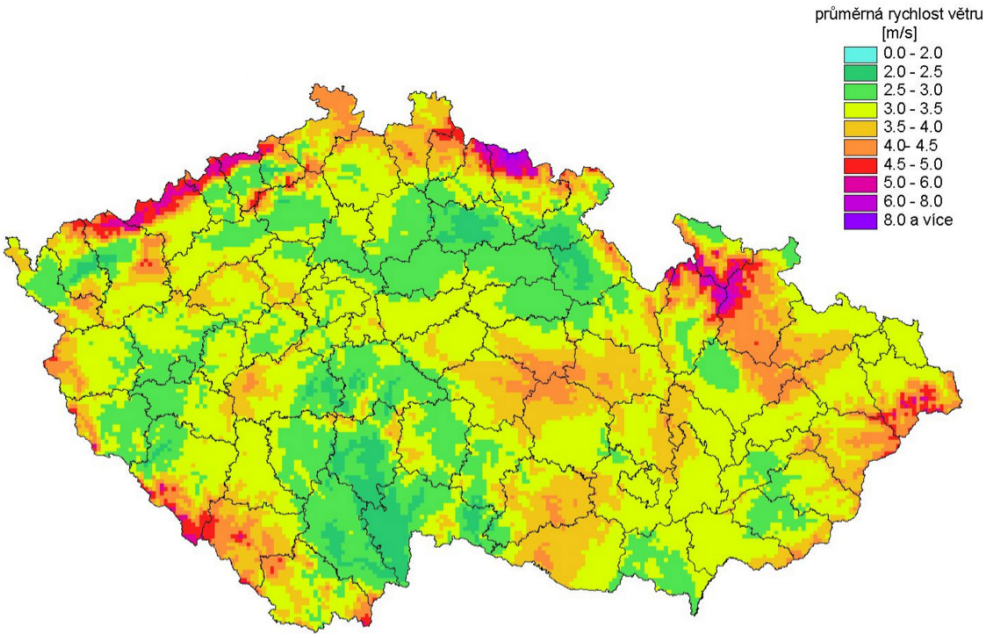
${}^{*}c_P$ je v ideálním případě rovný číslu 0,59

Součinitel výkonnosti závisí na konstrukčním uspořádání turbíny (natočení lopatek, počet lopatek apod.) a na rychlosti proudění vzduchu. Závislost na rychlosti větru notně vede k velkým rozdílům mezi instalovaným výkonem a výkonem skutečným, protože rychlost větru je velice proměnlivá veličina. V ČR se pohybuje tento rozdíl, nazývaný jako koeficient ročního využití, okolo 20%. Tuto hodnotu lze jednoduše vypočítat na základě dat ERÚ [5] a následujícího vzorce:

$$k = \frac{W}{P \cdot t} = \frac{476\,544\ \text{MWh}}{278\ \text{MW} \cdot 8760\ \text{h}} = 0{,}196 \approx 20\%$$

kde: W – brutto výroba elektřiny větrných elektráren za rok 2014 [Wh],
P – celkový instalovný výkon v ČR [W], t – počet hodin za rok [h]

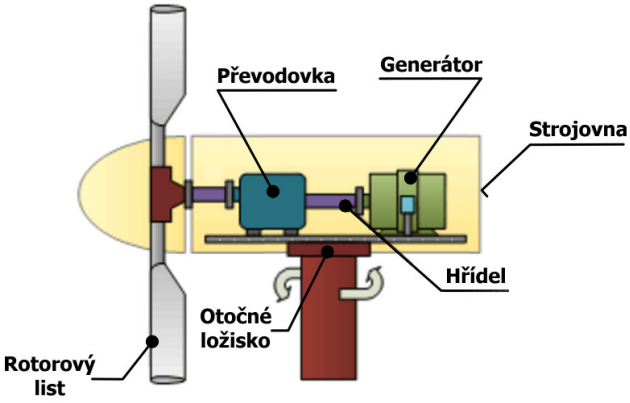
Průměrná rychlost větru, která přímo ovlivňuje výši vyrobené energie je velmi závislá na konkrétní lokalitě. V ČR jsou nejvýhodnější lokality pro stavbu větrných elektráren zejména v horských oblastech Krušných hor, Krkonoš a Jeseníků. Nadprůměrné podmínky také panují na Vysočině, jak je patrné z obrázku 1.2.1. V celoevropském měřítku jsou nejpříhodnější podmínky pro větrné elektrárny soustředěny okolo Baltského a Severního moře.



Obr. 1.2.1: Průměrná rychlost větru ve výšce 10 m, zdroj: ÚFA AV ČR

Samotná přeměna kinetické energie vzduchu na elektrickou energii probíhá působením aerodynamických sil působících na větrnou turbínu, která tak získává mechanickou energii a ta je pomocí generátoru přeměněna na elektřinu. Existuje samozřejmě celá řada různých principů větrných elektráren, ale v praxi se v hromadném měřítku rozšířily pouze elektrárny vztlakové s vodorovnou osou rotace. Rotorové listy jsou

zde tvarované podobně jako křídla letadel a vytvářejí tak vždy na jedné straně větší vztlakovou sílu, což vede k otáčení rotoru. Obvykle jsou větrné elektrárny osazeny třemi listy, což je kompromis mezi investičními náklady a efektivitou (dva listy mají příliš malou efektivitu a čtyři listy jsou příliš nákladné). Tyto listy obvykle mají zároveň možnost brzdit elektrárnu při vysokých rychlostech větru a zabránit tak poničení pohyblivých částí elektrárny. Brzdění probíhá natáčením listů ke směru větru.



Obr. 1.2.2: Řez větrnou turbínou s asynchronním generátorem, Zdroj: Wikipedia

Uvnitř strojovny se obvykle nachází převodovka a elektrický generátor. Převodovka převádí nízké rychlosti rotoru na výrazně vyšší rychlosti, které jsou potřebné pro efektivní fungování generátoru. Bohužel je nejčastějším zdrojem poruch na větrné elektrárně, a proto vznikla koncepce větrných elektráren se synchronním generátorem, které převodovku nepotřebují. Elektrárny s převodovkou využívají asynchronního generátoru.

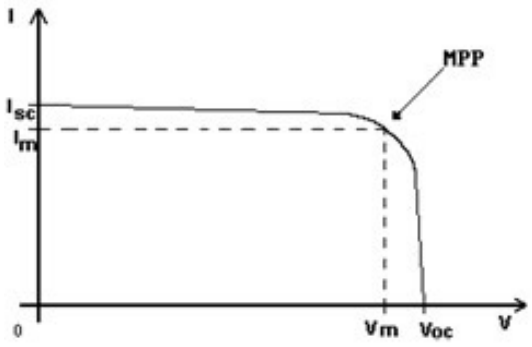
Mezi největší přednosti výroby elektrické energie pomocí větru patří relativně malá zabraná plocha ve srovnání s fotovoltaikou a biomasou. Tato plocha pak může být využita například pro zemědělské účely. Dále jsou to hlavně nejnižší náklady v přepočtu na kWh ze všech OZE v případě elektráren umístěných na pevnině (evropský průměr). [6] Největší nevýhodou je kolísání a špatná predikovatelnost výroby, mechanické namáhání jednotlivých komponent a s tím související náklady na údržbu. Kromě toho například vytvářený hluk limitující použití větrných turbín blízko obytné zástavby.

1.3. Fotovoltaické elektrárny

Výroba elektrické energie za pomocí fotovoltaiky využívá fotoelektrického jevu na polovodičových fotodiodách. Dopadající sluneční záření předává energii elektronům, které tak získávají dostatek energie, aby překonaly zakázaný pás a dostaly se z valenční vrstvy do vodivostní. Odtud jsou pomocí elektrod odváděny do elektrického obvodu a vytvářejí tak elektrický stejnosměrný proud. Problematika polovodičů je natolik obsáhlá, že není v možnostech této práce detailně popsat fyzikální princip, a proto se dále zaměřím spíše na samotná specifika fotovoltaiky.

Jednotlivé fotodiody se nazývají fotovoltaické články. Ty se skládají pro dosažení vyššího napětí a proudu do fotovoltaických panelů. Soubory panelů pak vytváří fotovoltaické (dále jen FV) pole. Každý panel má svoje specifické vlastnosti definované několika důležitými parametry:

- výkon (P)
  - udává jmenovitý výkon při stanovených podmínkách (intenzita záření 1000 $W \cdot m^{-2}$, teplota 25 °C, Air Mass 1,5)
  - jednotkou je tzv. wattpeak - Wp
- proud nakrátko (I_{SC})
  - proud, který prochází panelem při zkratování fotovoltaického panelu
- napětí naprázdno (U_{OC})
  - napětí měřitelné na FV panelu při odpojení jakékoliv zátěže
- napětí a proud v bodě maximálního výkonu (U_{MPPT} a I_{MPPT})
  - hodnoty proudu a napětí, které definují, ve kterém bodě pracuje FV panel na svém provozním optimu
  - platí pro hodnotu výkonu P (tzn. $P = U_{MPPT} \cdot I_{MPPT}$)



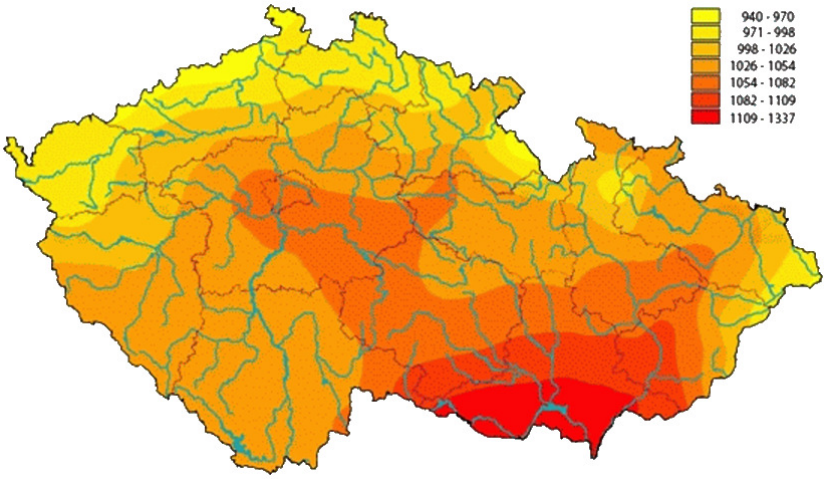
Obr. 1.3.1: VA charakteristika FV panelu

Existuje celá řada typů fotovoltaických panelů, z nichž nejrozšířenější jsou krystalické na bázi křemíku a tenkovrstvé. Krystalické se dále dělí dle výrobního postupu na monokrystalické a polykrystalické. V současnosti je rozdíl mezi oběma krystalickými typy pouze ve výrobním postupu, kdy monokrystal vzniká Czochralského metodou tažením z taveniny a polykrystal odléváním do formy, a samotné fyzikální a elektrotechnické vlastnosti jsou téměř úplně srovnatelné. Tenkovrstvé technologie jsou spíše na ústupu vzhledem k jejich nižší efektivitě.

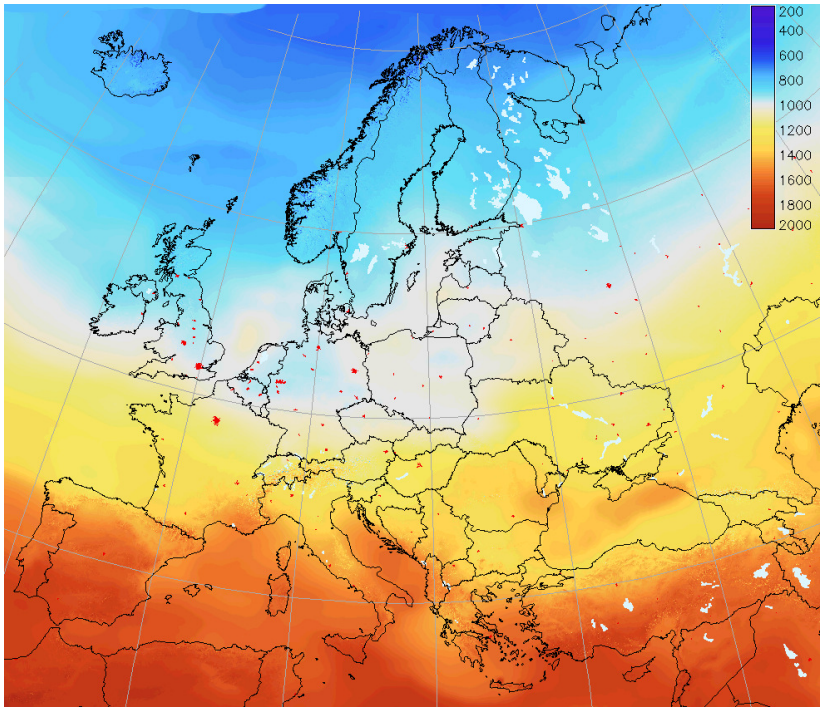
Maximální účinnost přeměny světelné energie na elektrickou popisuje tzv. Shockleyův–Queisserův limit. Tento limit závisí na materiálu (resp. na šířce jeho zakázaného pásu) a spektru dopadajícího záření. Pro nejrozšířenější polovodičový materiál používaný ve FV panelech - křemíku, je maximální efektivita rovna přibližně 32%. V současnosti běžně prodávané křemíkové FV panely pracují s efektivitou okolo 16-20%.

Solární články je nutné ochránit vůči vlivům okolního prostředí a mechanickému poškození. Proto se tyto články umísťují mezi ochrannou vrstvu ze skla a polymeru a tento „sendvič“ je chráněn nejčastěji hliníkovým rámem.

Sluneční záření dopadá s různou intenzitou nejen v různých místech Evropy, ale rozdíly lze pozorovat i v rámci ČR. To je patrné z obrázku 1.3.1 a 1.3.2.

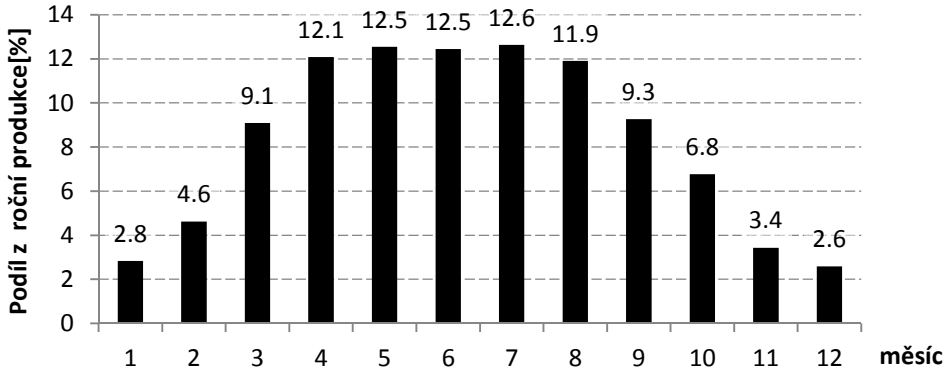


Obr. 1.3.1: Roční úhrn horizontálního slunečního záření v ČR [kWh·m^{-2}], Zdroj: Solární Novinky

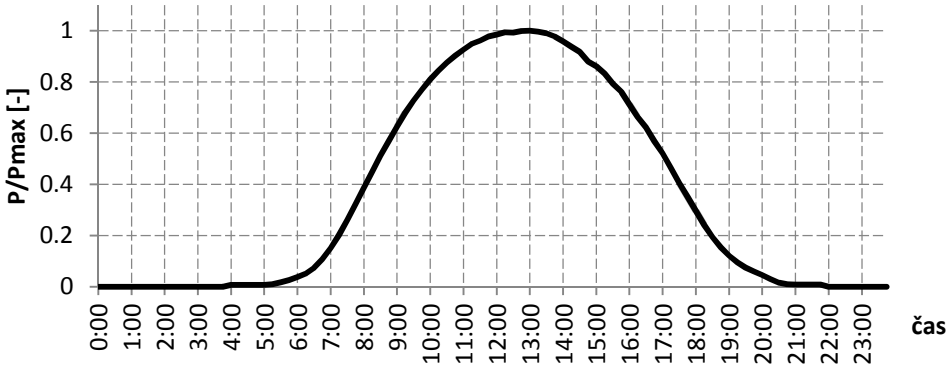


Obr. 1.3.2: Roční úhrn horizontálního slunečního záření v Evropě [kWh·m^{-2}], Zdroj: PV-GIS

Pro správný návrh jakéhokoliv FV systému je třeba znát rozvržení výkonu v čase a to jak v horizontu měsíců, tak během dne:



Graf 1.3.1: Průměrný procentuální podíl z roční elektrické produkce FV instalace pro sklon 32°, Zdroj dat: PV-GIS



Graf 1.3.2: Typický průběh výkonu během dne pro FV instalaci, Zdroj dat: ČEPS

Mezi největší výhody fotovoltaiky patří absence pohyblivých částí a s tím spojená dlouhá životnost FV panelů a nízké provozní náklady. Mezi nevýhody lze počítat vysokou proměnlivost výkonu v závislosti na počasí a prostorovou náročnost FV elektrárny.

1.4. Biomasa

Jako posledním běžně rozšířeným druhem OZE v ČR jsou produkty biomasy. Pod tímto pojmem se skrývají všechny látky tvořící těla organismů - rostlin, živočichů, hub, bakterií a sinic. Nejčastěji se energie získává spalováním paliv rostlinného původu. Vzhledem k tomu, že každý organismus potřebuje pro svůj život světlo a teplo, tak je opět prapůvodcem získané energie sluneční záření.

V ČR se elektřina získává z biomasy buď přímo spalováním ve formě dřevěných briket, pelet, štěpky, dřevního odpadu atd. nebo výrobou bioplynu a jeho následném spalování. Ve druhém případě slouží biomasa pouze jako meziprodukt při výrobě bioplynu. V roce 2014 se vyrobilo spalováním biomasy 2 TWh a spalováním bioplynu 2,6 TWh elektrické energie. Pro představu se tato energie rovná více jak 15% výroby v JE v ČR. [5]

Rostliny pěstované pro energetické účely vynikají zejména snadným výsevem a krátkým vegetačním obdobím. Konkrétně se jedná o rychle rostoucí dřeviny (například topol), obiloviny, olejnaté rostliny a byliny (konopí, šťovík).

Výroba bioplynu probíhá přeměnou organických látek bez přístupu vzduchu za vzniku metanu a oxidu uhličitého. Jako zdroje bioplynu jsou nejčastěji využívány vedlejší zemědělské produkty (kejda, hnůj) nebo odpadní materiály například v čistírnách odpadních vod. Elektrická energie se vyrábí v kogeneračních jednotkách společně s teplem použitým pro vytápění.

Při spalování biomasy popř. výrobě bioplynu se samozřejmě uvolňuje oxid uhličitý, ale zhruba stejné množství CO_2 bylo navázáno na biomasu během jejího života a tak je, při zohlední celého procesu, bilance vypouštěného CO_2 do ovzduší v podstatě nulová. Nepatrný je rovněž obsah oxidů síry vypouštěných do ovzduší (ve srovnání například s uhlím) a tento obsah lze řídit úpravou teploty spalování.

Výhodou využití biomasy je především využívání odpadů, dostupnost technologií a vysoká decentralizace výroby. Nevýhodou je nízká účinnost při výrobě elektřiny, náklady spojené s výrobou, dopravou a skladováním paliva. Ve srovnání s ostatními druhy OZE je biomasa jediným druhem, kde je třeba palivo vyrábět. Zároveň však je možné toto palivo spalovat přesně v době, kdy je vysoká poptávka po elektrické energii a akumulační zařízení elektrické energie tak není třeba.

2. Sekundární baterie

Tento druh baterií je možné, oproti primárním, opětovně nabít a ukládat tak do nich elektrickou energii. Elektrická energie se při nabíjení přeměňuje na energii chemickou. Existuje celá řada materiálů používaných pro jednotlivé části baterií, ale v rámci této práce se zaměřím spíše na samotné parametry jednotlivých druhů sekundárních baterií.

Velikou výhodou sekundárních baterií je to, že při přeměně mezi elektrickou a chemickou energií nedochází k vysokým ztrátám. Důvodem je to, že se jedná o přímou přeměnu bez dalších ztrát, což je v kontrastu například s tepelnými elektrárnami, kde dochází v tepelném cyklu k velmi vysokým ztrátám.

Kromě rozdělení podle chemického složení lze baterie dále rozdělit dle tvaru (prizmatické, cylindrické, knoflíkové, pytlíkové) a dle vnějšího materiálu (zejména kovy a plasty).

V souvislosti se sekundárními bateriemi se lze setkat s těmito důležitými pojmy:

SoC - *State of Charge* - veličina popisující stav nabití, SoC 100% značí plně nabitou a 0% plně vybitou baterii

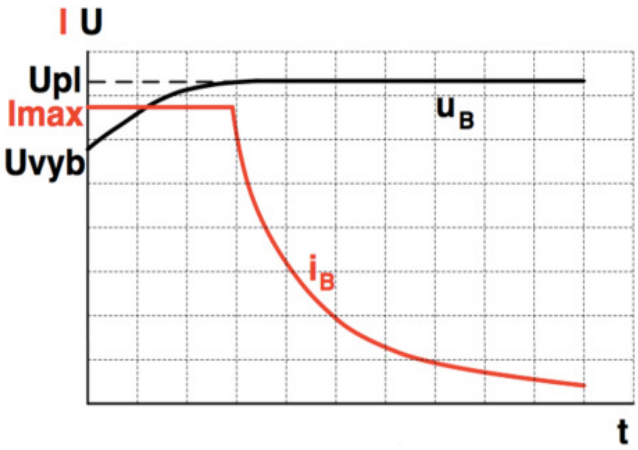
DoD - *Depth of Discharge*
- veličina popisující průměrnou hloubku vybíjení
- například Li-Ion akumulátory není výhodné vybíjet až na minimální napětí, protože při vybíjení do vyššího napětí sice odebereme méně energie, ale výrazně se zvýší životnost baterie
- občas je tato veličina chápána jako inverzní k SoC

Technologie	LFP	LTO	NCA	NMC	LMO	LCO	NiCd	NiMH	Pb
Chemický vzorec katody	$LiFePO_4$	$Li_4Ti_5O_{12}$	$LiNiCoAlO_2$	LiNiMnCoO	$LiMn2O_4$	$LiCoO_2$	$2Ni(OH)_2$	NiO(OH)	$PbSO_4$
Nominální napětí článku [V]	3.2	2.4	3.6	3.7	3.7	3.6	1.2	1.2	2.1
Energetická hustota [Wh/kg]	90-110	50-70	200-260	150-210	100-150	150-200	40-60	60-120	30-40
Energetická hustota [Wh/dm^3]	200-240	110-160	440-550	320-440	220-300	310-420	50-150	140-300	60-75
Cyklovatelnost [počet cyklů]	2000-4000	6000-10000	500	1000-2000	300-700	500-1000	2000	500-1000	500-800
Minimální napětí [V]	2.5	1.7	3	2.5	2.5	2.5	0	0	1.75
Maximální napětí [V]	4	2.8	4.2	4.2	4.2	4.2	1,4	1,4	2,3-2,45 (dle typu)
Maximální proudová zatížitelnost	3C	15C	1C	3C	3C	1C	různé (<2C)	různé (<2C)	různé

Tab. 2.1: Základní parametry jednotlivých druhů sekundárních baterií

2.1. Lithium iontové akumulátory

V současnosti jsou Li-Iontové (dále Li-Ion) akumulátory považovány za nejperspektivnější technologii mezi sekundárními bateriemi. Vynikají nejdelší životností, ale bohužel také vysokou cenou. Ta se však u většiny druhů každým rokem snižuje a tak lze očekávat pronikání těchto baterií do stále většího množství aplikací. Každá Li-Ion technologie má svá specifika a předurčuje každý druh pro trochu jinou aplikaci. Elektromobila kupříkladu vyžaduje baterie s vysokou energetickou hustotou a schopností dodávat vysoké proudy, energetické akumulační systémy zase vyžadují především dlouhou životnost a spolehlivost.



Obr. 2.1.1: Nabíjecí charakteristika Li-Iontových akumulátorů, Zdroj: oenergetice.cz

Nabíjení Li-Iontových akumulátorů probíhá ve dvou fázích - CC a CV. V první fázi tzv. CC (=constant current) dochází k nabíjení stálým proudem a to až do doby dosažení maximálního nabíjecího napětí. Poté nabíječ snižuje nabíjecí proud tak, aby napětí článku zůstalo během nabíjení konstantní - CV (=constant voltage).

Vzhledem k náchylnosti těchto akumulátorů na poničení při přebití a podbití je naprosto nepostradatelnou součástí každého Li-Ion bateriového systému vhodné ochranné zařízení. To se nejčastěji označuje jako BMS, což je zkratka anglických slov *battery management system*. Existuje celá řada BMS - od nejjednodušších za pár stokorun až po sofistikované za desítky tisíc korun. Nejjednodušší dokážou pouze odpojit baterii při nízkém či vysokém napětí na článku. Nejdražší jsou schopny zohlednit mnoho parametrů ovlivňující fungování baterií (teplotu, SoC, vybíjecí proudy apod.), mají možnost nastavení mnoha veličin a podávají velice kvalitní monitoring, díky němuž je možné posoudit skutečný stav jednotlivých článků. Dále jsou schopny balancování jednotlivých článků (vyrovnávání napětí na stejnou úroveň) a to buď pasivně či aktivně. Pasivní balancování znamená pouze vybíjení článků s nejvyšším napětím (nejčastěji do odporu). Aktivní balancování přesouvá energii z jednoho článku do druhého a nedochází tak při balancování ke zbytečným ztrátám.

2.1.1. $LiFePO_4$ (LFP)

Lithium-železo-fosfátový akumulátor je typ lithium-iontového akumulátoru používající jako katodový materiál sloučeninu $LiFePO_4$. Tento typ akumulátoru má sice nižší energetickou hustotu než v dnešní době nejrozšířenější lithium-iontový akumulátor NMC nebo třeba $LiCoO_2$ a nižší nominální napětí článku, ale je zato bezpečnější a má delší životnost.

Životnost, bezpečnost a cena jsou hlavní výhody předurčující tuto technologii pro využití v elektromobilismu a pro ukládání energie například na autonomních nebo hybridních systémech. Nízká cena tohoto z lithium-iontového akumulátorů je způsobena zejména masovou výrobou v Číně v posledních letech.

2.1.2. $Li_4Ti_5O_{12}$ (LTO)

Anoda LTO baterie obsahuje vždy prvky lithia, titanu a kyslíku a vyrábí se ve dvou základních chemických sloučeninách - $Li_4Ti_5O_{12}$ (častější) a Li_2TiO_3. Nominální napětí článku je 2,4 V, což je nejméně z běžně rozšířených druhů lithiových akumulátorů. Tento druh má několik velmi zásadních výhod:

- baterie je možné zatěžovat velmi vysokými proudy (výrobci deklarují až 15C)
- životnost (až 10000 cyklů při 80% DOD)
- vysoká bezpečnost
- vynikající vlastnosti i při velmi nízkých teplotách (při -30°C pokles pouze na 80% kapacity)

Nevýhodou je nižší energetická hustota ve srovnání s ostatními li-ion bateriemi, nižší napětí na článek a z toho plynoucí nutnost většího počtu článků pro dosažení požadovaného napětí. Například pro 12V systém je třeba složit sérii z pěti článků (u LFP stačí pouze čtyři).
Z výhod vypsaných výše se přímo nabízí využití této technologie v elektromobilismu. Největším úskalím bránící rozšíření této technologie je v současnosti vysoká cena, nižší energetická hustota a v neposlední řadě také omezený výběr příslušenství jako jsou například BMS a nabíječky.

2.1.3. $LiNiMnCoO_2$ (NMC)

Technologie, na kterou sází v současnosti většina velkých výrobců v čele se společnostmi jako je Panasonic, Sony nebo třeba Tesla. Katoda je v tomto případě ze sloučeniny $LiNiMnCoO_2$. Největší tajemství výroby tohoto akumulátoru je ve správné kombinaci niklu a manganu. Změnou chemického složení jsou výrobci schopni výrazně měnit výsledné parametry baterie. Ty lze například optimalizovat pro aplikace náročné na proudovou zatížitelnost (bohužel na úkor snížení životnosti). Uplatnění tento typ akumulátoru nalezne v širokém spektru aplikací. Namátkou třeba jako zdroje v elektrických nářadích,

elektrokolech nebo třeba v elektromobilismu. Jako konkrétní případ použití lze uvést dnes velmi populární Tesla elektromobily a Tesla Powerwall.

2.1.4. $LiMn_2O_4$ (LMO)

Díky krystalické struktuře manganu se dokáží ionty v elektrolytu pohybovat s minimálním odporem, důsledkem čehož mají tyto články nízký vnitřní odpor. S tím také souvisí možná vysoká proudová zatížitelnost těchto baterií. Avšak tato struktura se v čase a po jednotlivých cyklech postupně rozpadá, a proto hlavní nevýhodou je relativně nízká životnost. Využití nachází tento typ například ve výkonovém nářadí, medicínské technice a nebo v elektromobilismu. Ve většině současných elektromobilů se umísťují bateriové packy složené z NMC a LMO baterií. LMO dodávají energii při akceleraci a díky vysoké energetické hustotě NMC mají elektromobily relativně dlouhý dojezd. Příkladem je nejprodávanější elektromobil současnosti Nissan Leaf nebo například Chevrolet Volt a BMW i3.

2.1.5. $LiCoO_2$ (LCO)

Tento typ má vysokou energetickou hustotu a předurčuje tak využití v elektronice jako jsou notebooky, mobilní telefony, kamery a jiné. Nevýhodami této technologie je nižší životnost a nízká proudová zatížitelnost.

2.1.6. LiPo

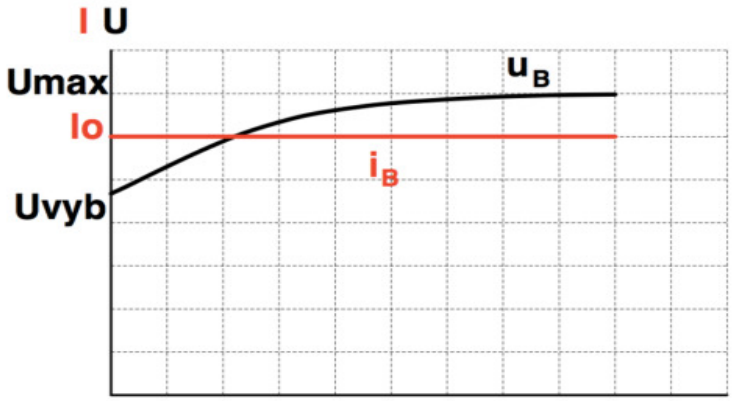
Pojem lithium-polymerová baterie lze chápat dvěma různými způsoby. Původně tento pojem vznikl na základě použití elektrolytu na bázi polymerů. Tato koncepce baterie sahá do sedmdesátých let, kdy se začala využívat jako suchý elektrolyt právě tenká vrstva polymeru. Úmyslem bylo zúžení baterie, získání ohebnosti a možnost vytvářet baterie s různými tvary, bez rizika vnitřního zkratu. Na této koncepci se stále pracuje a není sériově vyráběna.

Druhý výklad je používaný v podstatě jen jako označení lithium-iontových baterií, které využívají suchého separátoru ve formě tenkých plátků z polymerů. Nejedná se tedy o žádný revoluční objev nového chemického složení, protože uvnitř LiPo baterie se vždy nachází sloučenina $LiCoO_2$, $LiNiMnCoO_2$, $LiFePO_4$ nebo jiný běžně rozšířený druh. Na trhu se lze setkat LiPo bateriemi, které mají velmi vysoké vybíjecí proudy (výjimkou nejsou baterie s vybíjecím proudem přesahující 30C). To oceňují zejména modeláři, ale je třeba mít na paměti, že takto vysoké zatěžování nutně vede k razantnímu snížení životnosti baterie a počet cyklů se při takovémto zatěžování pohybuje v lepším případě v řádu stovek cyklů.

2.2. Alkalické akumulátory

Před nástupem Li-Iontových akumulátorů se jednalo o velice rozšířený typ baterie, který vynikal dlouhou životností (ve srovnání s Pb akumulátory) a odolností vůči přebití a podbití.

Nabíjení alkalických akumulátorů probíhá za konstantního proudu nezávisle na napětí. Některé nabíječe nabízejí funkci, která zajistí úplné vybití baterie před nabíjením (ochrana vůči paměťovému efektu).



Obr. 2.2.1: Nabíjecí charakteristika alkalických akumulátorů, Zdroj: oenergetice.cz

2.2.1. NiCd

Tento typ akumulátoru byl vynalezen Waldmarem Jungnerem v roce 1899 a přinesl s sebou hned několik výhod oproti olověným akumulátorům. Do třicátých let však nedošlo k většímu rozšíření zejména kvůli vysokým výrobním nákladům. V roce 1932 došlo k prvnímu velkému posunu, a to vylepšením elektrodové konstrukce. K dalšímu zlepšení došlo roku 1947, když byla vyřešena absorpce plynů uvolňovaných při nabíjení. To vedlo k uzavření celého článku, jak ho známe dnes.

Dlouhá léta byly tyto baterie umísťovány do většiny spotřebičů, kdy byla vysoká elektrická kapacita klíčovým parametrem. Další malou revoluci zaznamenaly NiCd akumulátory ke konci 80.let, když došlo ke zvýšení kapacity až o 60% zvýšením obsahu niklu a kadmia v elektrodě. Je však nutno podotknout, že tímto procesem došlo také ke zvýšení vnitřního odporu a snížení životnosti.

Výhodou těchto baterií je zejména to, že bateriím nevadí skladování ve vybitém stavu. Dále tyto se baterie vyznačují relativně dlouhou životností (při správné údržbě), nabíjení vysokými proudy a fungování i při nízkých teplotách. Celkově se jedná o velmi robustní konstrukci.

Mezi nevýhody patří nižší energetická hustota ve srovnání s lithiovými akumulátory, paměťový efekt, vysoká toxicita kadmia (nutnost nákladné recyklace), vysoké samovybíjení a nižší napětí článku.

V ČR dle zákona 297/2009 Sb. vyplývá omezení na použití NiCd akumulátorů pouze pro průmyslové aplikace.

2.2.2. NiMh

Výzkum nikl-metal-hydridového akumulátoru začal v roce 1967 a přelomovým obdobím si prošel v osmdesátých letech, kdy byl vyřešen problém s nestabilitou chemického složení. NiMh akumulátory přinesly až o 40% vyšší energetickou hustotu než NiCd a zároveň neobsahují žádné toxické materiály.

Nevýhodou je zejména nejvyšší míra samovybíjení mezi běžně rozšířenými akumulátory, a to až 20% během prvních 24 hodin plus dalších 10% za jeden měsíc. Dále lze považovat za nevýhodu také riziko poškození způsobené přebitím nebo jinak nešetrným nabíjením.

Obecně lze říci, že NiMh akumulátory se staly díky své ceně, vysoké energetické hustotě a netoxicitě velice populární jako běžné tužkové baterie pro spotřební elektroniku.

2.3. Olověné akumulátory

Olověné akumulátory byly objeveny roku 1859 fyzikem Gastonem Planté a jednolo se o první nabíjecí baterii uvedenou do komerční výroby. Tento typ akumulátoru je i v dnešní době velice populární v mnoha aplikacích zejména z důvodu nízké ceny a schopnosti dodávat vysoké rázové proudy. Jako každá technologie mají i Pb akumulátory svá úskalí – nízká energetická hustota, pomalé nabíjení (úplné nabíjení zabere až 16 hodin), musí být skladovány v nabitém stavu, nízká životnost a škodlivost pro životní prostředí při kontaminaci olovem. Uplatnění nalézají jako startovací baterie (příznivá cena a schopnost dodat vysoké proudy), baterie v UPS anebo v jiných méně náročných aplikacích.

Jmenovité napětí na článek jsou 2V. V nabitém stavu aktivní hmotu záporné elektrody tvoří houbovité olovo (Pb), u kladné elektrody je to oxid olovičitý (PbO_2). Elektrolytem v olověných akumulátorech je vodou zředěná kyselina sírová (H_2SO_4) o koncentraci přibližně 35 % obj. u plně nabitého akumulátoru. Tento roztok může být z technických důvodů nasáknutý do vaty ze skelných vláken (AGM) nebo ztužený do formy gelu.

Ideální nabíjení olověných akumulátorů probíhá ve třech etapách - CC, CV a float. Oproti Li-Iontovým akumulátorům mají nabíječky pro Pb navíc ještě závěrečnou "float" fázi, která zajišťuje snížení ztrát samovybíjením.

Olověné akumulátory se vyrábějí v různých variantách reflektující jejich použití. Jedná se zejména o tyto skupiny:

- startovací - vyznačují se schopností dodat vysoké rázové proudy
  - neměly by být často podrobovány hlubokému vybíjení
- staniční - konstruovány pro rezervní napájení a musejí proto snášet uložení při plně nabitém stavu
  - využívají se například v UPS
- trakční - možno hluboce vybíjet a to středními proudy
  - nejvyšší životnost (cyklická) z olověných akumulátorů

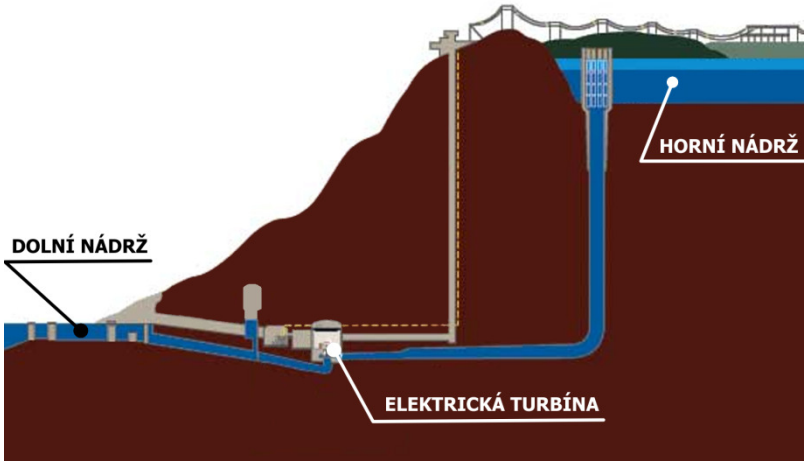
3. Další možnosti akumulace elektrické energie

I když je ukládání elektrické energie samo o sobě nemožné, během let lidé přišli na velké množství způsobů, jak elektrickou energii přeměnit na jiný druh energie a z něj pak zpětně získat opět elektřinu. V energetice je však v současnosti v nezanedbatelném množství používaný de facto pouze jeden způsob a tím je ukládání elektrické energie do energie potencionální, používaný v přečerpávacích elektrárnách. Masovému rozšíření ostatních způsobů brání vždy nějaká překážka. Může to být nízká efektivita (každá přeměna s sebou nese určité ztráty), vysoké počáteční či provozní náklady nebo například příliš krátká doba využitelnosti akumulátoru. Právě tyto nevýhody spolu s charakteristikou jednotlivých přeměn považuji za stěžejní popsat v této kapitole.

Stejně tak, jako jsou různé druhy elektrochemických článků vhodné pro různé aplikace, jsou i ostatní způsoby ukládání energie použitelné pro různé účely. Nebylo by například příliš efektivní přeměňovat elektrickou energii na teplo, když tuto energii plánujeme zužitkovat za několik měsíců. Ztráty by v tomto případě byly příliš vysoké.

3.1. Přečerpávací vodní elektrárny

Akumulovat energii ve vodních elektrárnách lze dvojím způsobem. První způsob spočívá v přehrazení vodního toku a vytvoření přehrady. Elektrickou energii je sice možné získávat v případě potřeby, není ale možné jí ukládat v případě přebytků. Druhou možností je přečerpávací vodní elektrárna (dále PVE), která slouží pouze jako stabilizace elektrické sítě. PVE se skládá ze dvou nádrží, které jsou v různé výšce. Když je elektřiny přebytek, voda se čerpá do horní nádrže a elektrickou energii přeměňujeme za pomocí čerpadel na energii potencionální. V případě nedostatku elektřiny se voda začne přepouštět do spodní nádrže přes turbínu, která vyrábí elektrický proud. Potencionální energie se takto mění zpátky na energii elektrickou.



Obr. 3.1.1: Schéma přečerpávací vodní elektrárny, Zdroj: Wikipedia

PVE mají v současnosti naprosto zásadní význam pro stabilizaci elektrické sítě a je to nejdůležitější a nejrozšířenější způsob, jak elektrickou energii v dnešní době ukládat. [5] Hlavními důvody pro rozšíření PVE je relativně jednoduchá konstrukce, dlouhá životnost a velké množství energie, které lze jednoduše uložit. Nevýhodou je velmi omezený počet lokalit, kde lze elektrárnu postavit a zásadní proměna krajiny. Přestože byla první přečerpávací elektrárna vystavěna již v době 1930 (Přečerpávací vodní elektrárna Černé jezero na Šumavě), zásadního rozvoje těchto elektráren se dostalo až s výstavbou jaderných elektráren (dále JE), protože efektivní provoz těchto elektráren je pouze při fungování na plný výkon a tak je pro vykrývání spotřeby z JE bezpodmínečně nutné vyřešit otázky týkající se právě akumulace elektrické energie. Za zmínku stojí fakt, že vícenáklady spojené se stabilizací sítě jsou tedy značné jak pro OZE, tak i pro JE, kde jsou často opomíjeny.

Obecně energie uložená v přečerpávacích elektrárnách závisí na těchto parametrech:

$$E = m \cdot g \cdot h = \rho \cdot V \cdot g \cdot h$$

$$m = \rho \cdot V$$

kde: $E -$ potencionální tíhová energie $[J], m -$ hmotnost tělesa $[kg], g -$ tíhové zrychlení $[m \cdot s^{-2}], \quad h -$ výška $[m], \rho -$ objemová hustota tělesa $[kg \cdot m^{-3}], V -$ objem tělesa$[m^3]$

Pokud tedy chceme maximalizovat kapacitu elektrárny, je nutné stavět nádrže tak, aby byl výškový rozdíl mezi nimi co nejvyšší (zvýšení parametru *h*) a nádrž byla co největší (zvýšení *V*). Rozdíl tíhového zrychlení *g* v různých částech světa je zanedbatelný. Objemová hmotnost *ρ* je při použití vody jako akumulačního média také téměř konstantní.

V současnosti jsou v ČR celkem tři PVE a to Štěchovice, Dalešice a Dlouhé stráně. U všech je použita reverzní Francisova turbína.

Tab. 3.1.1: Parametry PVE provozovaných v ČR

Název PVE	Instalovaný výkon [MW]	Rok zprovoznění	Výškový rozdíl [m]	Objem menší nádrže $[m^3]$	Doba dodávky při max. výkonu	Hltnost $[m^3 s^{-1}]$	E [MWh]
Štěchovice	45	1947 (1996)*	220	500 000	347min	24	300
Dalešice	450	1978	76	17 100 000**	475min	600	3541
Dlouhé stráně	650	1996	511	2 580 000	313min	137	3593

* Původní PVE Štěchovice byla zprovozněna již roku 1947, roku 1996 byla znovu zprovozněna po rozsáhlé úpravě horní nádrže, přivaděčů a turbíny

**Jako objem menší nádrže je uveden objem vodní nádrže Mohelno, která slouží jako spodní nádrž PVE Dalešice

Hodnota E [MWh] v tabulce vyjadřuje potencionální energii PVE vypočítanou dle následujících vztahů:

Štěchovice: $E = \rho V g h = 1000 \cdot 500\,000 \cdot 9{,}81 \cdot 220 = 1\,079\ \mathrm{GJ} = 300\ \mathrm{MWh}$

Dalešice: $E = 1000 \cdot 17\,100\,000 \cdot 9{,}81 \cdot 76 = 12\,749\ \mathrm{GJ} = 3\,541\ \mathrm{MWh}$

Dlouhé stráně: $E = 1000 \cdot 2\,580\,000 \cdot 9{,}81 \cdot 511 = 12\,933\ \mathrm{GJ} = 3\,593\ \mathrm{MWh}$

Účinnost přečerpávacího cyklu se u PVE v současné době pohybuje okolo 72% [6].

3.2. CAES

Název tohoto typu úložiště je zkratkou anglických slov *Compressed Air Energy Storage*, přeloženo do češtiny - energetické úložiště stlačeného vzduchu. Energie je v tomto případě uložena ve formě kinetické energie částic. Úskalí tohoto systému spočívá v samotném principu uložení energie - pro zvýšení kinetické energie je třeba zvýšit tlak plynu a úměrně s tlakem vzrůstá také teplota. Tlak v plynech je fyzikální veličina, vyjadřující poměr velikosti síly, která je vyvíjená plynem na okolí k jednotce plochy.

$$p = \frac{F}{S}$$

kde: p – tlak [Pa], F – normálová síla [N], S – plocha [m^2]

Tato síla je vyvolaná pohybem atomů a molekul a tlak je vlastně projevem jejich nárazů na stěny nádoby. Vztah mezi tlakem a teplotou popisuje stavová rovnice ideálního plynu:

$$p \cdot V = N \cdot k \cdot T$$

kde: p – tlak plynu [Pa], V – objem [m^3], N – celkový počet částic [–],

k – Bolzmanova konstanta [$J \cdot K^{-1}$], T – termodynamická teplota [K]

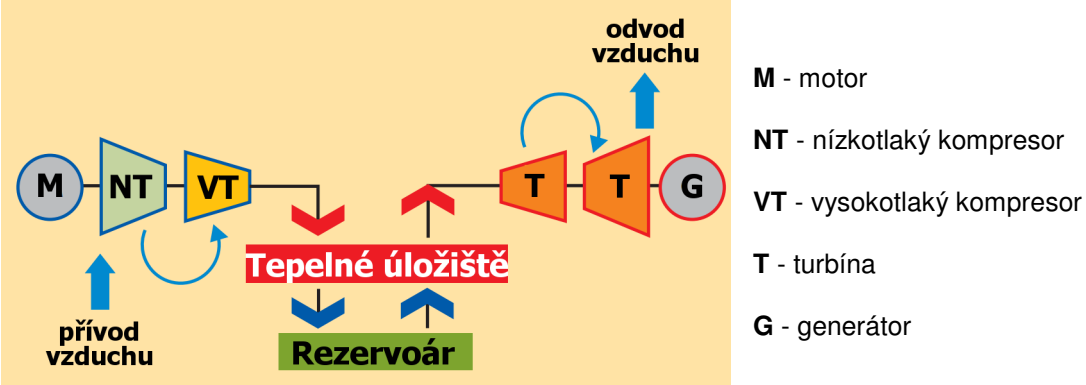
Tento systém byl dlouhou dobu využíván pro menší výkony, například při pohánění důlních lokomotiv. Velikou výhodou CAES je rychlost náběhu v generátorovém režimu. Ta se udává okolo deseti minut pro náběh do jmenovitého výkonu.

V současnosti existují na světě pouze dvě realizovaná úložiště o větší kapacitě. Jako vůbec první na světě bylo vystavěno úložiště Huntorf, a to roku 1978 u města Elsfleth v Německu. Vzduch je zde uložen v solných jeskyních o celkovém objemu 300tis. m^3. Výkon 290 MW je elektrárna schopna dodávat po dobu dvou hodin. Druhé úložiště leží u města McIntosh v USA a vybudováno bylo roku 1991, také v solné jeskyni. Objem rezervoáru je 538tis. m^3 a na plný výkon 110 MW může zařízení fungovat až 26 hodin.

Tento typ úložiště vždy vyžaduje již existující prostor, kde je vzduch stlačován. Jsou to buď solné jeskyně nebo jiné rezervoáry po vytěženém zemním plynu. Za těchto podmínek tedy nelze očekávat od tohoto způsobu převratnou revoluci v ukládání energie, protože

lokalit použitelných pro CAES je velmi omezené množství. Navíc všechna v současnosti provozovaná úložiště vyžadují ještě dodatečný ohřev stlačeného vzduchu v generátorovém režimu. Vzduch se tedy nejdříve stlačováním ohřeje, pak je ochlazen a nakonec za pomoci spalování zemního plynu znovu musí zvýšit svoji teplotu. V zařízení Huntorf je na jednu kWh získané elektrické energie třeba vložit 0,8 kWh elektřiny při ukládání a 1,6 kWh tepelné energie při následném ohřevu (účinnost 42%). V McIntosh je poměr 0,69 kWh elektřiny a 1,17 kWh plynu pro získání 1 kWh elektřiny (účinnost 54%) [7]

Budoucnost CAES spočívá ve způsobu uložení energie do stlačeného vzduchu v kombinaci s uložením vzniklé tepelné energie. Zde se účinnost může blížit až k 70%. [7] Tento způsob však ještě vyžaduje léta vývoje pro vytvoření použitelných komponent. Úložiště pro tepelnou energii musí mít vysokou kapacitu (až 1200 MWh) a zároveň zvládat teploty až 600 °C. Kompresory musí zvládat pracovat také okolo 600 °C, a to při tlaku 16 MPa. Turbíny o výkonech 300 MW musí být kompaktní, zvládat vysoké vstupní teploty a být co nejefektivnější.



Obr. 3.2.1: Blokové schéma CAES s ukládáním tepelné energie

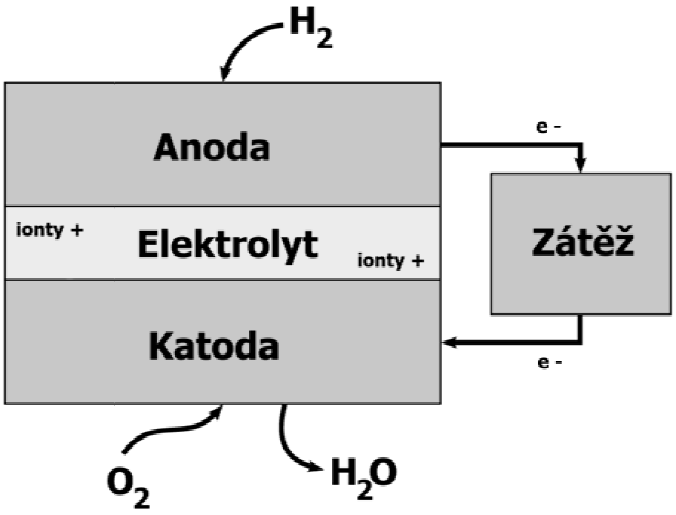
3.3. Palivový článek

V současné době se k technologii palivových článků ubírá nemalá pozornost. Princip spočívá v elektrochemické reakci vodíku a kyslíku za vzniku vody a elektrické energie. Tento princip byl popsán již v roce 1838 v Philosophical Magazine německo-švýcarským chemikem Christianem Friedrich Schönbeinem a první palivový článek byl veřejnosti představen roku 1839 na přednášce Sira Williama Grova v Královském londýnském institutu. O tři roky později, v roce 1842, již Grove sestavil palivový článek, který byl složen z 50 cel (soubor elektrod a elektrolytu).

Všechny druhy palivových článků potřebují pro své fungování použití vodíku. Oxidace vodíku je popsána následující rovnicí:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

Směs vodíku a kyslíku je třaskavá a přivedením dostatečné aktivační energie pak dojde k oxidaci molekuly vodíku a ke vzniku vody. Během reakce dochází k přenosu elektronů a k uvolnění tepelné energie. U palivového článku je nutné zajistit tok elektronů z vysokoenergetických vazeb do nízkoenergetických přes vnější elektrický obvod, kde vykonávají práci. Elektrolyt je tedy v tomto případě látka zajišťující průchod pro ionty a neprůchodnost pro elektrony, které jsou nuceny vykonávat práci ve vnějším obvodu.



Obr. 3.3.1: Schéma palivového článku

U palivových článků dochází k přeměně chemické energie přímo na elektrickou energii, a tak při přeměně nefigurují ztráty tepelného oběhu, který má naprosto klíčový vliv na celkovou účinnost například při získávání energie v tepelných elektrárnách. Oproti bateriím pracují palivové články pouze v čase, kdy je přiveden reaktant k elektrodě.

Mezi největší výhody palivových článků patří nulové množství emisí, vyprodukované během přeměny, ve srovnání s fosilními palivy. Dále je to vysoká účinnost i při nízkých provozních teplotách. Nevýhodou je vysoká cena zařízení způsobená provozní náročností a získávání, potažmo skladování vodíku.

Přestože při samotné přeměně chemické energie na energii elektrickou nevznikají u palivových článků žádné emise, je třeba zohlednit celý výrobní cyklus, a to včetně získávání paliva (vodíku). Plynný vodík (H_2) se totiž v přírodě vyskytuje pouze ve velmi malém množství a tak je ho třeba získávat uvolňováním z molekul, kde je vázaný převážně s uhlíkem. V současnosti je vodík získáván v 95% z fosilních paliv (zemního plynu, uhlí nebo ropy), nejčastěji pomocí tzv. parní reformace – ohřívání metanu s vodou. [8] Majoritní složkou zemního plynu je metan (CH_4), který se za vysokých teplot po smíšení s vodní párou přemění na vodík.

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

Tato metoda je však závislá na použití fosilních paliv a zároveň dochází i k uvolňování CO_2. Ekonomická výroba vodíku, která zároveň neprodukuje velké množství emisí, je tedy klíčovým problémem palivových článků. Se stejnými problémy se setkáváme i při získávání vodíku při rafinaci ropy nebo zplynování uhlí.

Metoda získávání vodíku nezatížená nevýhodami, vyjmenovanými v předchozím odstavci, spočívá v elektrolýze vody. Zde dochází oddělení vodíku a kyslíku z molekuly vody:

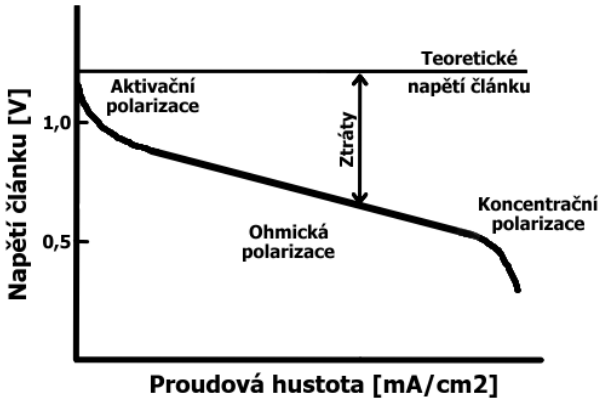
$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$$

Právě tato metoda je základem pro možné ukládání energie z OZE. Zde se nedodává tepelná energie, ale energie elektrická. Při výrobě nedochází k produkování škodlivých plynů. Jedná se vlastně o inverzní proces principu palivového článku, kdy je k elektrodám přiveden elektrický proud a na anodě dochází k rozkladu molekuly vody. Kyslík uniká v plynném skupenství pryč. Vodík se naváže na vrstvu elektrody a dojde k jeho oxidaci. Vodík takto získaný je sice oproti vodíku získanému z fosilních paliv čistší, ale výroba je finančně o hodně nákladnější. Celková účinnost systému ukládání energie pomocí palivového článku se pohybuje okolo 40% (při shodné účinnosti elektrolyzéru a palivového článku 63%). [9]

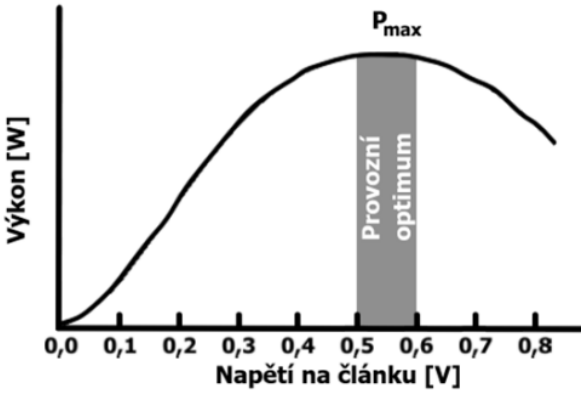
Jedním z technických problémů je uskladnění vodíku. Zde narážíme na problémy s vlastnostmi vodíku - nejlehčí a nejjednodušší plynný chemický prvek, který má druhý nejnižší bod varu ze všech známých látek a nejnižší hustotu v plynném skupenství. Kombinace hořlavosti a faktu, že vodík díky svým malým molekulárním rozměrům dokáže proniknout i přes stěny různých nádob z tohoto prvku dělá látku, která je jak objemově, tak materiálově velmi náročná na skladování. Obecně se vodík skladuje v plynné nebo kapalné fázi. Existují sice i jiné alternativní způsoby (například v metalhydridech), ale ty jsou bohužel zatím záležitostí výzkumu a nikoliv technické praxe. V plynné fázi se vodík ukládá do bezešvých lahví z nízkouhlíkaté nebo legované oceli. V kapalné fázi je vodík uložen do speciálních nádob, kde je ochlazen až na teplotu 20 K. U obou způsobů ukládání je třeba vynaložit velké množství energie, a to až 30% energie obsažené v palivu. [10]

Elektrické vlastnosti palivového článku jsou vždy limitovány fyzikálně-chemickými ději. Například maximální teoretické napětí jednoho článku se pohybuje okolo 1,23 V (v závislosti na teplotě a tlaku). [9] Pro praktické využití je tedy třeba řadit jednotlivé články do série a získat tak vyšší napětí. Jako u každého zařízení dochází i u palivových článků ke ztrátám. Tyto ztráty se dělí na tři základní podskupiny:

- aktivační – narušení rovnováhy mezi chemickými a elektrickými silami v povrchové vrstvě elektrody
- ohmické – ztráty lineárního charakteru vycházející z Ohmova zákona
- koncentrační – ztráty, ke kterým dochází při zhroucení mechanizmů přenosu hmoty



Obr. 3.3.2: U-I charakteristika palivového článku



Obr. 3.3.3: Provozní charakteristika palivového článku

Z následujících obrázků je patrné, že je velice důležité provozovat palivové články v ideálním bodě maximálního výkonu, které se nachází mezi napětím 0,5 – 0,6 V.

Existuje mnoho druhů palivových článků, které se liší zejména různými druhy elektrolytu, ale pro potřeby této bakalářské práce není třeba tyto druhy blíže specifikovat. Považuji za důležité pouze poznamenat, že každý druh má svojí provozní teplotu a ta se může pohybovat od 60 °C až po 1100 °C.

Základní bariérou pro rozšíření této technologie jako úložiště pro OZE je hlavně materiálová a technologická náročnost. Na základě nabídek od různých společností, zabývajících se výrobou palivových článků se tato technologie v současnosti ve srovnání s použitím bateriových systémů finančně nevyplácí.

3.4. Setrvačník

Ukládání elektrické energie za pomoci setrvačníku využívá kinetickou energii vázanou v rotujícím tělese - rotoru. Tato energie je úměrná momentu setrvačnosti rotoru a kvadrátu úhlové rychlosti dle následujícího vzorce:

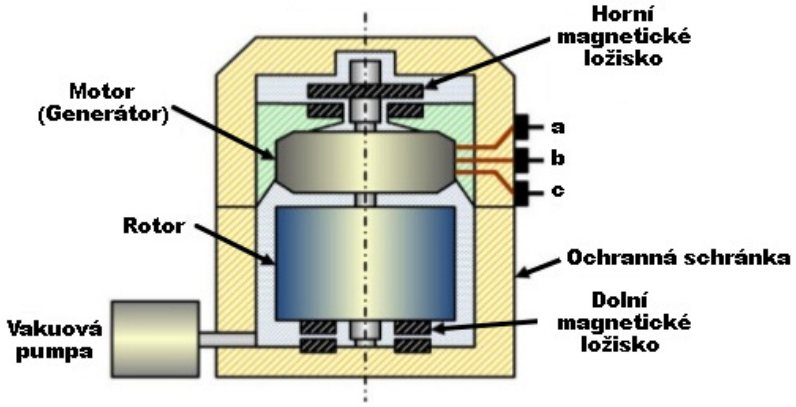
$$\mathrm{E} = \frac{1}{2} \cdot \mathrm{J} \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot \mathrm{m} \cdot \mathrm{r}^2 \cdot \omega^2$$

kde: $\mathrm{E} - \text{kinetická energie rotoru [J]}, \mathrm{J} - \text{moment setrvačnosti [kg} \cdot \mathrm{m}^2\text{]},$

$\omega - \text{úhlová rychlost [rad} \cdot \mathrm{s}^{-1}\text{]}, \mathrm{m} - \text{hmotnost rotoru [kg]}, \mathrm{r} - \text{poloměr setrvačnosti [m]}$

Ze vztahu je tedy patrné, že pro zvýšení kinetické energie je nutné použít materiál s co největší hmotností, rotor by měl být zároveň co možná nejdále od osy otáčení a měl by se otáčet s co nejvyšší rychlostí. Všechny tyto parametry však kladou vysoké materiálové a konstrukční požadavky.

Rotor je obvykle vyroben z vysokopevnostního uhlíkového kompozitu, uchyceného pomocí magnetických ložisek. Dříve byla používána ocel, kterou vystřídaly právě kompozity, které mají výrazně vyšší pevnost v tahu a řádově menší hmotnost. Rychlost otáčení se u některých setrvačníků blíží až k 800 otáčkám za sekundu. Pokud by došlo u rotoru k překročení pevnosti v tahu, může dojít k roztříštění a proražení ochranné schránky. Úlomky s velmi vysokou rychlostí pak mohou způsobit nemalé škody ve svém okolí. Účinnost zařízení závisí na velikosti ztrát způsobené třením. Platí tedy, že ztráty jsou přímo úměrné době uložení. Účinnost některých zařízení se blíží až 97% (zařízení pro stabilizaci frekvence) a až 85% pro jeden celý nabíjecí/vybíjecí cyklus. [11]



Obr. 3.4.1: Řez setrvačníkem

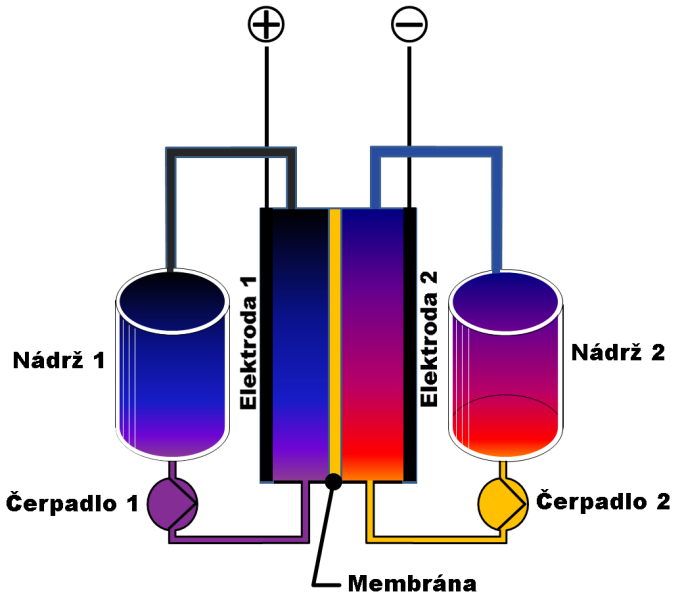
V současnosti slouží setrvačníky pouze pro výrobu akumulátorů, které mají nižší kapacitu, ale jsou schopny dodat po relativně krátkou dobu vysoké proudy. Toho se například využívá v zařízeních, vybavených záložním napájecím zařízením, kde je bezpodmínečně nutné zajistit okamžitý náběh záložního systému při výpadku elektrické energie. Nejčastěji tedy slouží pouze jako doplněk, než naběhne například dieselagregát, a to v nemocnicích nebo například v datových centrech.

Společnost Siemens se vývojem setrvačníků zabývá již dlouhou dobu a pracuje na setrvačníku s hmotností 260 kg a rychlostí 150 otáček za sekundu při rozměrech válce o výšce jeden metr a průměru 60 cm. Výkon 125 kW však dodává pouze 15 sekund. Využitím v dopravě se zabývala firma ABB, která postavila několik kusů tzv. gyrobusů, které byly poháněny elektřinou ze setrvačníků umístěných uvnitř vozidla. Nabíjení setrvačníků probíhalo na každé zastávce a nebylo tak třeba trolejového vedení. Spalovacím motorům však gyrobusy konkurovat nedokázaly.

Nevýhodou setrvačníků je vysoká cena a vzhledem k tomu, že je zařízení vysoce mechanicky namáhané, je nutné věnovat důkladnou péči údržbě. Další nevýhodou je nízká efektivita při dlouhodobém ukládání energie. Výhody spočívají v rychlosti náběhu, velmi širokém teplotním rozsahu, možnosti dodávat vysoké výkony a také v kompaktnosti - není třeba velkého ani větraného prostoru. Tyto vlastnosti naznačují, že setrvačníky mohou nalézt specifické uplatnění (například jako ekvivalent superkondenzátorům), ale pro užití jako akumulátoru energií z OZE jsou kvůli výše zmíněným nevýhodám nevhodné.

3.5. Průtočné baterie

Jedná se akumulační zařízení využívající přeměnu elektrické na chemickou energii. Na rozdíl od klasických sekundárních bateriových článků je energie uložena ve dvou různých elektrolytech, které jsou po celou dobu od sebe oddělené speciální membránou. Obě elektrody reagují pouze s jedním roztokem elektrolytu, který se vytvořil během nabíjení. Právě tato vlastnost je velkou výhodou průtočných baterií, protože elektrolyt můžeme skladovat v neomezeně velkých zásobnících. Elektrolyt zároveň nepodléhá degradačním procesům a má tak téměř neomezený počet nabíjecích cyklů. Membrána musí umožňovat průchod iontů a je jedním z mála prvků systému, kterou je třeba po čase měnit. Životnost je však odhadována okolo 15tis. cyklů a nejedná se o nikterak technicky náročnou činnost.



Obr. 3.5.1: Schéma principu průtočné baterie

Princip průtočné baterie je velice podobný principu palivových článků, až na oddělení jednotlivých složek paliva. Toto oddělení s sebou také přináší nespornou výhodu v podobě reverzibility celého procesu. V jednom zařízení je možné provádět nabíjení a vybíjení, stejně jako například u sekundárních baterií.

Existuje několik druhů průtočných baterií, z nichž nejznámější jsou Vanadium redoxová (VRB), Zinko-bromidová baterie (ZNBR) a Bromid sodná baterie (PSB, Br/S). Vanadium redoxová baterie však jako jediná nepodléhá degradaci elektrod a není třeba elektrody během její životnosti měnit. Proto se jeví v současnosti jako nejperspektivnější technologie průtočných baterií pro akumulaci z OZE.

Slovo REDOX u VRB znamená chemickou reakci redukce a oxidace využívanou pro ukládání a následné získávání elektrické energie. Roztok VRB je tvořen izotopy vanadu rozpuštěné v kyselině sírové. Napětí jednoho článku je 1,4 - 1,8 V. Články je tedy třeba řadit

do série, stejně jako v případě palivových článků. Účinnost jednoho cyklu se pohybuje okolo 60-80%. [12]

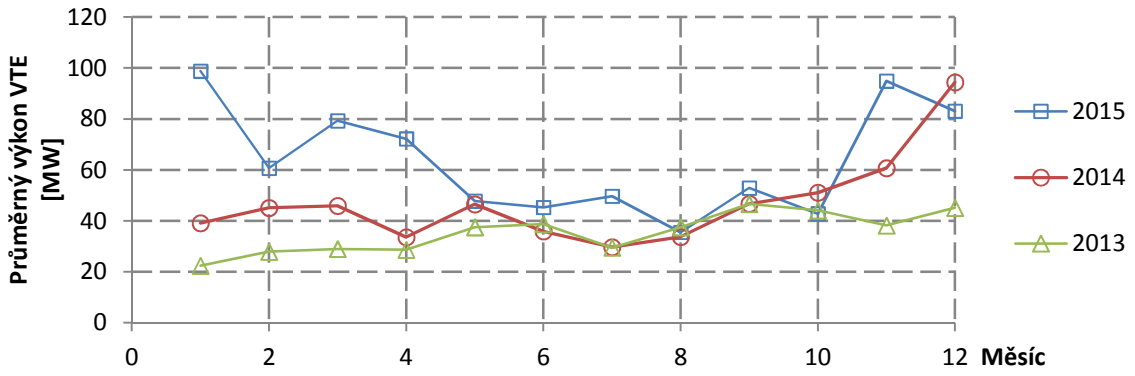
Nevýhodou všech průtočných baterií je nízká energetická hustota (okolo 20 kWh/m^3 resp. 25 Wh/kg), ale hlavně vysoká pořizovací cena plynoucí převážně ze složitosti celého mechanismu. Všechny v současnosti provozované projekty průtočných baterií jsou zatím vědeckého nebo demonstračního rázu a nepřešly tedy do technické praxe.

4. Akumulace energie z OZE

Hromadnému rozšíření sekundárních bateriových systémů jako úložišti elektrické energie v současnosti nestojí v cestě pouze vysoké náklady a nepředvídatelnost prostředí, ale také legislativa. Každá členská země EU má vlastní energetickou legislativu a například v ČR neexistuje vůbec právní definice umožňující připojení bateriového úložiště do elektrizační soustavy. Potencionální investoři musí volit mezi právní klasifikací bateriového úložiště jako zdroje elektrické energie nebo jiného, mnohdy absurdního právního pojmu.

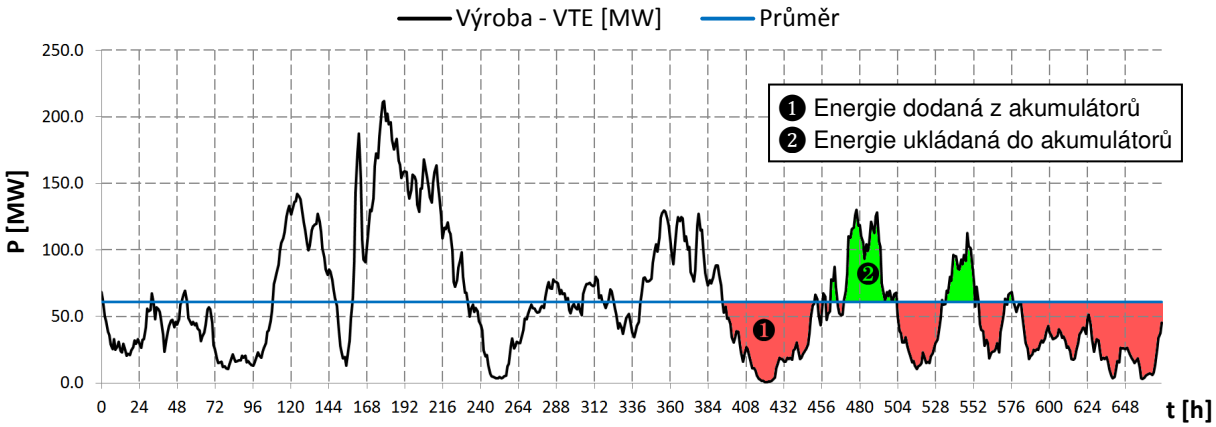
4.1. Akumulace energie z větrných elektráren

Na rozdíl například od fotovoltaiky je výroba z větrných elektráren naprosto neuspořádaná. V dlouhodobém horizontu nelze vyčíst žádné informace, které by pomohly generalizovat výrobu větrných elektráren v ČR. V některých letech dodávají VTE nejvíce energie v zimě, jindy na podzim (viz graf 4.1.1). Některý týden je celý větrný a jiný téměř nefouká. [15] Tato situace je samozřejmě odlišná v zemích, kde je větrných dní mnohem více jako například státy okolo Baltského moře. Pro konkrétní návrh akumulačního systému by bylo třeba množství empirických dat, ale pro definování technických parametrů kladených na sekundární bateriový systém si vystačíme pouze s následujícími daty.



Graf 4.1.1: Průměrný výkon VTE pro jednotlivé měsíce, Zdroj: ČEPS

Vycházet budeme z toho, že nechceme zatěžovat ES nepředvídatelnými dodávkami elektrické energie a chceme, aby VTE dodávaly energii s konstantním výkonem. V následujícím grafu je zobrazený výkon VTE v únoru 2015. Tento měsíc byl naprosto průměrným z hlediska dodaného výkonu i rozprostření výkonu v čase.



Graf 4.1.2: Měsíční diagram výroby elektrické energie z VTE pro 2/2015; zdroj dat: ČEPS

Kapacitu akumulačního zařízení jsem vypočetl na základě dat průměrného hodinového výkonu VTE v ČR. Červeně zvýrazněná plocha (označena také symbolem ❶) značí energii, kterou musí akumulátory dodávat elektrickou energii do sítě tak, aby byl generovaný výkon z VTE a akumulátorů vždy konstantní. Červeně je označena pouze ta část, ze které se vypočítá výsledná kapacita akumulátorů. Části v grafu více vlevo jsou totiž vždy již dobity z VTE. Zeleně zvýrazněná plocha (označena symbolem ❷) je energie, kterou VTE dobíjejí akumulátory. Průměrná hodnota výkonu (v grafu modře) se rovná 60,7 MW.

Potřebná kapacita akumulátorů K = 5 144 MWh, maximální produkovaný výkon VTE je 212 MW (v čase 179 h). Maximální nabíjecí výkon je pak nižší o energii dodávanou spotřebitelům (v grafu označena jako Průměr). Maximální nabíjecí výkon je roven 151 MW. Na základě těchto údajů lze vypočítat maximální nabíjecí proud:

$$I_{max} = \frac{P_{nab}}{K} = \frac{151\ \text{MW}}{5\ 144\ \text{MWh}} = 0{,}03\ \text{C}$$

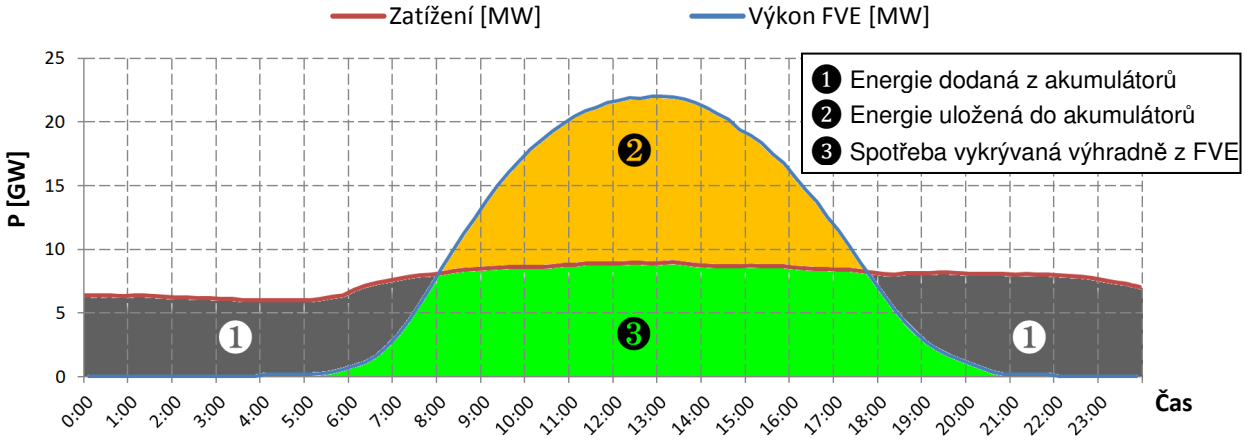
Tato hodnota je velice nízká a nepředstavuje problém pro žádné z výše vyjmenovaných sekundárních baterií. Za zmínku stojí také srovnání velikosti kapacity potřebných akumulátorů s již existujícími přečerpávacími vodními elektrárnami. Pro výše specifikovaný systém, který pokrývá pouze jednu stotřicetinu průměrného zatížení v ČR, je třeba přibližně 1,4 násobek kapacity PVE Dlouhé stráně.[1]

[1] Výpočet vychází z průměrné hodnoty zatížení 7,9 GW [5], [15] a kapacity PVE Dlouhé stráně 3 593 MWh (viz. Tab. 3.1.1)

4.2. Akumulace energie z fotovoltaických elektráren

Pro správné navržení akumulačního systému fotovoltaických elektráren je důležité zejména zohlednit diagramy výroby a spotřeby elektrické energie. Vždy je nejefektivnějším způsobem využití energie spotřebovávat přednostně vyrobenou energii bez akumulačních prvků. Bohužel v případě fotovoltaiky je pro další rozvoj akumulační systém naprosto nepostradatelný, protože výroba je rozložena v nejlepším případě do necelých 16,5 h (v době letního slunovratu) a rozdíly vyrobené energie jsou v jednotlivých dnech značné.

Pokud bychom chtěli vytvořit akumulační systém tak, aby FVE dokázaly vždy vykrýt určitou část denního zatížení (spotřeby), a to bez kolísání výkonu během dne (nezávisle na intenzitě slunečního záření), je třeba navrhnout systém dle následujícího diagramu:



Obr. 4.2.1: Diagram výroby FVE vykrývající veškerou spotřebu elektrické energie; zdroj dat: ČEPS (zatížení ve dne 7.7.2015)

Systém na obrázku 4.2.1 by byl schopen pokrýt veškerou spotřebu elektrické energie v tomto konkrétním dni. Hodnoty zatížení odpovídají reálné situaci ze dne 7.7.2015 a hodnoty výkonu FVE jsou vynásobeny tak, aby se celková denní spotřeba elektrické energie rovnala energii, kterou vyrobí fotovoltaické elektrárny. Okamžité hodnoty výkonu FVE bylo třeba vynásobit 14,9 krát. V tuto chvíli se samozřejmě jeví zvýšení instalovaného výkonu FVE o 1400% jako nerealizovatelné, ale i v případě pokrytí pouze zlomku spotřebovávané elektrické energie lze považovat FVE za přínos. Z hlediska požadavků kladených na bateriové úložiště se nic nemění. S každým dalším instalovaným Wp by pouze vzrostla kapacita akumulačního zařízení. Vybíjecí a nabíjecí charakteristiky tedy zůstávají stejné, a proto jsou další výpočty pouze modelovou situací, díky které lze získat doby vybíjení a maximální proudy.

	Čas			Denní součet
	0:00 - 8:00	8:00 - 17:45	17:45 - 23:45	
Vyrobená energie ve FVE [MWh]	7 127	169 529	9 468	186 124
Zatížení [MWh]	52 253	84 292	49 579	

Tab. 4.2.1: Hodnoty elektrické energie vztažené k modelovému příkladu

Kapacita akumulátoru se rovná rozdílu Vyrobené energie ve FVE a Zatížení v době mezi 8:00 - 17:45. V následujícím vzorci jsou tyto dvě hodnoty označeny jako E_{FVE-2} a E_{load-2}

$$K = E_{FVE-2} - E_{load-2} = 169\,529 - 84\,292 = 85\,237 \text{ MWh}$$

Nejvyšší nabíjecí výkon nastává v čase 13:00 a má hodnotu rozdílu výkonu FVE a zatížení: P_{max} = 13 092 MW.

$$t_{min} = \frac{K}{P_{max}} = \frac{85\,237 \text{ MWh}}{13\,092 \text{ MW}} = 6{,}5 \text{ h} \Rightarrow I_{max} = {t_{min}}^{-1} = 0{,}15 \text{ C}$$

Z hodnoty maximálního nabíjecího proudu vztaženého ke kapacitě (I_{max}) je patrné, že pro tento účel se není třeba obávat vysokých proudů. Hodnota nabíjecího proudu 0,15 C nepředstavuje problém pro žádný ze sekundárních bateriových článků. Obdobně nízká vychází hodnota vybíjecího proudu (I_{vyb}=0,1 C). Hodnoty maximálních proudů v zimních měsících budou ještě nižší vzhledem k vyšší spotřebě elektrické energie a obecně nižšímu výkonu FV panelů. Kapacita akumulátorů se rovná přibližně 24 násobku PVE Dlouhé stráně (viz. Tab. 3.1.1), což je stejně jako u akumulace energie z VTE velmi vysoká hodnota.

Největší problém u akumulace energie z FVE je výkon elektráren v zimních měsících. Na základě grafu 1.3.1 vyplývá, že prosincový výkon je téměř pětinový ve srovnání s letními měsíci. Akumulovat v bateriích elektrickou energii z letních měsíců nedává ekonomicky smysl a tak je jedinou možností zvýšit výkon FVE i za cenu nevyužívání veškeré vyrobené energie. Do budoucna však fotovoltaika nikdy nemůže být jediným zdrojem elektrické energie a je třeba počítat jak s rezervními kapacitami, tak jinými zdroji energie.

5. Testování baterií

Mezi nejdůležitější parametry baterií patří kapacita, životnost, proudová zatížitelnost, chování baterie při různých teplotách a vnitřní odpor. Přestože tyto parametry lze zpravidla vyčíst v datasheetu dodaném od výrobce, tak obzvláště v dnešní době, kdy lze zakoupit mnoho různých výrobků od neznámých výrobců, je třeba ověřovat pravdivost těchto údajů. Zatímco testování vnitřního odporu zabere několik minut a vystačíme si pouze se základními měřicími přístroji, pak například měření počtu cyklů zabere velmi dlouhou dobu a je třeba automatizovaného cyklovacího zařízení. Pro představu testování 2 000 cyklů při 100% DoD a proudu 1C zabere přibližně 170 dní.

Měření kapacity

Nejjednodušší měření kapacity probíhá vybíjením baterie do normovaného rezistoru. Během měření se měří napětí a čas. Z napětí se následně vypočítá pomocí ohmova zákona proud a po vynásobení střední hodnoty proudu časem pak dostáváme kapacitu akumulátoru. Vybíjení probíhá až do poklesu napětí článku na minimální možnou hodnotu (opět získanou z datasheetu). V současnosti existuje řada elektronických zařízení, které buď nabíjení (vybíjení) plně automatizují a není tak nutné odečítat hodnoty během měření, nebo lze například využít elektronické zátěže, která udržuje konstantní hodnotu vybíjecího proudu.

Měření životnosti

Měření životnosti je patrně nejproblematičtějším měřením, se kterým se lze v souvislosti s bateriemi setkat. Životnost je udávána v počtech cyklů. Je třeba si uvědomit, že baterie po určité době používání ztrácí svojí kapacitu a vzrůstá vnitřní odpor (stává se tím pádem „měkčím“ zdrojem). Na dobu životnosti má vliv mnoho faktorů, v čele s vybíjecími proudy, provozní teplotou, DoD, rozbalancováním jednotlivých článků apod. Životnost udávaná výrobcem je velmi orientační hodnotou a veškeré stanovení životnosti bateriového systému je díky mnoha výše zmíněným faktorům, které životnost ovlivňují, pouze hrubý odhad.

V laboratorních podmínkách se baterie obvykle cyklují. Po určitém počtu nabíjecích cyklů se zaznamenává pokles kapacity a vzniká tak závislost kapacity na prodělaných cyklech. Celé měření je časově velmi náročné. Pro představu testování 10 000 cyklů (reálná životnost LTO článků) při vybíjení 3 C, nabíjení 1 C, s 5 min přestávkami mezi jednotlivými nabíjeními a vybíjeními zabere 625 dní.

Měření proudové zatížitelnosti

Každá baterie má předepsané maximální proudy (špičkové i konstantní). U lithiových baterií však platí, že vybíjení a nabíjení baterie s maximálními proudy významně snižuje jejich životnost. Udávaný maximální proud je obvykle vztažený ke své kapacitě a udává se tedy ve tvaru: *„hodnota“ C* nebo *C „hodnota“.* Hodnota před „C“ vyjadřuje násobky kapacity a hodnota za „C“ vyjadřuje podíl z kapacity. Například pro 100 Ah baterii:

0,5 C = 50 A
C 10* = 10A

*(lze se setkat také s označením C/10)

Měření vlastností baterie za nízkých teplot

Každý typ baterie má trochu odlišné vlastnosti při nízkých teplotách. Výrobce obvykle specifikuje teplotní rozsah, kdy lze baterie použít a zároveň lze ve většině datasheetů dohledat kapacitu při těchto teplotách znázorněnou na vybíjecí křivce. Při návrhu akumulačního systému je tento údaj velmi důležitý z hlediska návrhu temperačního zařízení. Testování probíhá vybíjením akumulátoru při konstantním proudu a konstantní teplotě. Zde nastává největší úskalí tohoto měření, protože každý akumulátor se vybíjením ohřívá a nelze tak nikdy garantovat konstantní teplotu v celém objemu testovaného článku.

Měření vnitřního odporu

Vnitřní odpor je veličina charakterizující pokles napětí při zatížení baterie. Právě díky vnitřnímu odporu není při zapojení baterie do obvodu na pólech baterie měřitelné elektromotorické napětí, ale napětí snížené právě o úbytek na vnitřním odporu. Vyšší vnitřní odpor vždy značí stárnutí nebo přímo poškození baterie. Například při přebití dojde k poškození vnitřní struktury baterie, což se projeví zvýšeným vnitřním odporem. Proto může být vnitřní odpor dobrým indikátorem technického stavu akumulátoru a to v případě, že máme možnost srovnání například s novou baterií.

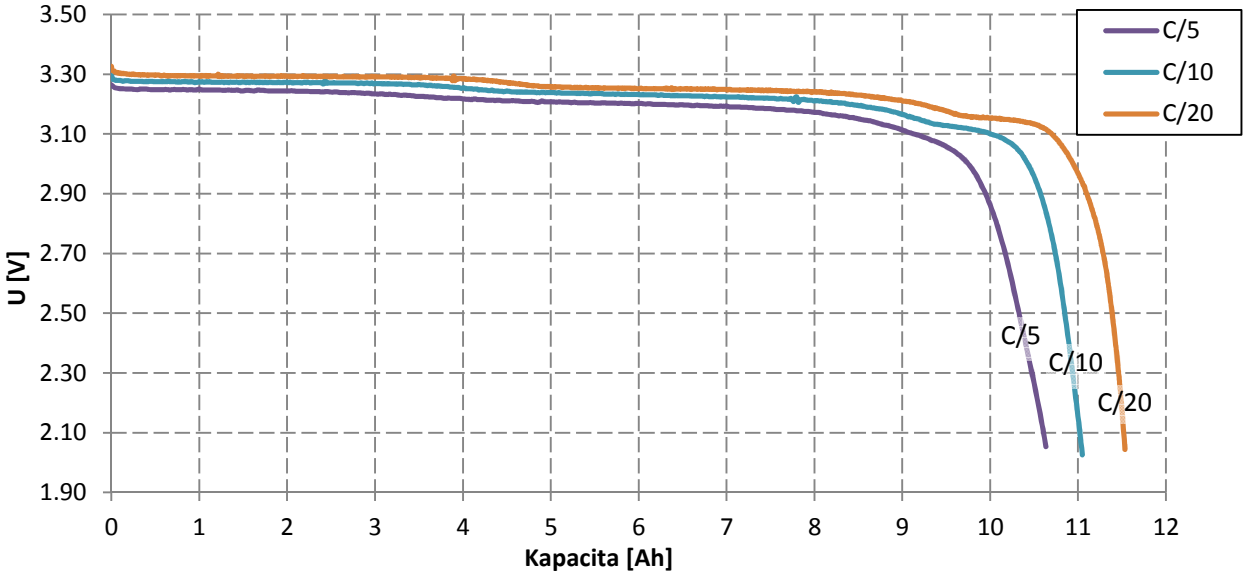
5.1. Provedení vzorového testu

V rámci této bakalářské práce jsem uskutečnil testování vzorku baterie na kapacitu a testování vnitřního odporu. Jednalo se o cylindrickou $LiFePO_4$ baterii. Nejdůležitější parametry baterie převzaté z datasheetu:

Chemie:	$LiFePO_4$
Výrobce:	Shenzhen Vipower Technology Co., Ltd.
Označení:	VIP38120
Kapacita:	10000mAh (0,5C)
Vnitřní odpor:	≤4mΩ

5.1.1. Zkouška kapacity

Měření probíhalo v Laboratoři elektrochemických zdrojů (LFSEZ) na FEL ČVUT. Byl použit automatizovaný cyklovač, který zajišťoval automatické odečítání hodnot napětí a proudu v předem nastavených intervalech. Hodnoty proudu byly udržovány na konstantní hodnotě 5A (C/5), 1A (C/10) nebo 0,5A (C20). Před samotným měřením absolvoval vzorek ještě 10 nabíjecích cyklů, které měly za úkol chování baterie ustálit. Z následujícího grafu je patrné, že vzorek ve zkoušce obstál, protože při všech měřeních je výsledná kapacita vyšší, než deklarovaná kapacita. Dle očekávání je také patrné, že i lithiové baterie vykazují nezanedbatelné rozdíly v kapacitě při zatěžování různými proudy.



Graf 5.1.1: Vybíjecí charakteristika testované baterie

Zkouška:	Naměřená kapacita [Ah]:	Procentuální rozdíl vůči deklarované kapacitě [%]
C/5	10,63	+6,33
C/10	11,05	+10,50
C/20	11,53	+15,33

Tab. 5.1.1: Naměřené hodnoty kapacity baterie

Rozdíly v kapacitě jsou i přes sériovou výrobu naprosto běžná záležitost, což je dalším důležitým argumentem pro osazení baterií kvalitním monitorovacím systémem. Výrobce je pouze schopen garantovat, že všechny baterie mají vyšší kapacitu než je kapacita deklarovaná, ale už není možné zaručit stejnou kapacitu pro všechny články. Někteří výrobci (např. Winston battery) proto třídí některé baterie do skupin o stejné kapacitě a poté tyto baterie kompletuje do 12V bloků. To vede k nízkému rozbalancování během provozu.

5.1.2. Měření vnitřního odporu

K vybíjení byla použita automatická DC elektronická zátěž od firmy GWINSTEK zajišťující konstantní vybíjecí proud i při poklesu napětí. Napětí bylo měřeno digitálním multimetrem od téže značky.

Průběh měření byl následující:

1) baterie byla zatížena proudem 4 A (I_1) a po 20 s naměřeno napětí U_1
2) 5 min byla baterie odpojena od zátěže
3) baterie byla zatížena proudem 20 A (I_2) a po 5 s naměřeno napětí U_2

Napětí U_1 = 3,32 V a U_2 = 3,27 V. Vnitřní odpor (R_{INT}) jsem následně vypočítal dle následujícího vztahu:

$$R_{INT} = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} = \frac{3{,}32 - 3{,}27}{20 - 4} = 0{,}003\ \Omega = 3\ \text{m}\Omega$$

Baterie tedy prošla zkouškou měření vnitřního odporu, protože tento vnitřní odpor je nižší, než je hodnota garantovaná výrobcem. Vzduch v laboratoři měl pokojovou teplotu, takže teplota nijak neovlivnila výsledky měření. Obecně u lithium-iontových baterií významně vzrůstá vnitřní odpor až při teplotách nižších než 10 °C.

6. Závěr

Význam OZE v současnosti spočívá primárně v malém snížení uhlíkové stopy. Plně obnovitelná energetika je hodně vzdálená a během přechodu k ní se společnost bude muset vypořádat s celou řadou překážek. Čím více OZE bude přibývat, tím větší náklady bude nutné vynaložit na stabilizaci sítě a vykrývání okamžiků, kdy zdroje nevyrábí požadované množství energie. Tyto náklady pak můžou zbrzdit jakýkoliv další rozvoje OZE.

ČR zatím z OZE sází na produkty biomasy, ale ty díky své velmi malé energetické hustotě můžou být spíše způsobem jak účinněji využívat odpadní produkty. Pěstování plodin pro energetické účely by zabralo až příliš zemědělské plochy.

Kromě přečerpávacích vodních elektráren jsou zatím všechny ostatní způsoby akumulace příliš nákladné. Rozvoj PVE je limitován komplikovanými schvalovacími procesy a tak není příliš pravděpodobné, že by ČR vystavěla v budoucnu další přečerpávací elektrárnu. Ostatní akumulátory mohou výrazně zlevnit až po zavedení sériové výroby a zvýšení konkurence na trhu.

Z kapitoly 4 vyplývá, že OZE nekladou žádné speciální požadavky na sekundární baterie (vysoké proudy, energetická hustota apod.), a proto bude rozhodovat pouze cena vztažená na jeden nabíjecí cyklus, bezpečnost a spolehlivost. I když modelové příklady, ze kterých jsem v této práci vycházel, nejsou dokonalým způsobem, jak vypočítat potřebnou kapacitu akumulátorů, tak určitou představu tyto příklady přinášejí. Rozhodně bude nutné pro zajištění stabilních dodávek elektrické energie sofistikovaně propojit všechny výrobní zdroje a pravděpodobně i propojit evropskou energetickou přenosovou soustavu - využít akumulačních kapacit PVE Norska a alpských zemí, potenciálu slunečního osvitu okolo Středozemního moře a větrných podmínek při Baltském a Severním moři. V Evropě bude také nutné investovat nemalé prostředky do přenosové soustavy a pravděpodobně to s sebou přinese vývoj nových materiálů a technologií.

Pokud má ČR zajistit svojí energetickou soběstačnost bez vypouštění skleníkových plynů a to za pomoci současných technologií, neobejde se bez jaderné energetiky.

V závěrečném testování splnila baterie požadované parametry. Z vlastní zkušenosti vím, že mnoho výrobců převážně z Číny často nejsou schopni splnit deklarované parametry a je třeba kvalitu sekundárních baterií vždy ověřovat.

7. Bibliografie

[1] *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2013. Dostupné také z: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf

[2] *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR*. Praha: ČEZ, a. s., 2007. Dostupné také z: https://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/oze-cr-all-17-01-obalka-in.pdf

[3] Vodní elektrárna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodn%C3%AD_elektr%C3%A1rna

[4] Electricity production from hydroelectric sources (% of total). *The World Bank* [online]. 2014 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.HYRO.ZS

[5] *Roční zpráva o provozu ES ČR 2014* [online]. Praha: Oddělení statistiky a sledování kvality ERÚ, 2015 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2014.pdf/933fc41a-ad79-4282-8d0f-01eb25a63812

[6] *Renewable Power Generation Costs In 2014* [online]. In: . The International Renewable Energy Agency, 2015, s. 164 [cit. 2016-05-17].

[7] Packing some power. *The Economist* [online]. 2012, (1) [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: http://www.economist.com/node/21548495?frsc=dg%7Ca

[8] *CzechIndustry*. STUDIO P+P, s.r.o., 2014, (4). Dostupné také z: http://files.casopisczechindustry.cz/200000579-3505635fd1/CI04_2014_35-68.pdf

[9] Compressed air energy storage power plants. In: MEYER, Franz. *ProjectInfo* [online]. Eggenstein-Leopoldshafen: Bine Informationsdienst, 2007 [cit. 2016-04-21]. ISSN 0937-8367.

[10] OGDEN, Joan M. *Hydrogen as an Energy Carrier: Outlook for 2010, 2030, and 2050*. Davis, CA, 2004. Dostupné také z: http://escholarship.org/uc/item/9563t9tc#page-1. University of California.

[11] SZELIGA, Zbyszek. *Základy technologie palivových článků*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 95 s. ISBN 978-80-248-1671-5.

[12] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. *Skladování vodíku I* [online]. Česká vodíková technologická platforma, 2007 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i

[13] *Frequency Regulation and Flywheels* [online]. In: . b.r., s. 2 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20100331042630/http://www.beaconpower.com/files/Flywheel_FR-Fact-Sheet.pdf

[14] *Vanadium Redox (VRB) Flow Batteries* [online]. Energy Storage Association, b.r. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: http://energystorage.org/energy-storage/technologies/vanadium-redox-vrb-flow-batteries