

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



Studium možností akumulace energie pro PV systémy

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Martin Libra, CSc.

Autor práce: Aleksandr Gumroian

Praha 2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Aleksandr Gumroian

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Studium možností akumulace energie pro PV systémy

Název anglicky

Study of the energy accumulation possibilities for PV systems

Cíle práce

- Zpracování rešerše různých způsobů akumulace energie a fyzikálních principů, na kterých pracují
- Vytvořit přehled vhodných možností použití jednotlivých způsobů akumulace energie v technické praxi
- Učinit vlastní závěry o jejich přednostech a nedostatcích.

Metodika

Na základě studia literatury a konzultací se školitelem bude zpracována rešerše různých způsobů akumulace energie a fyzikálních principů, na kterých pracují. Bude vytvořen přehled vhodných možností použití jednotlivých způsobů v technické praxi a učiněny vlastní závěry o jejich přednostech a nedostatcích.

Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

Akumulace energie, PV systém, fotovoltaika

Doporučené zdroje informací

L. Eckertová a kol., Fyzikální elektronika pevných látek, Karolinum, Praha, (1992), ISBN 80-7066-535-1

Libra, M., Avramov, V., Pěnkava, B., Poulek, V., Provoz fotovoltaického systému v Národním divadle v Praze. Jemná mechanika a optika, 57, 6, 2012, str. 167-169, ISSN 0447-6441

Libra, M., Poulek, V., Fotovoltaika, teorie i praxe využití solární energie, kniha-monografie, ILSA, Praha, (2010), 165 stran, ISBN 978-80-904311-5-7

Poulek, V., Strebkov, D.S., Persic, I.S., Libra, M., Towards 50 years lifetime of PV panels laminated with silicone gel technology. Solar Energy, 86, 10, 2012, pp. 3103–3108, ISSN 0038-092X

Sedláček, P., Libra, M., Mareš, J., Porovnání dopadajícího slunečního záření v průběhu let 2008-2011. Jemná mechanika a optika, 57, 6, 2012, str. 185-187, ISSN 0447-6441.

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Martin Libra, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra fyziky

Elektronicky schváleno dne 18. 12. 2016

prof. Ing. Martin Libra, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 1. 2017

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma:

“Studium možností akumulace energie pro PV systémy“

vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze:

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval prof. Ing. Martinovi Libře, CSc. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

Studium možností akumulace energie pro PV systémy

Abstrakt: Obnovitelná energie se stala nejrozšířenějším řešením pro problémy spojených s vyčerpáním ropy, zvyšující se poptávkou po energii a antropogenním globálním oteplováním. Ale je stále silně závislá na počasí. Aby bylo možné tyto odchylky filtrovat, jsou systémy pro akumulace energie široce přijímány jako jedno z potenciálních řešení s výhodami, jako je schopnost rychlé odezvy, trvalé napájení a geografická nezávislost. Tato práce poskytuje základní přehled metod pro akumulace energie a jejich potenciální aplikací ve fotovoltaických systémech. Systémy akumulace energie jsou kategorizovány na základě specifického druhů energie (mechanická, tepelná, elektrochemická atd.) a popsány z hlediska principu fungování, výhod a nedostatků a možného použití. V závěru jsou metody akumulace energie srovnány.

Klíčová slova: akumulace, energie, obnovitelné, zdroje, přečerpávací, elektrárna, CAES, setrvačníky, akumulátor, vodík, hospodářství

Study of the energy accumulation possibilities for PV systems

Summary: Renewable energy has become the most widely applied solutions for addressing issues associated with oil depletion, increasing energy demand and anthropogenic global warming. But it is still heavily dependent on the weather. To filter these variabilities, battery energy storage systems have been broadly accepted as one of the potential solutions, with advantages such as fast response capability, sustained power delivery, and geographical independence. This work provides a basic overview of energy storage methods and their potential applications in photovoltaic systems. Energy storage systems are categorized by specific types of energy (mechanical, thermal, electrochemical, etc.) and described in terms of the principle of operation, advantages and disadvantages and possible uses. In conclusion, the energy storage methods are compared.

Keywords: accumulation, energy, renewable, sources, pumped, hydroelectric, CAES, flywheels, batteries, hydrogen, economy

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod..... | 1 |
| 2 | Cíl a metodika práce..... | 2 |
| 3 | Akumulace energie..... | 3 |
| 3.1 | Mechanické systémy ukládání energie | 3 |
| 3.1.1 | Přečerpávací elektrárny..... | 3 |
| 3.1.2 | Stlačený vzduch | 5 |
| 3.1.3 | Setrvačníky | 6 |
| 3.2 | Tepelné systémy ukládání energie | 7 |
| 3.2.1 | Citlivé teplo..... | 8 |
| 3.2.2 | Latentní teplo | 9 |
| 3.2.3 | Chemické teplo | 10 |
| 3.3 | Elektromagnetické systémy ukládání energie..... | 11 |
| 3.3.1 | Superkapacitory | 11 |
| 3.3.2 | Supravodivé cívky | 12 |
| 3.4 | Elektrochemické systémy ukládání energie..... | 13 |
| 3.4.1 | Sekundární články..... | 13 |
| 3.4.2 | Průtokové baterie | 19 |
| 3.5 | Vodíkové hospodářství pro ukládání energie | 21 |
| 3.5.1 | Získávání vodíku..... | 22 |
| 3.5.2 | Skladování a logistika..... | 27 |
| 3.5.3 | Energetické využití vodíku | 28 |
| 4 | Porovnání technologií | 30 |
| 5 | Závěr..... | 31 |
| 6 | Literatura | 32 |
| 7 | Seznam obrázků a tabulek..... | 36 |

1 Úvod

Zdá se, že v dnešním světě se stále zvyšuje potřeba více energie. Domácnosti i průmyslová odvětví vyžadují velké množství energie. Cílem mezinárodních smluv je omezit úroveň znečištění, globální oteplování vyzývá k snížení produkce oxidu uhličitého a několik zemí se rozhodlo vyřadit staré jaderné elektrárny z provozu. Mimořádný celosvětový nárůst poptávky po energii navíc znamenal, že cena konvenčních zdrojů energie dramaticky vzrostla a závislost národních ekonomik se stala kritickou.

Tento vývoj přináší potřebu nahradit staré způsoby výroby energie novými. Zatímco několik je ve vývoji, jiné metody jsou již v komerčním použití. Celosvětově roste pronikání obnovitelných zdrojů energie a dalších forem potenciálních distribuovaných zdrojů. Tyto typy zdrojů energie se často spoléhají na to, že počasí nebo podnebí budou fungovat efektivně, a zahrnují takové metody, jako je větrná energie, sluneční energie a vodní elektrárna v různých provedeních.

Je očividně potřeba akumulace energie, konkrétně skladování energie ve větším měřítku než dříve. Tradiční metody uchovávání energie, jako je elektrochemický článek, nemusí být nutně použitelné ve větších systémech. Mezitím se vyvíjí řada nových a slibných metod. Některé z nich jsou založeny na starých konceptech, jiné jsou zcela nové. Některé z nich jsou zralejší než jiné, ale většina z nich může být dále zlepšena.

V této práci je proveden přehled nejdůležitějších základních metod akumulace energie, které jsou v současné době k dispozici (1).

2 Cíl a metodika práce

Cíle této bakalářské práce lze rozdělit do tří větších celků. První z nich je vytvořit přehled různých způsobů akumulace energie a fyzikálních principů, na kterých pracují. Ze zpracování této části by měl být zřejmý rozsah dostupných způsobů, jejich slabé a silné aspekty a také použití. Druhý z dílčích cílů se týká přehledu vhodných možností použití jednotlivých způsobů akumulace energie v technické praxi. Těžištěm práce je nasměrováno do učinění vlastních závěrů o přednostech a nedostacích těchto způsobů.

Táto práce byla zpracovaná na základě studia vědecké literatury, získávání informací z odborných časopisů a konzultací s vedoucím. Z těchto zdrojů pak mohl být vytvořen ucelenější náhled do zpracovávaného tématu.

3 Akumulace energie

Spalování fosilních paliv je hlavním viníkem globálního oteplování. Bohužel, fosilní paliva mají dvě výhody oproti obnovitelným zdrojům energie – přenositelnost a větší hustota energie. Snadno mít v ruce 10 litrový kanystr benzínu, který obsahuje asi 120 kWh energie. Velký olověný automobilový akumulátor s kapacitou 60 Ah v porovnání s deseti litry benzínu, má maximálně 0,72 kWh energie. Aby se věci zhoršily, stačí olověný akumulátor poškodit; to znamená, že už nebude obsahovat 60 Ah energie.

Nejen, že fosilní paliva mají vysokou energetickou hustotu, ale mohou být skladovány po dlouhou dobu před použitím s malou nebo žádnou degradací. Uhlí, vykopané ze země, po jejich formaci před miliony let mohou být skladované po neomezeně dlouhou dobu před spálením. To znamená, že charakteristiky většiny fosilních paliv jsou vysoká hustota energie a dlouhodobá stabilita. Nejedná se o obnovitelnou energii, jejíž vlastnost je využít nyní nebo ztratit.

Výzvou, která by mohla stanovit naši budoucnost, je proto nalezení efektivního a úsporného způsobu ukládání energie vyrobené z uhlíkově neutrálních, obnovitelných zdrojů (2).

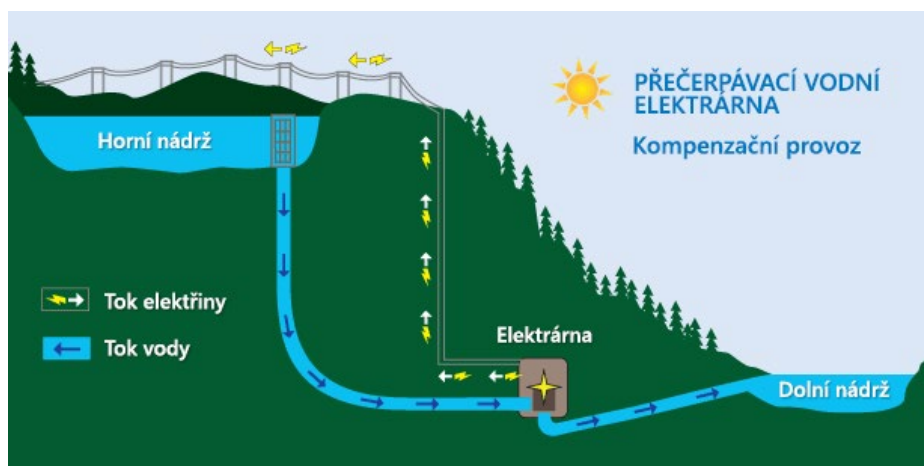
3.1 Mechanické systémy ukládání energie

3.1.1 Přečerpávací elektrárny

Přečerpávací elektrárny jsou uzavřené cyklické systémy se dvěma významnými výhodami. Mají vysokou efektivitu cyklu a jsou schopné rychlé vyrábět energií. Termín, který se nyní používá pro tato zařízení, je zkr. PHS (z angl. Pumped Hydroelectric Storage) (2).

Princip jednoduše ukázán na obrázcích dole a dole. Dvě nádrže jsou spojeny velkým potrubím s reverzní turbínou. Elektrárna přesouvá vodu po potrubí. Voda tak zvyšuje svou potenciální energii o $\Delta W_p = mg\Delta h$. Čerpá vodu do horní nádrže, když je nadbytečný výkon, a stejný mechanismus se stává elektrickým generátorem, když je potřeba elektrická energie, například ve špičkách (3). Také potřebujeme přepěťovou komoru, aby se zabránilo škodlivým tlakovým rázům a brzdou, aby se zabránilo nežádoucímu toku vody (2).

Obrázek 1 Schéma kompenzačního provozu přečerpávací vodní elektrárny



Zdroj: [Clean Balance Power](#)

Voda v horní nádrži má potenciální energii danou mgh , kde m je její hmotnost, g je zrychlení vlivem gravitace a h je výška. Kubický metr vody váží 1000 kg, takže pokud je 100 m nad turbínou, jeho potenciální energie je $1000 \cdot 9,81 \cdot 100 = 0,981 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$. Což je definice joule. Předpokládáme, že 1 m^3 vody projde turbínou za 1 sekundu; pak za předpokladu 100 % účinnosti, turbína by generovala $0,981 \cdot 10^6 \text{ W}$. Jinými slovy, s výškou 100 m a průtokem o něco vyšší než 1 m^3/s , bude turbína generovat 1 MW (2).

Obrázek 2 Schéma čerpadlového provozu přečerpávací vodní elektrárny



Zdroj: [Clean Balance Power](#)

Přečerpání vody a zatím vypuštění, bohužel, není stoprocentně účinný proces. PHS je dobře zavedená a spolehlivá metoda pro akumulace energie. Dříve elektrárny měly účinnost asi 60 %, ale v moderních elektrárnách je účinnost vyšší než 80 % (4).

PHS je největším samostatným zdrojem elektrické kapacity na světě s výkonem 169 GW v roce 2017. Je dominantní metodou pro ukládání energie užitné velikosti a představuje 96 % světové instalované kapacity (5). Největší výrobci instalované kapacity PHS v GW jsou uvedeny v tabulce dole.

Tabulka 1 Země s největší instalovanou kapacitou PHS v roce 2017

| Země | Kapacita (GW) |
|--------------------|---------------|
| Čína | 32,00 |
| Japonsko | 28,30 |
| USA | 22,60 |
| Španělsko | 8,00 |
| Italie | 7,10 |
| Indie | 6,80 |
| Německo | 6,50 |
| Švýcarsko | 6,40 |
| Francie | 5,80 |
| Korejská republika | 4,70 |

Zdroj: (5)

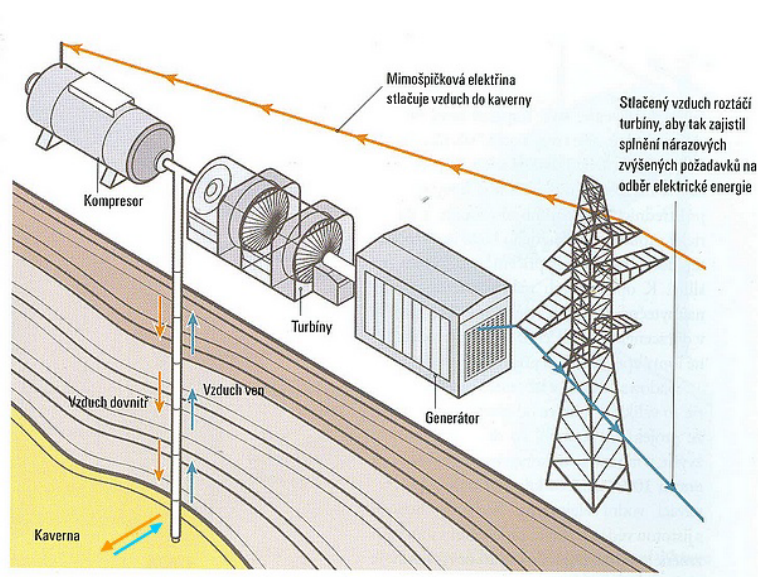
Hlavní nevýhodou přečerpávací elektrárny je specifická povaha požadované lokality, která vyžaduje geografickou výšku i dostupnost vody. Vhodné lokality se proto pravděpodobně nacházejí v kopcovitých nebo horských oblastech a potenciálně v oblastech výjimečné přírodní krásy, a proto existují také sociální a ekologické problémy, které je třeba překonat (6).

3.1.2 Stlačený vzduch

Akumulace do stlačeného vzduchu, zkr. CAES (z angl. Compressed Air Energy Storage), je druhým největším systémem pro ukládání objemových energií. Tato technologie využívá stlačitelnost vzduchu pro akumulaci elektrické energie. CAES je účinný způsob řešení krátkodobých špičkových elektrických zátěží. Zapotřebí jsou dvě věci:

- Uzavřená podzemní komora nebo podobné úložiště;
- Vzdálenost k hlavním elektrickým vedením (2).

Obrázek 3 Akumulace energie do stlačeného vzduchu



Zdroj: Scientific American, Česko, září-říjen, 2013

Schéma systému CAES je uvedena na obrázku nahoře. Během mimošpičkový čas energie je odvozena z rozvodné sítě k pohonu motoru a vzduchového kompresoru. Stlačený vzduch se vstříkuje do uzavřené komory. Mohou to být, jak umele zásobníky, tak i přírodní kaverny, např. po vytěžené ropě. Během krátkodobé špičkové poptávky je stlačený vzduch z komory přiváděn k provozu turbíny, která pohání elektrický generátor připojený k síti (3). Množství energie, která může být uložena, je poměrně malá, typicky mnohem menší, než může poskytnout PHS, a proto by měla být provozována pouze za okolností, kdy se očekává přetížení poptávky po energii a předpokládá se, že bude velmi krátkodobé (2).

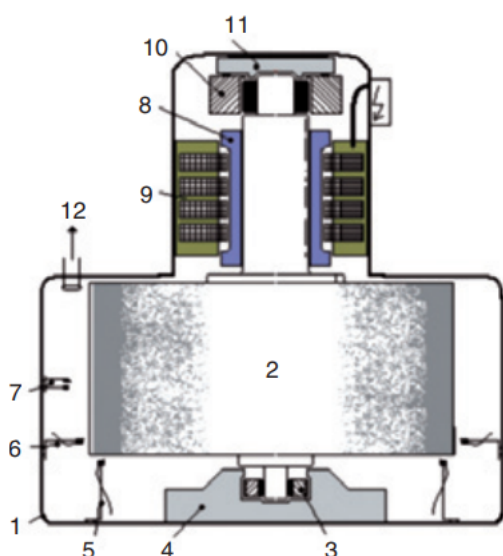
3.1.3 Setrvačníky

Účinnou metodou pro ukládání kinetické energie je mechanický akumulátor, resp. setrvačnick (z angl. flywheel). Také k odstranění nesrovnalostí výkonu některých typů strojů (např. ve spalovacích motorech) našli si své využití setrvačnický. Rotační kinetickou energii setrvačnicku lze popsat následujícím vztahem:

$$E = \frac{1}{2} * I * \omega^2$$

kde I je moment setrvačnosti a ω je úhlová rychlost v radiánech/s (3). Hustota energie setrvačnicku je řádově 120 Wh/kg, přibližně stejná jako u lithium-iontové baterie. Dále se na rozdíl od baterií mohou nabíjet a vybíjet s vysokou rychlostí (2).

Obrázek 4 Schéma setrvačnickového akumulátoru energie



- 1- kryt setrvačnicku s vakuem uvnitř
- 2- kompozitové těleso setrvačnicku
- 3- víceosé magnetické uložení
- 4- mechanické uložení pro případ defektu
- 5- čidla vyosení v horizontálním směru
- 6- čidla vyosení ve vertikálním směru
- 7- optický snímač otáček
- 8- permanentní magnety
- 9- elektrické vinutí (motor/generátor)
- 10- víceosé magnetické uložení
- 11- mechanické uložení pro případ selhání magnetického uložení
- 12- příruba pro čerpání vývěvou

Zdroj: www.odbornecasopisy.cz

Existují dva typy setrvačnickových akumulátorů. První typ využívá setrvačnický velkou hmotnost s určitým uložením, aby dosáhnout co největšího momentu setrvačnosti. Obvykle pracují při otáčkách do $8\,000\text{ min}^{-1}$. Druhý typ naopak používá menší a lehčí setrvačnický pracující při velmi vysokých otáčkách až $100\,000\text{ min}^{-1}$. Rotor u takových setrvačnicku uložen ve vakuu, aby se zamezilo tření o vzduch. Také zpravidla bývá uložen ještě v magnetických ložiskách s magnetickou levitací (3). Schéma takového setrvačnicku (motor/generátor) je na obrázku nahoře.

Co se týče skladování energie, setrvačnický je relativně malé zařízení, ale může přinést velké množství energie za krátkou dobu. To z nich činí užitečné pro podporu sítě a zálohování dodávek při výpadku sítě (7).

3.2 Tepelné systémy ukládání energie

Systémy pro ukládání tepelné energie, zkr. TES (z angl. Thermal Energy Storage), mohou uchovávat teplo nebo chlad za účelem použití později za různých podmínek, jako je teplota, místo nebo napájení. Toto může být dosaženo velmi různými technologiemi. V závislosti na konkrétní technologii systém umožňuje přebytečnou tepelnou energii skladovat a používat hodiny, dny nebo měsíce v měřítku od jednotlivého procesu, budovy, okresu, města nebo regionu.

Obrázek 5 Akumulační věž pro dálkové vytápění v Dolním Rakousku s tepelnou kapacitou 2 GWh



Zdroj: [Wikipedie: TES](#)

Systémy TES jsou rozděleny do třech typů:

- citlivé teplo,
- latentní teplo,
- termochemické,

Zavedení úložiště v energetickém systému poskytuje výhody, jako je lepší ekonomika, snížení znečištění a emise CO₂, lepší výkon, účinnost a lepší spolehlivost. Při navrhování systémů TES je třeba vzít v úvahu několik požadavků: vysokou hustotu energie skladovacího materiálu, dobrý přenos tepla mezi teplotonosnou kapalinou a skladovacím materiálem, mechanickou stabilitu, chemickou stabilitu, skladovací materiál a kompatibilitu nádob, reverzibilitu, nízké tepelné ztráty, a snadné ovládání (8).

3.2.1 Citlivé teplo

Když je energie uložena, zvyšováním nebo snižováním teploty materiálu, dochází k výskytu citlivého tepla. Skladovacím materiálem může být voda, vzduch, olej, podložka, cihla, beton atd. Každý materiál má své vlastní výhody, avšak materiál je vybrán podle jeho tepelné kapacity a dostupného prostoru pro skladování (9).

Množství uložené energie se počítá podle rovnice:

$$Q = c * m * (t_2 - t_1)$$

kde Q je množství tepla uloženého v materiálu (J), m je hmotnost materiálu (kg), c je měrná tepelná kapacita ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$) a t je teplota ($^\circ\text{C}$).

Materiály musí mít vysokou tepelnou kapacitu a být docela levné. Citlivé materiály jsou obecně pevné a kapalné. Schopnost uchovávat citlivé teplo pro daný materiál silně závisí na hodnotě jeho hustoty energie ($\rho \cdot c$). Proto jsou požadovány hodnoty vysoké hustoty a tepelné kapacity. Vysoká objemová tepelná kapacita, dobrá tepelná vodivost a cena jsou také důležité při výběru materiálu (8).

3.2.2 Latentní teplo

Materiály s fázovou přeměnou, zkr. PCM (z angl. Phase Change Materials), jsou materiály pro ukládání latentního tepla. Vzhledem k tomu, že teplota zdroje vzrůstá, chemické vazby v PCM se rozpadají, materiál mění pevnou fázi na kapalnou. Fázová přeměna je endotermický proces, a proto PCM absorbuje teplo. Po uložení tepla do skladovacího materiálu se materiál začne tát při dosažení teploty fázové přeměny. Teplota pak zůstává konstantní až do ukončení procesu tavení. Teplo uložené během procesu fázové přeměny (tavení) materiálu se nazývá latentním teplem. Skladování s využitím latentního tepla má dvě hlavní výhody:

- a) je možné skladovat velké množství tepla jen s malými teplotními změnami, a tudíž s vysokou hustotou skladování;
- b) protože fázová přeměna při konstantní teplotě trvá nějakou dobu, je možné vyhlazovat změny teploty (10).

Tepelná energie uložená latentním teplem může být vyjádřena jako:

$$Q = m \cdot L$$

kde m je hmotnost (kg), a L je specifické latentní teplo ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$). Materiály pro skladování tepelné energie pro latentní teplo mohou být:

- organické,
 - parafin,
 - neobsahující parafin,
 - mastné kyseliny,
 - estery,
 - alkoholy,
 - glykoly,

- anorganické,
 - soli,
 - kovy a slitiny, (11)

Porovnání latentního a citlivého tepla ukazuje, že při použití skladování latentního tepla lze dosáhnout hustoty skladování typicky 5 až 10krát vyšší.

Skladovací kapacita PCM je dvakrát menší než u vody. Skladování s využitím latentního tepla může být použito v širokém teplotním rozmezí. Velké množství PCM je známo, že se taví v libovolném požadovaném rozmezí. PCM, které mají být použité při konstrukci tepelných skladovacích systémů, by měli splňovat požadovaných termofyzikálních, kinetických a chemických vlastností (10).

3.2.3 Chemické teplo

Chemická energie je forma potenciální energie. Kapacita paměti závisí na zdroji. V této koncepci je energie skladována ve formě tepla z chemických reakcí. Často je to většího rozsahu než ukládání latentního tepla. Myšlenka uchovávání sluneční energie použitím chemických reakcí není nový koncept. Příroda ukládá energii použitím chemických reakcí ve fotosyntéze.

Úložiště chemické energie, zkr. CES (z angl. Chemical-Energy Storage), je dvoustupňový proces, konkrétně:

- **Endotermický režim** (nabíjení): To popisuje proces nebo reakci, ve které systém absorbuje tepelnou energii z okolního prostředí ve formě tepla. Absorbovaná energie se vyskytuje buď při lámání nebo zadržování chemických vazeb.
- **Exotermní režim** (vybíjení): V tomto případě je reakce obrácena, uvolňuje se tepelná energie a regeneruje se výchozí materiál.

Systém ukládání chemické energie má následující výhody:

- hustota ukládání energie těchto systémů je vysoká,
- tyto systémy jsou vhodné pro vysokoteplotní aplikace,
- rychlost chemické reakce je rychlá,
- tyto systémy mají méně ztráty energie,
- má snadnou přepravitelnost a neomezenou životnost,

Nicméně skladování chemické tepelné energie je stále v laboratorní fázi a komerční aplikace vyžadují další vylepšení technologie prostřednictvím výzkumných zkušeností (12).

3.3 Elektromagnetické systémy ukládání energie

Elektrickou energii můžeme obvykle ukládat dvěma způsoby. První pomocí elektrostatického pole, druhý pomocí vztahu mezi elektrickými a magnetickými jevy.

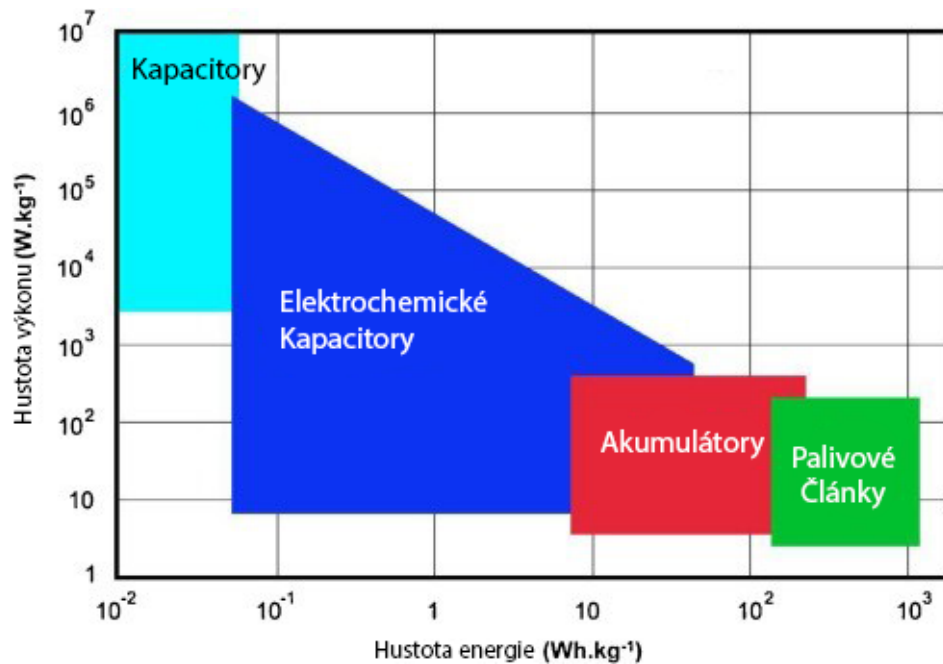
3.3.1 Superkapacitory

Superkapacitory nebo ultrakapacitory, jsou elektrické komponenty, které jsou schopné ukládat a přizpůsobit určité množství energie. Vývoj superkapacitorů se začal v 50. letech 20. století. Na rozdíl od baterie, která využívá elektrochemické reakce, ukládá kondenzátor energii pomocí statického náboje. Vytvořením rozdílu elektrických potenciálů mezi kladnou a zápornou elektrodou dochází k nabíjení kondenzátoru (13).

„Základem superkapacitorů je speciální materiál elektrod s velkou plošnou hustotou (práškový uhlík nanesený na hliníkovou fólii o ploše v poměru k hmotnosti asi $2\,000\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$), čímž se zajistí kapacita v řádu tisíců faradů. Elektrody superkapacitorů jsou odděleny polypropylenovou fólií a prostor je vyplněn tekutým elektrolytem. Při použití současných elektrolytů je napětí jednoho článku zhruba 2,5 V. Pro akumulaci energie pod vyšším napětím lze články řadit sériově. Superkapacitory se vyznačují malým sériovým odporem, jsou tedy vhodné pro rychlé dodávky i odběr energie. Špičkové výkony při uvolnění energie ze superkapacitorů v poměru k jeho hmotnosti jsou v řádech kilowattů na kilogram ($\text{kW}\cdot\text{kg}^{-1}$).“ (14)

Většina dnešních superkapacitorů má kapacitu přes několik tisíc Faradů a může nabíjet-vybíjet proud v řádech setin až desetin ampér. Jejich hlavní výhodou z pohledu aplikace je extrémně vysoký proud (ve srovnání s akumulátory), se kterým je schopen pracovat. Díky této charakteristické vlastnosti superkapacitory vyplňují prázdnou mezeru mezi zásobníky energie, mezi bateriemi (akumulátory) a běžnými kondenzátory (viz. na obrázku dole).

Obrázek 6 Hustota výkonu jako funkce hustoty energie u různých energetických zařízení.



Zdroj: J.B. Goodenough, H.D. Abruna, M.V. Buchanan. Zpráva semináře o základních energetických vědách o skladování elektrické energie (2007)

Superkapacitory se používají tam, kde je potřeba skladovat nebo uvolňovat obrovské množství energie ve velmi krátkém čase. V současné době se superkondenzátory používají především v hybridních elektrických vozidlech (HEV), elektrických vozidlech (EV) a vozidlech s palivovými články (FCV), jako jsou osobní automobily, vlaky a trolejbusy. Další oblastí použití superkapacitorů jsou elektronická zařízení jako napájecí zdroje nepřerušitelného napájení (UPS) a nestálé paměťové zálohy v počítačích. Třetí oblastí použití jsou systémy pro sklizeň energie, solární panely nebo větrné elektrárny, kde superkapacitory hrají doplňkovou roli vedle konvenčních baterií (15).

3.3.2 Supravodivé cívky

Supravodivé ukládání magnetické energie, zkr. SMES (z angl. Superconducting Magnetic Energy Storage), je technologicky pokročilý způsob ukládání energie v magnetickém poli, který vzniká tehdy, když stejnosměrný elektrický proud protéká cívku. Aby to fungovalo efektivně jako systém pro ukládání energie, musí být cívka vyrobena ze supravodiče, který nemá žádný elektrický odpor, takže při cirkulaci proudu neexistují žádné odporové energetické ztráty (16). Energií akumulovanou do cívky lze vyjádřit vztahem:

$$W = \frac{1}{2} L * I^2$$

kde L je indukčnost (H), a I je proud (A) (14).

Supravodivé materiály potřebné k vytvoření samotné cívky jsou drahé a nejlepší z nich, které jsou k dispozici dnes, musí být kryogenně ochlazeny až na absolutní nulovou teplotu, než se stanou supravodivými (např. kapalným héliem) (14). Supravodiče s vyšší teplotou jsou k dispozici také, ale jsou méně účinné.

Skládání energie založené na supravodivých cívkách nabízí možná nejvyšší efektivitu cyklu ze všech systémů pro ukládání energie. Nicméně náklady na udržení extrémně nízké teploty cívky zvyšují provozní náklady s časem a snižují celkovou účinnost. I tak, SMES byl navržen jako systém pro vyrovnání špičkových elektrických zátěží, podobné přečerpávacím elektrárnám.

Praktické systémy ukládání energie pro síť SMES byly vyvinuty koncem osmdesátých let. Jsou poměrně malé a používají se k podpoře sítě. Většina může dodávat 1 MW nebo méně energie. Byly testovány větší systémy a byly předloženy návrhy na masivní skladovací systémy pro malé a střední podniky, které mohou poskytovat výkon 1000 MW nebo více. K dnešnímu dni menší systémy našly komerční úspěch, obvykle v rámci funkcí podpory sítě (16).

3.4 Elektrochemické systémy ukládání energie

Na elektrochemickém principu založená většina nejběžnějších akumulátorů. U elektrochemických akumulátorů využívá se přeměna elektrické energie na energii chemickou, kterou v případě potřeby lze transformovat zpět na elektrickou energii.

3.4.1 Sekundární články

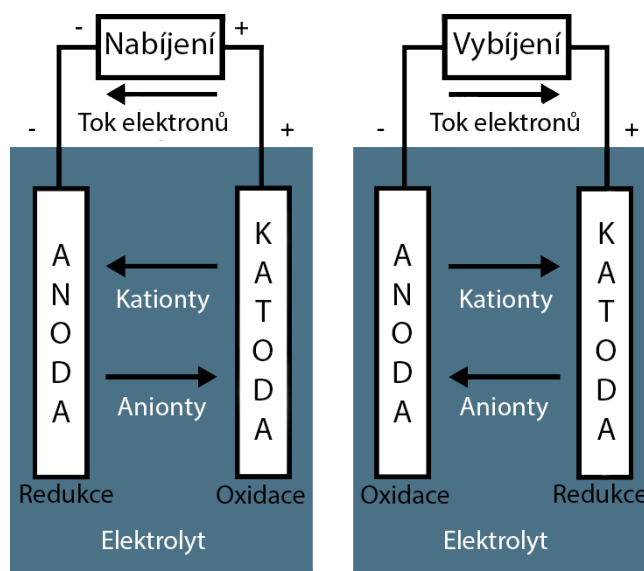
Sekundární článek či akumulátorová baterie je nejvíce využívaný prostředek pro ukládání elektrické energie. Na rozdíl od primárního článku, je možno znovu nabíjet a opakovaně používat. V současné době používají se pro celou řadu přenosných zařízení.

Baterie mohou rychle dodávat i absorbovat energii. Dnes je k dispozici řada různých typů, z nichž každý má různé vlastnosti. Většina z nich s prodlouženým používáním trpí postupnou degradací, avšak míra se bude lišit od typu k typu. Příchod elektrických zařízení, jako jsou notebooky, tablety a mobilní telefony, které vyžadují spolehlivé a dlouhotrvající kapacity elektrické energie, posunul vývoj technologie baterií v posledních dvou desetiletích a toto se urychlilo s příchodem elektrických automobilů.

Velkokapacitní skladování energie vyžaduje baterie s ještě náročnějšími specifikacemi (16).

Sekundární články přeměňují energii, která se uvolňuje během chemické reakce na elektrickou energii. Uvnitř pouzdra akumulátoru se nachází elektrody a elektrolyt¹. Elektrody mohou být ponořeny v elektrolytu společně, anebo každá může mít svůj vlastní roztok. Na anodě (negativní elektroda, ze které se vylučují elektrony) probíhá oxidace a na katodě (pozitivní elektroda, přijímá elektrony) probíhá redukce. V případě nabíjení akumulátoru od jiného zdroje probíhá opačná reakce: přeměna elektrické energie na chemickou, zatímco proud elektronů mění svůj směr (3). Schéma procesu je na obrázku dole.

Obrázek 7 Schéma sekundárního článku



Zdroj: [Researchgate](#)

Po zapojení elektrod na anodě začne probíhat oxidace a do elektrolytu se začnou uvolňovat kationty. Zbývající elektrony tečou přes vodič do katody, na povrchu které se vylučuje kov a probíhá redukce. Působením těchto reakcí vzniká rozdíl potenciálů a elektrické napětí.

Energie, která vzniká během reakci, by se normálně uvolňovala jako teplo v případě běžného smíchání reaktantů. V elektrochemickém článku je reakce řízena takovým způsobem, že většinu z tohoto tepla lze přeměnit na elektřinu. Kromě toho může

¹ Elektrolyt – roztoky nebo taveniny (kyselin, zásad, solí), které vedou elektrický proud.

dojít k reakci pouze tehdy, když se vytvoří elektrické spojení mezi oběma elektrodami článku (16).

3.4.1.1 Typy baterií

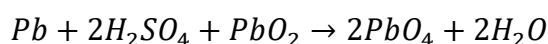
Většina baterií se liší od výše popsaného způsobu složením elektrolytu a materiálem elektrod, avšak princip oxidačně redukčních reakcí zůstává stejný.

3.4.1.1.1 Olověný akumulátor

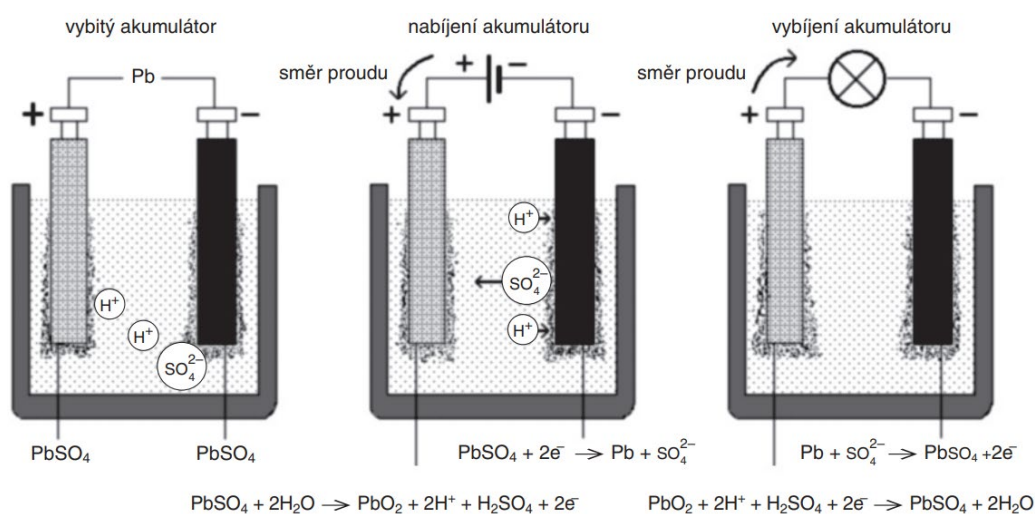
Olověná akumulátorová baterie byla objevená v devatenáctém století francouzským fyzikem G.Planté a byla první komerční nabíjecí baterií.

Baterie je založena na reakci mezi olovem, oxidem olova a kyselinou sírovou. Účinnost olověných akumulátorů se liší v závislosti na faktorech, jako je teplota a provozní cyklus, ale typicky se pohybuje mezi 75 % a 85 %. Avšak články se časem vybíjejí (tzv. samovybíjení²), tudíž nemohou být použity pro velmi dlouhodobé skladování energie. Při pečlivém použití články mohou mít životnost 15-30 let (13) (16).

Elektrolytem u olověného akumulátoru, jak bylo zmíněno, je zředěná kyselina sírová (H_2SO_4), anoda je z čistého olova (Pb) a katoda je z oxidu olovičitého (PbO_2). Na obou elektrodách během vybíjení se vytváří síran olovnatý ($PbSO_4$). Celková rovnice vybíjení vypadá takto:



Obrázek 8 Schéma olověného akumulátoru

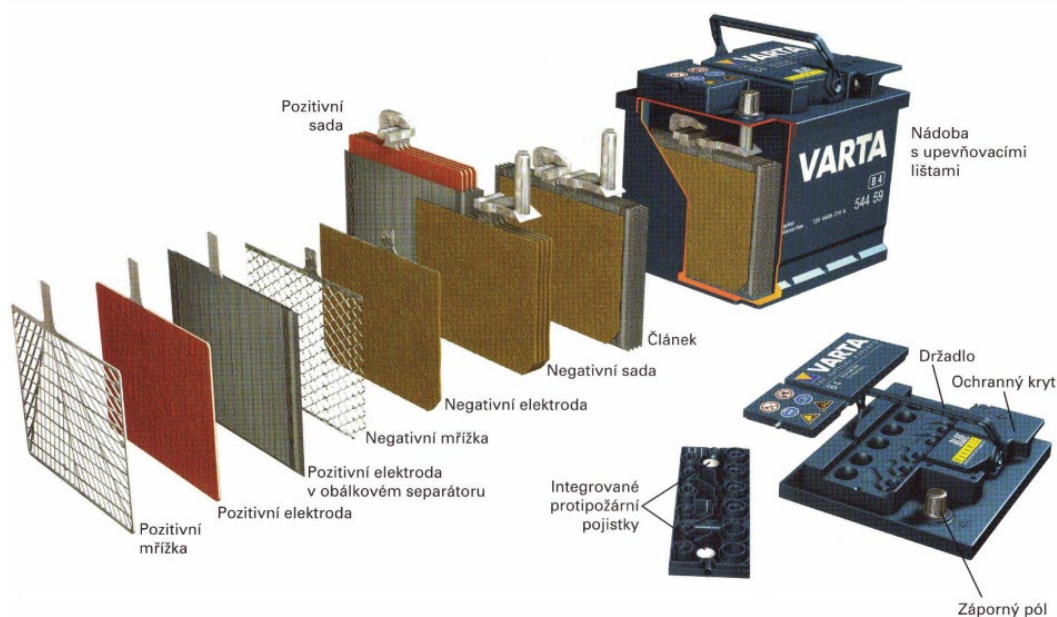


Zdroj: (14)

² Samovybíjení – jev týkající se elektrických baterií, kdy se i bez zapojení spotřebiče baterie vybíjí.

Schéma reakcí nabíjení a vybíjení je nahoře, konstrukce olověného akumulátoru je na obrázku dole, napětí popisovaného olověného akumulátoru je mezi 2,09 V až 2,15 V. Třeba, automobilová olověná akumulátorová baterie je tvořena šesti takovými články zapojených sériově, které produkují na pólů něco málo přes 12 V. Baterie je navržena pro dlouhé a spolehlivé využití, ale hluboké vybíjení výrazně omezuje její životnost, zejména v mrazivém počasí. Olověný akumulátor má měrnou hustotu energie přibližně 10,5 W/h (16).

Obrázek 9 Konstrukce olověné akumulátorové baterie



Zdroj: www.skola-auto.cz

Olověné akumulátory jsou relativně těžké a mají špatnou energetickou hustotu. Kromě toho jsou levné a snadno recyklované.

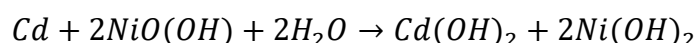
3.4.1.1.2 Nikl-kadmiový akumulátor (NiCd)

Nikl-kadmiový akumulátor je jedním z rodiny niklových akumulátorů, který byl vynalezen na konci 19. století, ale teprve v šedesátých letech se začal hromadně vyrábět (16).

NiCd článek je elektrochemický systém, ve kterém se aktivní materiály obsažené v elektrodách mění během oxidace bez jakéhokoliv zhoršení fyzického stavu. Tyto aktivní materiály jsou přítomny jako pevné látky, které jsou nerozpustné v alkalickém

elektrolytu. Na rozdíl od mnoha jiných systémů, v NiCd systému, jeho nabíjecí a vybíjecí reakce nevyžadují přenos materiálu mezi elektrodami. Elektrody mají dlouhou životnost, protože aktivní materiály v nich nejsou spotřebovány během provozu nebo skladování (17).

V Nikl-kadmiovém akumulátoru aktivním materiálem je nabitá kladná elektroda oxid-hydroxidu niklitého $NiO(OH)$. Anoda je z kadmia Cd a elektrolyt velmi často bývá hydroxid draselný KOH (17). Čistá reakce probíhající v elektrolytu hydroxidu draselného (KOH) během vybíjení může být vyjádřena takto:



během nabíjení tyto reakce probíhají opačným směrem.

NiCd akumulátor chladí, když je nabitý, protože reverzní reakce článku absorbuje tepelnou energii. To umožňuje velmi rychlé nabíjení akumulátoru, s plným nabitím za 2 hodiny nebo méně. Účinnost niklových kadmiových článků je obvykle okolo 70 %. Dříve buňky trpěly paměťovým efektem³. Moderní buňky snížily paměťový efekt, ale neodstranily ho. Akumulátory dobře snášejí hluboké vybíjení, což je výhodou pro skladování energie. Životnost bývá kolem 10-15 let, někdy déle. Existuje také problém s likvidací, protože kadmium je vysoce toxické (16).

Největší nikl-kadmiový akumulátor, který byl postaven, je 40 MW jednotka na Aljašce, která byla dokončena v roce 2003. Zabírá fotbalové hřiště a zahrnuje 13760 jednotlivých článků (16).

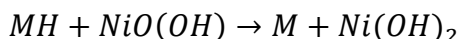
3.4.1.1.3 Nikl-metal hydridový akumulátor (NiMH)

NiMH akumulátory se intenzivně vyvíjeli na konci minulého století, hlavně kvůli náhradě škodlivého kadmia. Komerční úspěch přišel v druhé polovině devadesátých let, kde akumulátor našel své uplatnění v mobilní technice.

Akumulátor má podobnou konstrukci a stejné složení, jen na záporné elektrodě kovová slitina nahradila toxické kadmium. Tato aktivní látka je schopná vázat a uvolňovat vodík během nabíjení a vybíjení. Nejčastěji je tvořena z niklu, kobaltu,

³ Paměťový efekt (memory effect) – jev, který vzniká u NiCd akumulátorů při opakovaném vybíjení na malou, ale vždy stejnou hloubku vybití. Snadno se odstraňuje plným vybitím akumulátoru (34).

manganu a směsí některých vzácných kovů – lanthanu, ceru, neodymu, praseodymu. Celková rovnice vybíjení vypadá následovně:



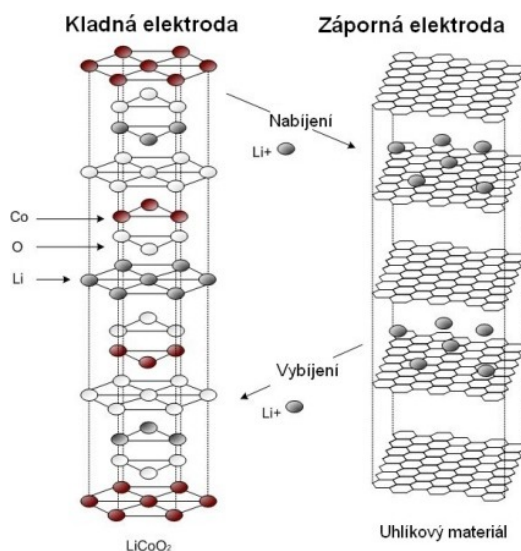
při nabíjení reakce probíhá opačným směrem.

V porovnání s nikel-kadmiovým, nikel-metal hydridový akumulátor má několik předností. Zejména, větší kapacitu z článku podobných rozměru, méně zatěžuje životní prostředí, netrpí paměťovým efektem. Ale na druhou stranu tyto akumulátory, mají menší rozsah odolností (klimatických a mechanických), větší samovybíjení a větší hmotnost (18) (19).

3.4.1.1.4 Lithiové akumulátory (Li-Ion, Li-Pol)

Ze všech kovů dostupných pro chemii baterií je lithium považováno za nejslibnější. Kromě toho, že je široce dostupný a netoxický, je velmi lehký a elektropozitivní. Tato základní výhoda oproti jiným chemikáliím umožňuje, aby akumulátory na bázi lithia měly vyšší potenciál pro skladování energie. Nicméně, lithium je vysoce reaktivní, takže je technologicky náročné postavit bezpečné články obsahující lithium. Tato výzva byla dosud řešena tak, že se nepoužívá kovové lithium, nýbrž sloučeniny, které jsou schopné darovat ionty lithia (Li^+) (20).

Obrázek 10 Princip funkce lithiových akumulátorů

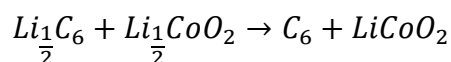


Zdroj: [TZB-info](#)

Čtyři hlavní složky lithium-iontového akumulátoru jsou katoda, anoda, elektrolyt a separátor. Během nabíjení se ionty lithia pohybují z katody přes elektrolyt k anodě a během vybíjení se pohybují zpět. Současné komerční akumulátory jsou pojmenovány

z lithium-iontového donoru na katodě, protože to je hlavní determinantou vlastností článků. Pro tento účel se nejčastěji používají směsi oxidů kovů na kladné elektrodě: lithium-kobalt oxid (LCO = LiCoO_2), lithium-mangan oxid (LMO = LiMn_2O_4), lithium-nikl dioxid (LNO = LiNiO_2) a další, například lithium-vanad oxid (LVO = LiV_2O_5). Tato rozmanitost materiálů má za následek výrazně odlišné charakteristiky baterie. Současný dominantní anodový materiál je grafit, ačkoli někteří výrobce se rozhodli pro non-grafit anody takové jako lithium-titan-oxid (LTO = $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$). Výrobní proces anody je podobný katodě, ale směs se lepí na měděnou fólii v případě anody. Hliníková fólie katody a měděná fólie anody vedou ke svorkám akumulátoru (20).

Během provozu se tvoří ionty lithia, které procházejí elektrolytem k druhé elektrodě, kde vstupují do struktury oxidu kovu. Elektrolytem je obvykle lithiová sůl v organickém rozpouštědle, které poskytuje migrační cestu pro ionty lithia. Na obrázku nahoře ukázáno jednoduché schéma. Celkový průběh vybíjení popisuje rovnice:



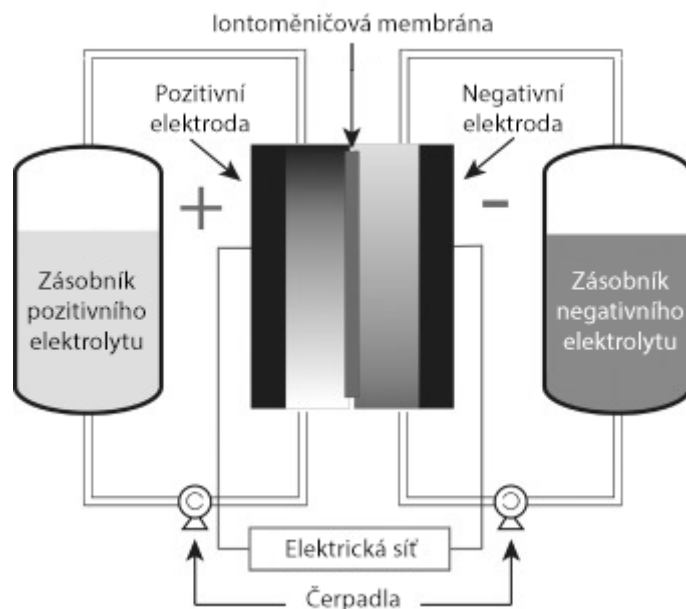
Lithium-iontové články mají nízkou rychlost samovybíjení, vysokou hustotu energie a velmi malý paměťový efekt. To je činí populární pro přenosné zařízení, jako jsou telefony a počítače. Tím se také zvyšuje nahrazování olovených akumulátorů u luxusních výrobků, jako jsou golfové vozíky. V poslední době vzrůstá zájem o jejich využití pro skladování energie (16).

3.4.2 Průtokové baterie

Průtoková baterie (z angl. flow battery or redox flow battery), je jednou z možných technologií pro skladování elektrochemické energie. Základní princip je stejný jako v každém galvanickém článku. Dvě chemické reakce, oxidace a redukce, probíhající odděleně, způsobují elektrický proud v elektrochemickém článku ve formě iontového toku a ve vnějším elektrickém obvodu jako elektrický proud elektronů. Elektrolyty, které podléhají oxidaci nebo redukci, jsou zdrojem chemické energie. Po reakci a uvolnění energie tyto látky způsobí vybití elektrochemického článku. Článek může být dobíjen prostřednictvím externího zdroje napájení. Vyčerpané látky se během nabíjení přeměňují do původního stavu. Průtokové regenerativní baterie se liší od běžnějších elektrochemických článků tím, že reaktivní materiál (elektrolyt) je dodáván z externích skladovacích nádrží. Celková energetická kapacita systému je pak úměrná množství elektrolytu ve vnějších nádobách, zatímco výstupní výkon závisí na uspořádání

elektrod (21). Schematický diagram uspořádání průtokové baterie popisuje následující obrázek dole:

Obrázek 11 Schéma průtokové baterie



Zdroj: (21)

Chemická reakce probíhá v iontoměničové membráně, do které pomocí čerpadel nádrže vhání elektrolyty. Právě zmíněná membrána je slabou konstrukční jednotkou, která má tendenci korodovat a je velmi drahá. Životnost membrány je kolem 15 000 cyklů (22) (23).

Největší výhoda průtokových článků je založena na jejich fyzickém uspořádání, ve kterém se oddělují definující parametry výkonu a energie. Jejich design pak může být založen na potřebách a aplikace mohou být velmi variabilní. Zvýšení kapacity článku lze vyřešit „pouhou“ výměnou nádrže elektrolytu za větší. Podobně, výměna elektrolytu může rychle dosáhnout „nabíjení“. Protože elektrody elektrolytů zůstávají během nabíjení a vybití chemicky nezměněny a elektrolyty podléhají pouze reverzibilním procesům, mají baterie alespoň teoreticky neomezený počet cyklů nabití a vybití. Mezi další výhody patří schopnost velmi rychle reagovat na požadavky sítě, minimální údržbu a nulové emise (21).

Ve srovnání s jinými typy baterií (např. Li-Ion) je hustota výkonu a energie průtokové baterie velmi nízká. To činí buňky nevhodnými pro mobilní aplikace. Pro zvýšení jmenovitého proudu může být zvýšena aktivní plocha elektrod. Ve srovnání

s běžnými bateriemi jsou průtokové články poměrně složité a vyžadují mnoho pomocných zařízení, jako jsou čerpadla, senzory, řídicí jednotky, palivové nádrže a podobně (21).

3.5 Vodíkové hospodářství pro ukládání energie

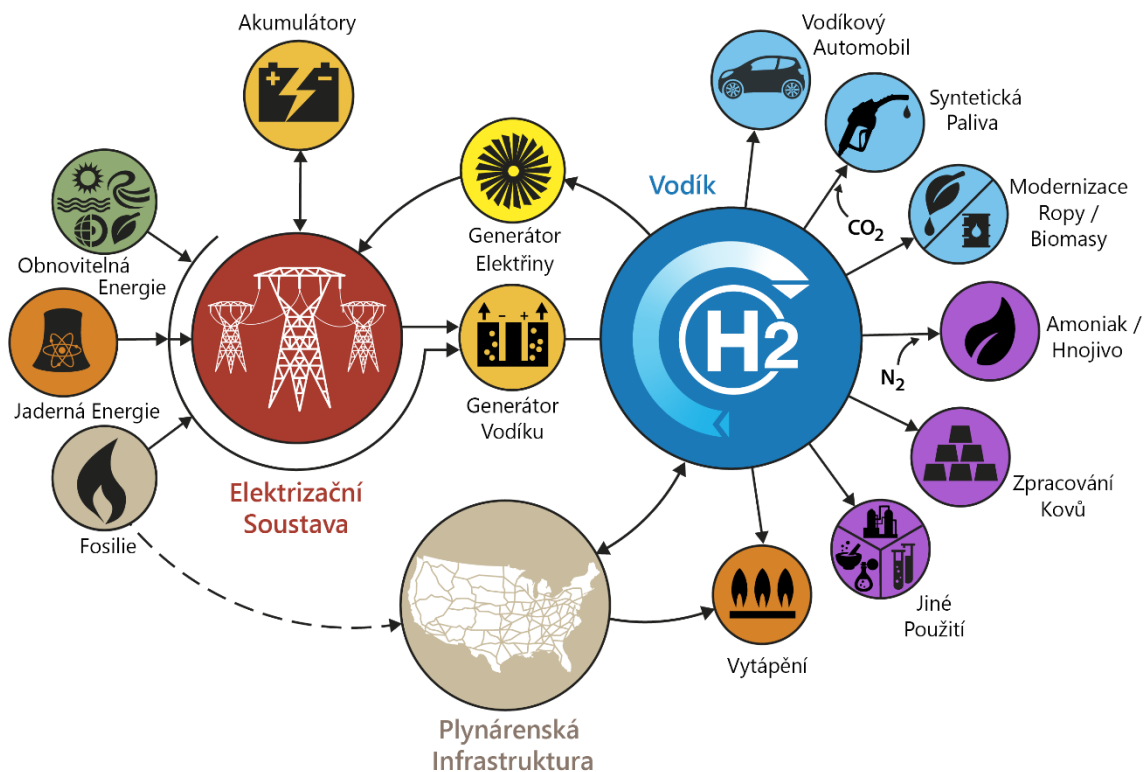
Koncept vodíkového hospodářství se zkoumá od 60. let 20. století a jako zdroj energie vodík se používá už asi 200 let. Tato koncepce obsahuje soubor komplexních technologických operací a činností založených na rozsáhlém využití vodíku (získávání vodíku, jeho skladování, logistiku a následné získávání energie). Na začátku šlo o využití mimošpičkového výkonu především z jaderných elektráren, třeba jako je tomu u přečerpávacích elektráren. V poslední době existuje také možnost využití přebytečného výkonu solárních fotovoltaických systémů a větrných elektráren. Akumulace energie do výroby vodíku je velmi perspektivní u obnovitelných zdrojů energie, aby nerovnoměrnost dodávaného jimi výkonu nedělala problémy v rozvodné síti (14).

Nepopiratelnou výhodou vodíku je jeho čistota. Při zpětném využití výchozím produktem je pouze voda, buď je to spalování v motoru nebo reakce v palivovém článku. Jenže se vodík v čisté formě na Zemi nevyskytuje, a proto si ho musíme vyrábět z jiných sloučenin jako třeba voda, biomasa nebo zemní plyn. Ale jakékoliv způsoby pro získání čistého vodíku potřebují vynaložení energie.

Vodík je obecně považován za slibný nosič energie pro dekarbonizaci silniční dopravy, zmírňování emisí škodlivých plynů a zvyšování bezpečnosti dodávek energie; v důsledku toho vodíkové hospodářství přitahuje stále více pozornosti po celém světě. Řada vlád zveřejnila technologické plány vodíkové ekonomiky, podle kterých mohou vědci a inženýři pozorně sledovat plánovaný vývoj vodíkových technologií (24).

Ve Spojených státech amerických například nedávno Úřad pro energetickou účinnost a obnovitelnou energii Ministerstva energetiky (DOE-EERE), který uznává obrovský potenciál vodíku v dopravě, výrobě energie a průmyslových aplikacích v USA, zahájil iniciativu „vodík v měřítku“ (H2@Scale).

Obrázek 12 Koncepte propojení vodíku se všemi energetickými sektory H2@Scale



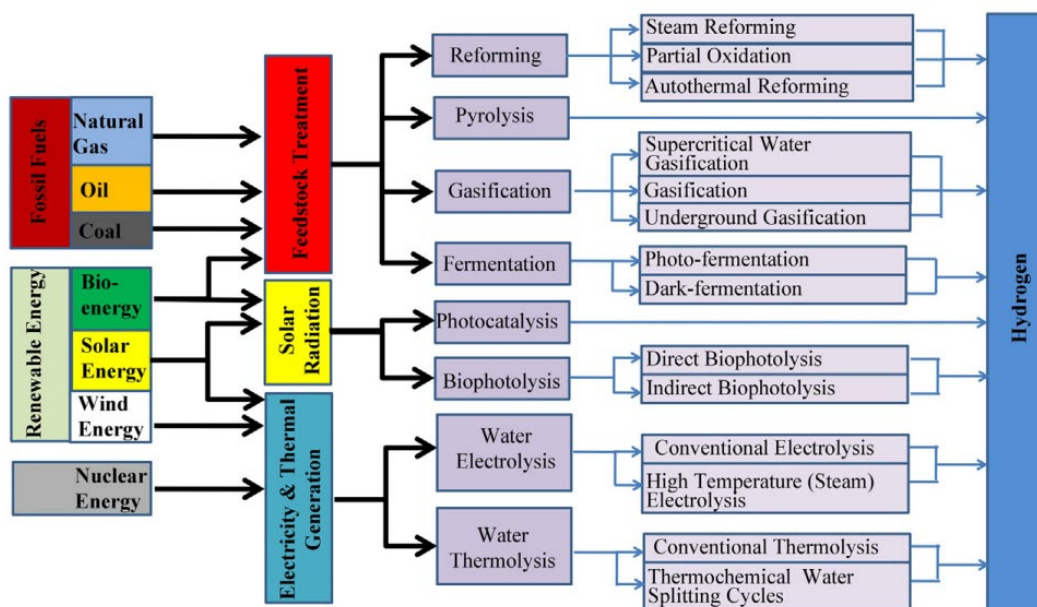
Zdroj: [Argonne National Laboratory](#)

Iniciativa „H2@Scale“ spojuje nízkouhlíkové energetické zdroje se všemi energetickými sektory a je znázorněn na obrázku nahoře. Jaderná, fosilní, větrná a solární energie mohou buď dodávat energii do sítě nebo vyrábět vodík. Vodík může být přeměněn zpět na mřížky elektronů buď palivovými články, nebo spalovacími turbínami. Může být také skladován pro použití jako zdroj tepelné energie prostřednictvím vodíkové nebo plynárenské infrastruktury (25).

3.5.1 Získávání vodíku

Jako nejlehčí, nejjednodušší a nejhojnější chemický prvek ve vesmíru, vodík je vždy vázán s jinými prvky, např. kyslíkem ve vodě, a uhlíkem, dusíkem a kyslíkem v organických sloučeninách za vzniku chemických sloučenin. Aby bylo možné realizovat jedinečné energetické atributy vodíku, přispělo mnoho úsilí k produkci vodíku z různých zdrojů a různými způsoby (26).

Obrázek 13 Způsoby výroby vodíku z fosilních paliv, jaderné energie a obnovitelné energie

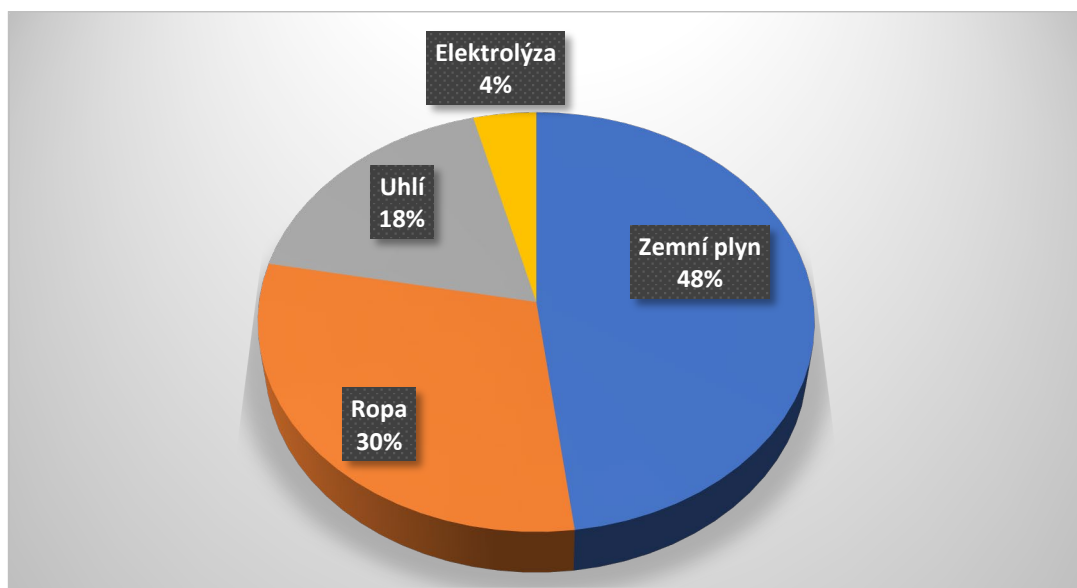


Zdroj: (26)

Jak je vidět na obrázku nahoře, v současnosti existuje 14 cest pro výrobu vodíku ze tří typů energetických zdrojů. Mezi těmito cestami je primární možností rozložit fosilní paliva (tj. zemní plyn, ropu a uhlí) nebo biomasu na vodík a jiné látky pomocí chemických, termochemických a biologických procesů. Další společnou možností je disociace vody na vodík a kyslík využitím elektrické energie nebo tepelné energie vyrobené buď z jaderné energie nebo z obnovitelných zdrojů, tj. větrné a solární (26).

V současnosti představuje využívání vodíku přibližně 1 % všech zdrojů energie (14). V celosvětové produkci dominuje produkce vodíku z fosilních zdrojů. Každý den se vyrábí přibližně 1,4 mld. Nm³ neboli 127 tis. tun vodíku. Na obrázku dole je vidět zastoupení různých zdrojů využívaných v dnešní době (využívají se právě tyto technologie: parciální oxidace ropných frakcí a zplyňování uhlí, parní reforming zemního plynu) (27).

Obrázek 14 Rozložení zdrojů, z nichž se v současné době získává vodík



Zdroj: (27)

Zohlednění všech metod zabere hodně času a prostoru. Proto považujeme za populární a komerčně úspěšné metody výroby vodíku.

3.5.1.1 Získávání z fosilních zdrojů

Jak už bylo zmíněno, získávání vodíku z fosilních zdrojů, resp. ropy, zemního plynu a uhlí, je nyní nejrozšířenější, a tudíž nejlevnější metodou výroby vodíku. Technologie se liší podle druhu vstupních surovin a dělí se na tři základní způsoby.

3.5.1.1.1 Parní reforming, parciální oxidace, zplyňování

Parní reformování (z angl. steam reforming) to je technologie, která vychází na vstupu ze zemního plynu a lehkých ropných frakcí s následným rozkládáním při teplotách přibližně 800 °C a při tlacích do 4 MPa vodní parou za použití vhodných katalyzátorů. Použitím této metody získáváme směs vodíku a oxidu uhelnatého (27).

3.5.1.1.2 Parciální oxidace

Při parciální oxidaci vstupní látkou je těžký ropný olej. Proces probíhá podobně jako u parního reformingu jen při teplotách 1200 až 1500 °C a tlaku mezi 3 a 4 MPa bez přítomnosti katalyzátoru. Na konci při parciální oxidaci vznikají saze (27).

3.5.1.1.3 Zplyňování uhlí

Zplyňování uhlí probíhá při vysokých teplotách (~1200 °C) a uhlí je částečně oxidováno vzduchem a vodní parou za vzniku směsi vodíku, oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého, dusíku a methanu. Téměř 30 až 40 % uhlí na vstupu je využito k dosažení

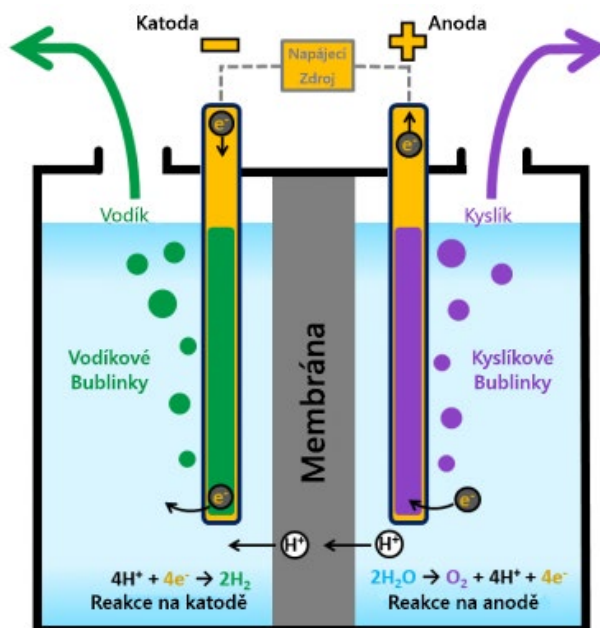
a udržování požadované teploty. Tato metoda v současnosti není rozšířená vzhledem k vysoké energetické náročnosti (27).

3.5.1.2 Elektrolýza vody

Vodík vyrobený elektrolýzou vody je jednodušší a účinnější metodou, jak používat fluktuující obnovitelné primární zdroje energie (26). Technologii elektrolýzy vody můžeme rozdělit podle skupenství vstupující vody na nízkoteplotní (kapalná) a vysokoteplotní (vodní pára). Dále ji lze rozdělit podle iontu přenášejícího náboj na kyselou (ionty H^+) a alkalickou (ionty OH^-). V případě vysokoteplotní elektrolýzy přenášejí náboje ionty O^{2-} (28).

Dlouhou historii má elektrolyzátor používající kapalný elektrolyt (nejčastěji KOH) a je již průmyslově zavedený proces, který se úspěšně používá i v MW modulech. Vybavený dvěma elektrodami ponořenými v kapalném alkalickém elektrolytu (typicky alkalický roztok s koncentrací 20 % až 30 % hydroxidu draselného). Membrána se používá v elektrolyzátoru pro oddělení katody a anody, přičemž vodík a kyslík jsou od sebe odděleny. V takovém systému migrují hydroxylové ionty elektrolytickým materiálem (26). Na katodě vzniká vodík a na anodě kyslík. Schéma elektrolyzátoru je znázorněno na obrázku dole.

Obrázek 15 Schématické znázornění elektrolyzátoru pro elektrolýzu vody



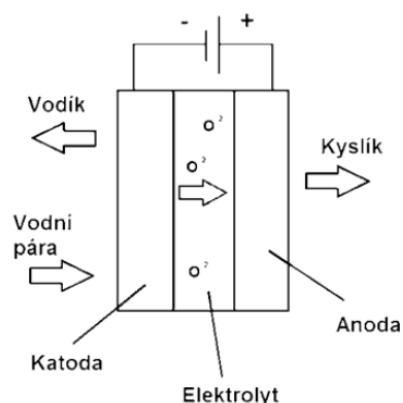
Zdroj: <https://www.energy.gov>

K výhodám elektrolýzy patří možnost použití různých zdrojů na vstupu a vysoká čistota vodíku. Další výhodou mohlo být použití přebytečné energie z obnovitelných zdrojů právě k elektrolytickému rozkladu. Potenciál elektrolýzy však limituje nízká účinnost výroby vodíku a nízká flexibilita. Příliš mnoho energie je ztraceno v procesu. Nevýhodou může být omezená schopnost provozu při proměnlivém výkonu a cena elektrické energie.

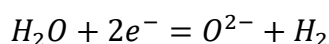
3.5.1.3 Vysokoteplotní elektrolýza

Při vysokoteplotní elektrolýze (z angl. high-temperature electrolysis, HTE nebo steam electrolysis) je typický, že část vstupní energie tvoří elektrická energie, a část je dodávána ve formě tepla. Elektrolytický článek se skládá z anody, katody a elektrolytu. Schéma takového článku je znázorněno na Obrázek 16.

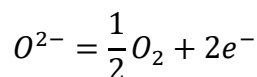
Obrázek 16 Schéma vysokoteplotního elektrolyzéry pro elektrolýzu vody



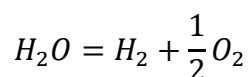
Do elektrolyzéry vstupuje směs páry a vodíku (přibližně 10 % hm.). Vodík je nutný pro fungování elektrolýzy, on udržuje reduktivní prostředí na katodě (27). Vysokoteplotní elektrolýza vody probíhá při teplotách od 700 do 900 °C. Elektrony ze zdroje energie štěpí molekuly vody na elektrodách za vzniku vodíku a kyslíkového aniontu dle reakce:



Vodík odchází společně se zbytkem vodní páry a iont kyslíku O^{2-} prochází přes iontově vodivý elektrolyt na anodu, kde dochází ke vzniku kyslíku dle reakce:



Z katodového prostoru vychází směs obsahující vodík a vodní páru (cca 90 % hm. vodíku), která se oddělí kondenzací. Celková rovnice elektrolýzy vody je podle reakce:



Vysokoteplotní elektrolýza díky zmenšené spotřebě elektrické energie a snadnějšímu překonání aktivační bariéry na povrchu elektrody má větší účinnost (28).

3.5.2 Skladování a logistika

Nejvhodnější forma skladování vodíku závisí na jeho aplikaci. Aplikace v dopravním sektoru vyžadují skladování určitého objemu, který může být umístěn ve vozidle a určité hmotnosti, která neomezuje nosnost vozidla (29).

3.5.2.1 Skladování v plynné formě

Skladování vodíku ve formě stlačeného plynu je dnes běžnou formou skladování. Vodík lze skladovat jako i ostatní plyny do standardních tlakových láhví s tlakem 10-20 MPa (29). Tlakové láhve jsou vyrobené z legovaných chrom-molybdenových ocelí. Do lahvi s vodním objemem 50 litrů (plnicím tlak 20 MPa) lze uskladnit 8,9 m³ vodíku (30).

Při práci s vodíkem je třeba vzít v úvahu vysokou výbušnost směsi se vzduchem (rozmezí koncentrace od 4 do 77 %). Vodík je bez zápachu a není snadno zjistit jeho únik, proto je nutné při dlouhodobějším skladování zajistit dostatečné větrání (30).

3.5.2.2 Skladování v kapalně formě

Další možnost je skladování vodíku v kapalně formě. Vodík totiž musí být ochlazen pod teplotu varu při požadovaném tlaku (při normálním tlaku je teplota varu -253 °C). Proces zkvalňování vyžaduje a průmyslové zařízení a velmi čistý vodík, stejně jako několik cyklů komprese, chlazení kapalným dusíkem nebo heliem a expanzí. Technologie skladování kapalného vodíku byla původně vyvinuta pro kosmická vozidla (29).

3.5.2.3 Skladování ve formě kovových hydridů

Molekulární vodík je disociován na atomy vodíku a navázán do kovů určitých sloučenin. Je to umožněno, pokud je vhodná mřížková struktura kovu nebo slitiny, existují intersticiální polohy schopné vmístit relativně malé vodíkové atomy, resp. ionty H⁺. Energie spojená s těmito změnami může být poměrně skromná. Působením tepla vodík vstoupí do mřížky a teplo musí být přiváděno, aby se vodík opět dostal z mřížky (29).

Výhodou metal-hydridových skladovacích systémů může být to, že vodík se stává součástí chemické struktury kovů, a proto dále není zapotřebí vysoký tlak nebo kryogenní teplota pro osobní provoz, jak je tomu u předešlých způsobů. Hydridy jsou nejbezpečnější ze všech systémů skladování, protože vodík se uvolňuje z hydridů při nízkém tlaku (31).

3.5.3 Energetické využití vodíku

Zásadně vodík můžeme využít dvěma způsoby. A je to buď přímým spalováním v plynové turbíně nebo ve spalovacím motoru, či řízenou elektrochemickou reakcí v palivovém článku.

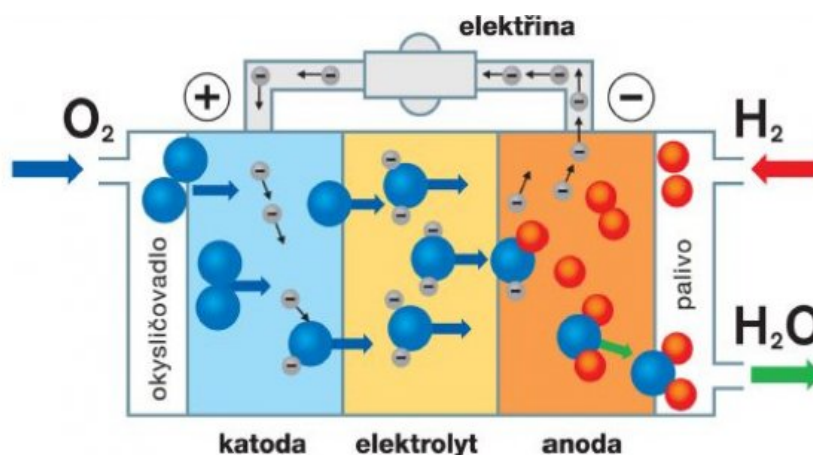
3.5.3.1 Vodíkové spalovací motory

Vodíkové spalovací motory byly zkoušeny už od 20.let minulého století (vzducholodní motory, Ricardo a Maybach). Vodík hoří velmi rychle reakční kinetikou. Výhřevnost vodíku je přibližně $100 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (zaleží na čistotě). Plamen vodíku v důsledku vysoké výhřevnosti je stabilní i při slabé směsi, což lze využít pro omezení emisí oxidů dusíku. Tyto chudé směsi vyžaduje proto vstřík vodíku do válce až během sání a přeplňování. Spalováním vodíku vzniká pouze vodní pára a malé množství oxidů dusíku, nevznikají oxidy uhlíku a síry ani jiné škodliviny. Vývoji spalovacího motoru na vodík se dnes věnují i některé významné evropské a světové automobilky (14) (27).

3.5.3.2 Palivové články

Ve zmíněném palivovém článku (z angl. fuel cells) energie akumulovaná do vodíku může být znovu přeměněná řízenou elektrochemickou reakcí na elektrickou energii. Palivový článek je zařízení, které přeměňuje chemickou energii v palivu a generuje elektrický proud za vzniku malého množství tepla (14). Poprvé v praxi tento článek byl využit v 60. letech v rámci programů Gemini a Apollo ve vesmíru. Po dlouhé době se to stálo vnímat jako náhrada nabíjecích akumulátorů v automobilech s elektrickým pohonem (32).

Obrázek 17 Princip palivového článku



Zdroj: [Třípól - časopis pro studenty](#)

Nejjednodušší palivové články jsou založené na slučování vodíku s kyslíkem. Jejich princip je na obrázku nahoře. Elektrody jsou odděleny elektrolytem, ve kterém vzniká třífázové rozhraní, kde dochází k oxidaci paliva a k redukci okysličovadla (14).

Nyní existují palivové články s různým provedením, rozměry a výkony, všichni mají své přednosti a omezení. Ale palivové články pracují nejlépe při 30 % zatížení; vyšší zatížení snižuje jejich účinnost. Tento aspekt a špatná odezva regulátoru předurčují palivový článek k použití jako pomocné zařízení nebo jako nabíječku. K tomu, aby palivové články sloužily jako samostatné zdroje energie, jak vývojáři doufali, zatím nedošlo (33).

3.5.3.3 Výhody a nevýhody

Vodíkové hospodářství není ideální způsob pro akumulaci elektrické energie. Jako u všeho jsou výhody a nevýhody.

Hlavní výhodou vodíku samozřejmě je jeho čistota. On není toxický a během zpracování nedochází ke znečištění životního prostředí. Následující výhodou je dostupnost vodíku, popř. jeho výskyt ve vodě.

Mezi hlavní nevýhodou zůstává již zmíněný problém s cenou získání vodíku a s tím i spojený problém se skladováním a jeho přepravou. Další nevýhodou je relativně nízká účinnost při výrobě elektrolýzou. Také je problém s vysokou cenou palivových článků a bezpečností vodíku. Zatím ještě nedošlo k rozšířenému používání vodíku (27) (33).

4 Porovnání technologií

Je dobře známo, že žádná technologie pro akumulace energie nemůže splnit požadavky pro všechny aplikace energetických systémů. Komplexní analýza různých technologií poskytuje jasné zobrazení pozic různých výkonů a charakteristik systémů (34).

V níže uvedené tabulce dole jsou charakteristiky jednotlivých technologií, kterými jsem se v této práci zabýval. Tímto způsobem můžeme udělat účelnější představu o důležitých hodnotách různých systémů akumulace energie. Současně je zřejmé, že systém, který má například nízkou životnost, naopak předbíhá v energetické hustotě atd.

| Č. | Technologie | Hustota energie (Wh/L) | Výkon (MW) | Kapacita (MWh) | Doba odezvy (čas) | Životnost (roky) |
|----|-------------------------|------------------------|------------|----------------|-------------------|------------------|
| 1 | Přečerpávací elektrárna | 0,5–1,5 | 100–5000 | 500–8000 | m | 40+ |
| 2 | Stlačený vzduch | 3–6 | <300 | <1000 | m | 20+ |
| 3 | Setrvačnick | 20–80 | 0,1–20 | <5 | s | 15–20 |
| 4 | Teplo (TES) | 80–500 | 0,1–300 | – | – ⁴ | 5–20 |
| 5 | Superkapacitor | 10–30 | 0–0,3 | 0,0005 | ms | 10–30 |
| 6 | Pb akumulátor | 50–80 | 0–40 | 0,001–40 | ms | 5–15 |
| 7 | NiCd akumulátor | 60–150 | 0–40 | 6,75 | ms | 3–20 |
| 8 | Li-ion akumulátor | 200–500 | 0–100 | 0,024 | ms | 5–15 |
| 9 | Palivový článek | 500–3000 | <50 | 0,312 | s | 5–15 |

Tabulka 2 Technické vlastnosti technologií skladování elektrické energie

Zdroj: (34)

⁴ Ne pro rychlou reakci

5 Závěr

Cílem této práce bylo popsat problematiku akumulace elektrické energie. Což je v podstatě řešením pro lepší implementaci obnovitelných zdrojů a snížení závislosti na fosilních zdrojích energie.

Rešeršní část práce zahrnuje tyto systémy a technologie, rozdělené podle druhu energie na mechanickou, tepelnou, elektromagnetickou, elektrochemickou a chemickou (vodíkové hospodářství): přečerpávací vodní elektrárny (PHS), systémy stlačeného vzduchu a setrvačnicků, tepelné systémy (TES), superkondenzátory, akumulátory a baterie, a takže skladování energie ve vodíku. Každý z uvedených způsobů má své klády a zápory, a to je rozepsáno v jednotlivých podkapitolách. V další části jsem se snažil technologie porovnat.

Otázka akumulace energie je velmi důležitá a třeba věnovat pozornost a hledat alternativy. Zejména pro snížení spalování fosilních paliv, a tím zmírnění antropogenního vlivu na životní prostředí. Také pro uspokojení energetických potřeb obyvatelstva a vyrovnání nerovnoměrného odběru energie během dne.

Můžeme předpokládat, že v budoucnu všechny popsané způsoby akumulace energie budou dále používány a vylepšeny.

6 Literatura

1. Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A. and Efthimiou, V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. August–September, 2009, Vol. 13, 6-7.
2. Parkin, Robert E. *Building-Integrated Solar Energy Systems*. Boca Raton; London; New York : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. 978-1-4987-2776-1.
3. M., Libra a V., Poulek. *Fotovoltaika, teorie i praxe využití solární energie*. Praha : ILSA, 2009. Sv. 12. 978-80-904-311-0-2.
4. Energy Storage. <http://www.heco.com>. [Online] Hawaiian Electric Company, Inc., 11 18, 2015. [Cited: 12 09, 2018.]
<https://www.hawaiianelectric.com/portal/site/heco/menuitem.508576f78baa14340b4c0610c510b1ca/?vgnextoid=94600420af0db110VgnVCM1000005c011bacRCRD&vgnnextchannel=ab020420af0db110VgnVCM1000005c011bacRCRD&vgnnextfmt=default&vgnextrefresh=1&level=0&ct=article>.
5. IRENA. *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*. Abu Dhabi : autor neznámý, 2017. 978-92-9260-038-9.
6. European Renewable Energy Network. *European Parliament Committees*. [Online] 01 2012. [Cited: 12 09, 2018.]
<http://www.europarl.europa.eu/document/activities/cont/201202/20120208ATT37544/20120208ATT37544EN.pdf>.
7. Breeze, Paul. *Power System Energy Storage Technologies, Chapter 6 - Flywheels, Pages 53-59*. s.l. : Academic Press, 2018. ISBN 9780128129029.
8. Cabeza, L. F., et al. *Introduction to thermal energy storage (TES) systems, Pages 1-28*. s.l. : Woodhead Publishing, 2015. ISBN 9781782420880.
9. Mehling, H. a Cabeza, L.F. *Heat and Cold Storage with PCM: An Up to Date Infroduction into Basics and Applications*. Heidelberg : Springer, 2008. 9783540685579.
10. Sharma, S. D., Sagara, K. Latent Heat Storage Materials and Systems. *International Journal of Green Energy*. 2005, Vol. 2, 1–56.

11. Alva, G, Lin, Y a Fang, G. An overview of thermal energy storage systems. *Energy*. 2018, Sv. 144, Pages: 341-378.
12. Tiwari, G.N., Tiwari, Arvind and Shyam. *Handbook of Solar Energy*. Singapore : Springer, 2016. 978-981-10-0805-4.
13. BU-209: How does a Supercapacitor Work? *Battery university*. [Online] [Cited: 02 03, 2019.] http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor.
14. Libra, Martin, Mareš, Jan a Poulek, Vladislav. Akumulace elektrické energie. *Časopis Elektro*. 2011, Sv. 2, 6-10.
15. Libich, Jiří, et al. Supercapacitors: Properties and applications. *Journal of Energy Storage*. 2018, Vol. 17, Pages 224-227.
16. Breeze, Paul. *Power System Energy Storage Technologies*. s.l. : Academic Press, 2018. pp. 45-52. ISBN 9780128129029.
17. Zhang, L. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*. s.l. : Elsevier, 2001. pp. 463-483. 9780080431529.
18. NiMH akumulátory. *Abeceda baterií a akumulátorů | BATTEX.info*. [Online] [Citace: 19. 03 2019.] <http://www.battex.info/?id=58>.
19. Marek, Jiří a Stehlík, Luděk. *Hermetické akumulátory v praxi / Jiří Marek, Luděk Stehlík*. Praha : IN-EL, 2004. 80-86230-34-1.
20. Zubi, Ghassan, et al. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, Vol. 89, Pages 292-308.
21. Vanýsek, Petr and Novák, Vítězslav. Redox flow batteries as the means for energy storage. *Journal of Energy Storage*. October, 2017, Vol. 13, Pages 435-441.
22. BU-210b: How does the Flow Battery Work? *Battery University*. [Online] [Cited: 03 18, 2019.] https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_210b_flow_battery.
23. Reichl, Tomáš. Průtoková baterie. *oEnergetice.cz*. [Online] 14. 03 2015. [Citace: 18. 03 2019.] <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/prutokova-baterie/>.

24. Ajanovic, Amela. On the economics of hydrogen from renewable energy sources as an alternative fuel in transport sector in Austria. *International Journal of Hydrogen Energy*. August, 2008, Sv. 33, 16.
25. Hydrogen at Scale. *Argonne National Laboratory*. [Online] 12 11, 2018. [Cited: 03 28, 2019.] <https://www.anl.gov/es/article/hydrogen-at-scale>.
26. Xu, Di, Dong, Lichun and Ren, Jingzheng. Chapter 2 - Introduction of Hydrogen Routines. *Hydrogen Economy*. s.l. : Academic Press, 2017.
27. Doucek, Aleš, Tenkrát, Daniel a Dlouhý, Petr. Vodíkové hospodářství a možnosti využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie. *Paliva*. 1, 2011, 1-7.
28. Tkáč, Martin a Stehlík, Karin. Centrální výroba vodíku. *Chemické listy*. 2, 2017, Sv. 111, 121-128.
29. Sørensen, Bent. *Hydrogen and Fuel Cells*. s.l. : Academic Press, 2005. 978-0-12-655281-2.
30. Tuček, Vít, Dvořáková, Ludmila a Hanzal, Jiří. *Vodík*. [Dokument 03/04] Praha : Česká asociace technických plynů, 2004.
31. Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství ve světě a možnosti uplatnění v ČR. *Informační portál Ministerstva průmyslu a obchodu*. [Online] 2006. [Citace: 30. 03 2019.] <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/01.pdf>.
32. Kabeš, Karel. Vodíkové hospodářství – nový základ energetické politiky EU. *Časopis Elektro*. 03, 2005, 30.
33. BU-210: How does the Fuel Cell Work? *Battery University*. [Online] 01 17, 2017. [Cited: 03 30, 2019.] https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/fuel_cell_technology.
34. Luo, Xing, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*. January, 2015, Vol. 137, Pages 511-536.
35. Paměťový efekt (memory effect). *Abeceda baterií a akumulátorů BATTEX.info*. [Online] [Citace: 12. 03 2019.] <http://www.battex.info/hermeticke->

akumulatory/povery-a-myty-o-hermetickych-akumulatorech/pametovy-efekt-memory-effect.

7 Seznam obrázků a tabulek

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 Schéma kompenzačního provozu přečerpávací vodní elektrárny..... | 4 |
| Obrázek 2 Schéma čerpadlového provozu přečerpávací vodní elektrárny..... | 4 |
| Obrázek 3 Akumulace energie do stlačeného vzduchu..... | 6 |
| Obrázek 4 Schéma setrvačnickového akumulátoru energie..... | 7 |
| Obrázek 5 Akumulační věž pro dálkové vytápění v Dolním Rakousku s tepelnou kapacitou 2 GWh..... | 8 |
| Obrázek 6 Hustota výkonu jako funkce hustoty energie u různých energetických zařízení..... | 11 |
| Obrázek 7 Schéma sekundárního článku..... | 14 |
| Obrázek 8 Schéma olověného akumulátoru..... | 15 |
| Obrázek 9 Konstrukce olověné akumulátorové baterie..... | 16 |
| Obrázek 10 Princip funkce lithiových akumulátorů..... | 18 |
| Obrázek 11 Schéma průtokové baterie..... | 20 |
| Obrázek 12 Koncepce propojení vodíku se všemi energetickými sektory H2@Scale..... | 22 |
| Obrázek 13 Způsoby výroby vodíku z fosilních paliv, jaderné energie a obnovitelné energie..... | 23 |
| Obrázek 14 Rozložení zdrojů, z nichž se v současné době získává vodík..... | 24 |
| Obrázek 15 Schématické znázornění elektrolyzéry pro elektrolýzu vody..... | 25 |
| Obrázek 16 Schéma vysokoteplotního elektrolyzéry pro elektrolýzu vody..... | 26 |
| Obrázek 17 Princip palivového článku..... | 28 |
| Tabulka 1 Země s největší instalovanou kapacitou PHS v roce 2017..... | 5 |
| Tabulka 2 Technické vlastnosti technologií skladování elektrické energie..... | 30 |