



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

ANALÝZA RIZIK AKUMULACE ENERGIE RISK ANALYSIS OF ENERGY STORAGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ ALBERT

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MAREK BALÁŠ, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Albert

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza rizik akumulace energie

v anglickém jazyce:

Risk analysis of energy storage

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době je velkým tématem ukládání přebytečné elektrické energie do jiných médií tak, aby byla snadno využitelná v případě potřeby. Práce bude obsahovat analýzu možných systémů ukládání elektrické energie.

Cíle bakalářské práce:

- 1/ popište systémy akumulace elektrické energie
- 2/ proveďte porovnání jednotlivých systému
- 3/ určete vhodnost jednotlivých systémů pro aplikaci v okolí Brna

Seznam odborné literatury:

Quaschninh Volker: Obnovitelné zdroje energií. Praha, Grada 2010, ISBN: 978-80-247-3250-3

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marek Baláš, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 19.11.2014



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

Analýza rizik akumulace energie

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou rizik akumulace elektrické energie neboli problémy s jejím uskladněním. V první části jsou popsány jednotlivé systémy akumulace elektrické energie a jsou uvedeny jejich výhody a nevýhody. V druhé části jsou systémy vůči sobě porovnány. V závěrečné části je určena vhodnost jednotlivých systémů a jejich využití pro aplikaci v okolí Brna.

KLÍČOVÁ SLOVA

Akumulace energie, akumulátor, REDOX systém, superkapacitor, vodíkové hospodářství, přečerpávací vodní elektrárny, CAES systém, LAES systém.

ABSTRACT

This bachelor thesis analyzes the risk of accumulation of electrical energy and problems with its storage. The first part describes the various storage systems of electricity and are given their advantages and disadvantages. In the second part systems are compared against each other. The final section is intended suitability of each system and its use for application in the vicinity of Brno.

KEYWORDS

Energy storage, battery, REDOX system, super-capacitor, hydrogen economy, pumped hydroelectric energy storage, CAES system, LAES system.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ALBERT, T. *Analýza rizik akumulace energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. XY s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Baláš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Analýza rizik akumulace energie vypracoval sám s použitím odborné literatury, která je součástí příloh, pod vedením Ing. Marka Baláše Ph.D..

V Brně dne 20. května 2015

.....
Tomáš Albert

OBSAH

1. ÚVOD	9
2. SYSTÉMY AKUMULACE ENERGIE.....	10
2.1 Elektrochemické akumulátory	10
2.1.1 Klasické akumulátory	10
2.1.2 REDOX systém	12
2.2 Elektrochemické akumulátory	13
2.2.1 Superkapacitory	13
2.3 Chemické akumulátory	15
2.3.1 Vodíkové hospodářství.....	15
2.3.2 Biopaliva	16
2.4 Mechanické akumulátory	17
2.4.1 Setrvačníky	17
2.4.2 Přečerpávací vodní elektrárny	18
2.4.3 CAES systém	19
2.5 Magnetické akumulátory	20
2.5.1 Supravodivé indukční akumulátory	20
2.6 Tepelné akumulátory.....	22
2.6.1 Horkovodní a parní akumulátory	22
2.6.2 LAES systém	23
3. POROVNÁNÍ SYSTÉMŮ AKUMULACE ENERGIE.....	25
3.1 Výkon a kapacita	26
3.2 Doba nabíjení a životnost.....	27
3.3 Účinnost	28
4. APLIKACE SYSTÉMŮ AKUMULACE ENERGIE V OKOLÍ BRNA	29
4.1 Globální řešení	29
4.2 Lokální řešení.....	29
4.3 Aplikace jednotlivých systémů.....	29
4.3.1 Elektrochemické akumulátory	29
4.3.2 Palivové články	30
4.3.3 Superkapacitory	30
4.3.4 Biopaliva	30
4.3.5 Setrvačníky	30
4.3.6 Přečerpávací vodní elektrárny	31
4.3.7 CAES systém	31
4.3.8 Supravodivé akumulátory.....	31
4.3.9 Horkovodní a parní akumulátory	31
4.3.10 LAES systém	31
5. ZÁVĚR.....	32

1. ÚVOD

Na začátek bychom si měli položit otázku, proč vůbec chceme energii akumulovat. V současné době přeci spotřebováváme větší množství energie, než jsme schopni vyrobit a poptávka stále roste. Ale jsou i chvíle kdy vyrobená energie nemá odbytu nebo je ztracena ve formě tepelných ztrát a při energetických špičkách a to jsou ztráty, kterým bychom chtěli zamezit.

Podívejme se na problém při energetických špičkách. Největší odběr elektřiny nastává zpravidla třikrát denně. Ráno okolo šesté hodiny kdy se zapínají spotřebiče v domácnostech a spouštějí se tovární stroje, dále kolem šesté hodiny večer kdy se rozsvěcí veřejné osvětlení a osvětlení v domácnostech a pak kolem desáté hodiny večer, kdy se zapínají automatické ohřívače vody. Naopak přes noc je spotřeba elektřiny prakticky nulová.

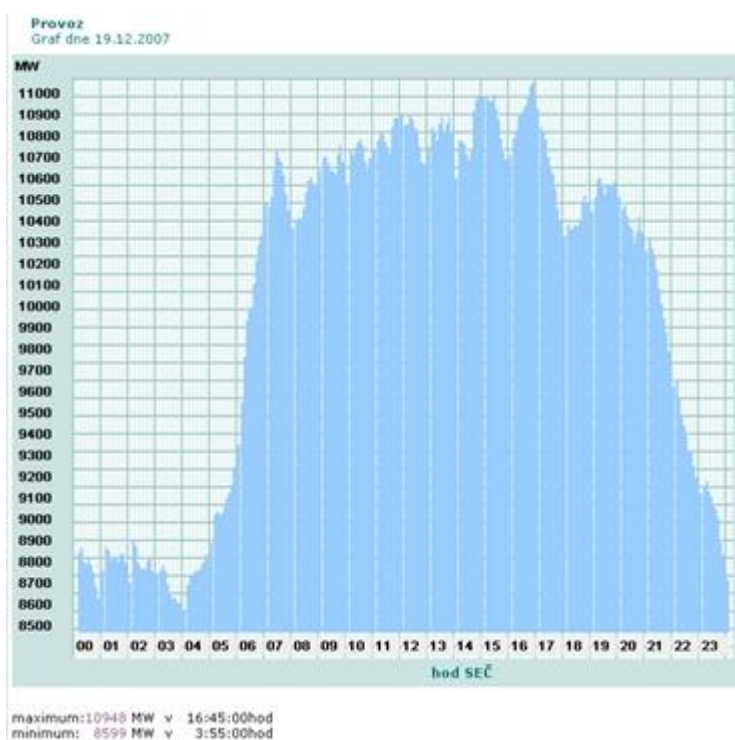
Další výhlyku působí větrné, nebo stále se rozrůstající fotovoltaické elektrárny. Jejich hlavním problémem je, že sluneční energie je vyráběna pouze v dny, kdy je dostatečně slunečno a nelze tedy s určitostí předpovědět, kdy budou elektřinu vyrábět a kdy ne. Obdobně je tomu u větrných elektráren, které jsou závislé na povětrnostních podmínkách. Tím nám vzniká další výkyv výroby elektrické energie, který je úzce závislý na počasí a těžko se reguluje.

O zajištění dostatku elektřiny se primárně starají tepelné a jaderné elektrárny, ale kvůli dlouhým nájezdům a odstávkám nejsou schopny na aktuální situaci rychle reagovat. Uhlíková elektrárna najíždí na plný provoz až půl dne, jaderná elektrárna dokonce několik týdnů. Tyto výkyvy v současné době vyrovnávají přečerpávací vodní elektrárny, nebo vzájemná pomoc z okolních států.

Z těchto a mnoha dalších důvodů je snaha vyrobenou energii akumulovat aby nedocházelo k jejím zbytečným ztrátám. V případě že by byla výroba energie větší než její spotřeba by bylo možno ji uskladnit a využít ji v opačném případě, kdy by se náhle zvýšila spotřeba. V zásadě by bylo možno energii brát z rezerv a předešlo by se následným problémům s vyrovnáváním výkonů v elektrárnách při energetických špičkách. To by vedlo k hospodárnějším zacházení s energií a možnému prodloužení zásob nerostných surovin. V této bakalářské práci jsou v první části popsány možné způsoby akumulace elektrické energie. V druhé hlavní části jsou systémy vůči sobě porovnány z hlediska výhod, nevýhod a rizik spojených s akumulací. Třetí část je zaměřena na možnou aplikaci jednotlivých systémů v okolí Brna.

2. SYSTÉMY AKUMULACE ENERGIE

Co si představit pod pojmem energie? Energie není nic, co bychom si mohli představit v nějaké hmotné formě nebo pod nějakým tvarem. Byla definována fyziky zhruba v polovině devatenáctého století, jako schopnost hmoty konat práci. Z toho nám plyne, že v současné době nejsme ani schopni energii akumulovat v čisté formě a musíme ji přetransformovat do media se kterým již toto možné je. Například elektrická energie, teplo nebo vykonaná práce. Naším hlavním zájmem však není energii trvale uložit, ale dočasně ji akumulovat abychom ji v případě potřeby mohli okamžitě využít.



Obrázek 1 Graf spotřeby elektrické energie [9]

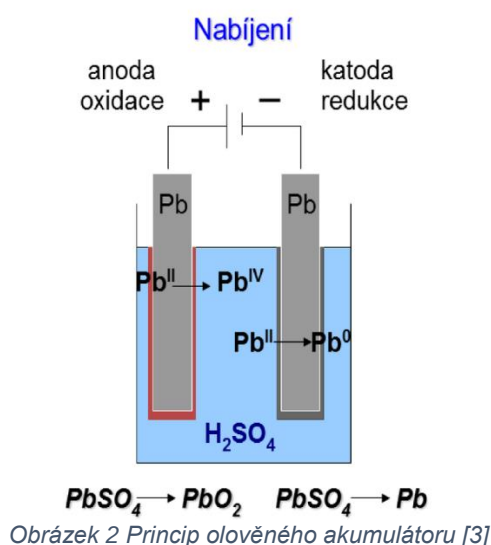
2.1 Elektrochemické akumulátory

2.1.1 Klasické akumulátory

Akumulátor je zařízení, které používáme k akumulaci energie, obvykle ve formě chemické, a jeho základním účelem je přeměna chemické energie na energii elektrickou pomocí připojení ke zdroji. Ke své činnosti využívají různé typy elektrod a elektrolytů. Jedná se o sekundární článek, který je nejprve potřeba nabít a teprve potom je možné jej použít jako zdroj energie. Rozdíl oproti primárním článkům je ten, že primární články poskytují energii ihned po jejich dokončení, ale většinou už není možné je zpětně dobít. Příkladem primárního článku mohou být běžné zinko-uhlíkové baterie, které používáme v domácnostech. Jako příklad sekundárního článku můžeme uvést autobaterii do auta. Pro jednoduchost je můžeme rozdělit na olověné a pokročilé elektrochemické. Jejich princip si vysvětlíme na olověných akumulátorech.[2, 5]

Analýza rizik akumulace energie

Olověné akumulátory se skládají ze dvou olovnatých desek, ponořených do elektrolytu tvořeného roztokem kyseliny sírové H_2SO_4 , které tvoří články. Sériově řazené články tvoří akumulátorovou baterii. Na deskách nenabitého akumulátoru se usazuje síran olovnatý PbSO_4 . Připojením stejnosměrného napětí při nabíjení se tvoří kyselina sírová a na kladné elektrodě se vytváří oxid olovičitý PbO_2 a záporná elektroda se pokryje vrstvou olova. Při tomto ději akumulujeme vzniklou elektrickou energii do chemické reakce. Při vybíjení, po spojení svorek přes zátěž, začne probíhat opačná chemická reakce než při nabíjení a akumulátor mění chemickou energii zpět na elektrickou. Při vybíjení se kyselina sírová spotřebovává. Směr vpravo nabíjení, směr vlevo vybíjení.[4]



Pokročilé elektrochemické akumulátory pracují na stejném principu jako olověné, ale liší se typem elektrod a elektrolytů. S postupným rozvojem bylo olovo nahrazeno jinými kovy. Například můžeme uvést nikl-kadmiové, zinkové nebo železné elektrody v hydroxidu sodném jako elektrolytu. Dále pak lithiové nebo sodíkové akumulátory.

Každý jednotlivý typ elektrochemického akumulátoru má své výhody a nevýhody, které se typ od typu liší. Všeobecně platí, že pokročilé elektrochemické akumulátory jsou oproti stejně těžkým olověným akumulátorům několikanásobně výkonnější. Jsou schopny snést řádově vyšší počet nabíjecích cyklů a také se nabíjí podstatně rychleji než olověné. Největší výhodou elektrochemických akumulátorů je dobře zvládnutá technologie výroby, protože to je jeden z nejdéle používaných způsobů akumulace energie.[2, 5]

Nevýhodou je samovybíjení a citlivost na hluboké vybíjení, při kterém nastávají nevratné změny na elektrodách tzv. paměťový efekt nebo jinak druhý vybíjecí stupeň u některých z nich (např. u nikl-kadmiových akumulátorů) [21, 22]. Tento jev vzniká při opakovaném vybíjení na malou stále stejnou hloubku vybití. Při tomto jevu potenciál článku klesne o několik desetin voltu pod normální hodnotu a drží se tam po celý zbytek vybíjení, při kterém ale nedochází k poklesu kapacity článku. Při dlouhodobém stavu, kdy je akumulátor vybitý může také dojít ke krystalizaci elektrolytu, kde se vzniklé krystaly usadí na elektrodách a zanesou je. Rovněž poměr akumulované energie ke hmotnosti akumulátoru činí tento způsob akumulace málo efektivní.[5] Dalším problémem je také jejich vysoká cena z důvodu použití

Analýza rizik akumulace energie

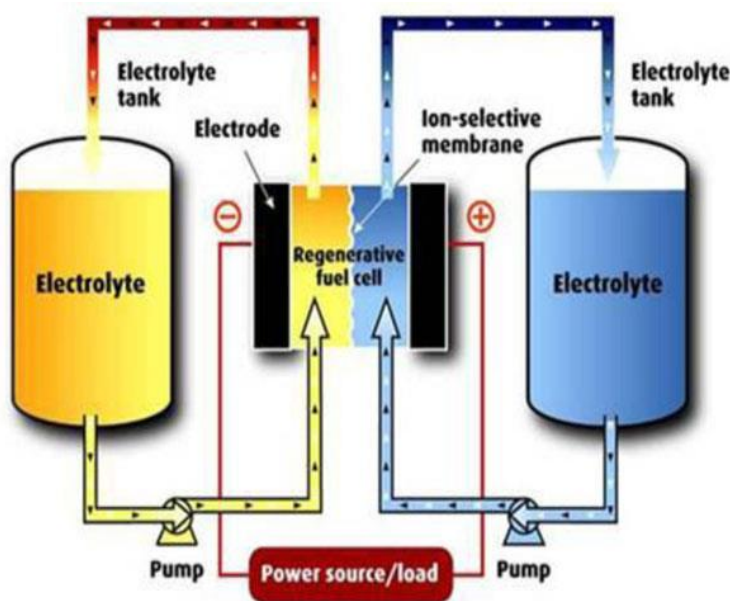
vzácných kovů a nutná ekologická likvidace kvůli toxicitě olova. Tento proces je ale dnes už velmi dobře technologicky zvládnutý. [2, 5, 4]

2.1.2 REDOX systém

Jedná se o technologii SOFC (solid oxid fuel cell). Nejsou omezeny Carnotovým cyklem, protože se nejedná o tepelné motory a také mají nižší emise v porovnání s ostatními technologiemi. Hlavní složkou je vzduch, který je zároveň palivem i okysličovadlem. [16]

Palivový článek se chová jako baterie, která je neustále v chodu. Skládá se z elektrolytu, anody a katody.

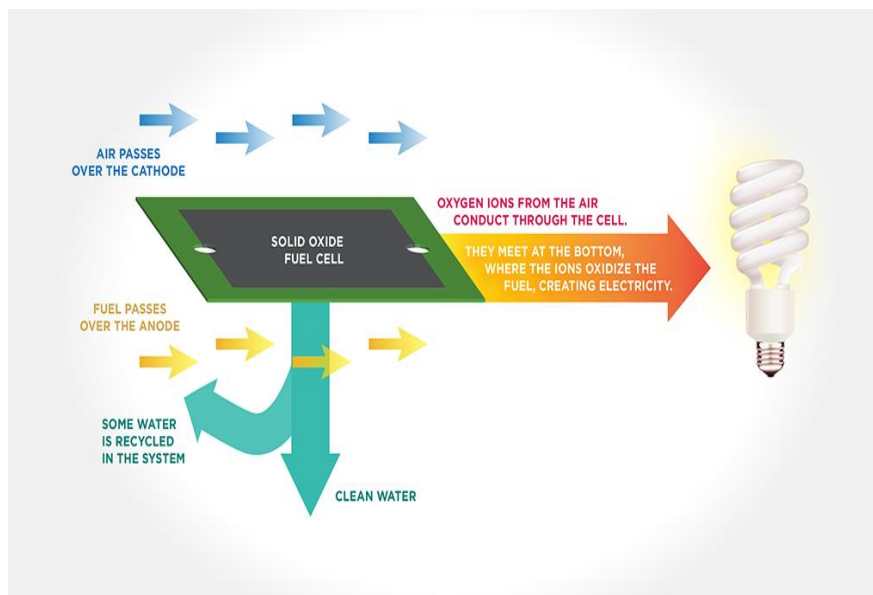
U SOFC je elektrolyt tvořen pevným keramickým materiálem. Anoda a katoda jsou ze speciálního inkoustu, kterým se elektrolyt natře. Na rozdíl od jiných typů palivových článků zde nejsou použity drahé kovy, agresivní kyseliny, a není vyžadován ani žádný tavný materiál. Dále, elektrochemická reakce převádí palivo a vzduch na elektrickou energii bez jakéhokoliv spalování.



Obrázek 3 Princip funkce REDOX systému [17]

SOFC je palivový článek pracující při vysoké teplotě. Směrem od katody do článku vstupuje vzduch a při vysokých teplotách se mění na páru. Směrem od anody do článku vstupuje reformované palivo, které je zde tvořeno metanem. Poté v palivovém článku začíná probíhat chemická reakce. Jak reformované palivo prochází přes anodu, přitahuje ionty kyslíku z katody. Tyto kyslíkové ionty se spojí s reformovaným palivem a vyrábějí elektrinu, vodu a malé množství oxidu uhličitého. Vzniklá voda se recykluje, aby mohla být využita pro vznik páry potřebné pro reformování paliva. Tento proces rovněž generuje teplo, které je využito pro přeměnu vzduchu v páru. Systém produkuje čistou, spolehlivou a cenově dostupnou energii tak dlouho, dokud se mu dostává paliva, vzduchu a tepla.[19, 29]

Analýza rizik akumulace energie



Obrázek 4 Pochody uvnitř systému REDOX [18]

Z experimentální dat a analýz je naznačeno, že elektrolyt by mohl pracovat při nižších teplotách než 800°C které byly u jeho předchůdců. To snižuje náklady na materiál a proces výroby. Kromě toho, krátké vedení z anody z jedné buňky ke katodě vykazuje nižších odporové ztráty, a tedy vyšší účinnost zásobníku.

SOFC je vysokoteplotní technologie, při které vznikají velmi horké výfukové proudy. Ty lze využít jako odpadního tepla. Díky využití vzduchu lze proudy držet odděleně od konstrukce a tím zamezit dodatečným nákladům.[16, 18]

2.2 Elektrochemické akumulátory

2.2.1 Superkapacity

Akumulace energie v superkapacitorech je poměrně nová technologie, která je rozvíjena teprve v několika posledních letech, přestože je známa už více než 50 let. Energie je v superkapacitoru akumulována jako elektrická energie ve formě elektrického náboje a to v podobě elektrického pole nabitého kondenzátoru. Nedochází tedy k přeměně energie jako je tomu například u přečerpávacích vodních elektráren, kde akumulujeme potenciální energii ve formě vody, nebo elektrochemických akumulátorů, kde akumulujeme energii ve formě chemických vazeb a reakcí. [5]

Hlavní součástí, která tvoří superkapacitor je tedy kondenzátor. Kondenzátor můžeme popsat jako elektrotechnickou součástku, která je charakteristická svou vlastností a tou je elektrická kapacita.

Elektrická kapacita vyjadřuje množství elektrického náboje, který je schopen vodič uchovat. Mezi kapacitou a množstvím elektrického náboje platí přímá úměra a tudíž čím větší kapacita, tím větší je množství elektrického náboje, který může být ve vodiči uchován. Energii nabitého kondenzátoru, kterou tento kondenzátor přijme, můžeme vyjádřit pomocí vztahu, který platí i pro superkapacity:

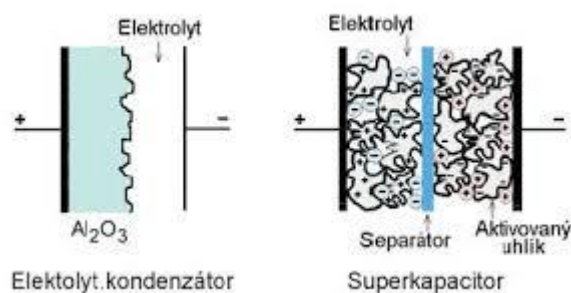
$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 [J] \quad (2.1)$$

Analýza rizik akumulace energie

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} [F] \quad (2.2)$$

Z těchto vztahů vyplývá, že vstupním parametrem, který nám nejvíce ovlivní kapacitu je plocha desek superkapacitoru a jejich vzájemná vzdálenost. Zatím co při omezené hodnotě permitivity ε_i , hodnotu plochy S a vzdálenosti d můžeme libovolně měnit. Při teoreticky nekonečně velké ploše superkapacitoru S a při jejich nekonečně malé vzdálenosti d můžeme dosáhnout nekonečně velké kapacity C a tudíž i nekonečné hodnoty energie W , kterou chceme akumulovat. Avšak bohužel velikost je limitní parametr, který se zatím nepodařilo překonat.

Základem principu funkce superkapacitoru je speciální materiál dvou elektrod s velkou plošnou hustotou (práškový uhlík nanesený na hliníkovou fólii). Tím je zajištěna kapacita v řádu tisíců faradů. Elektrody superkapacitoru jsou odděleny polypropylenovou fólií, která tvoří tzv. separátor a prostor je vyplněn tekutým elektrolytem. V případě potřeby akumulace energie při vyšším napětí můžeme články řadit sériově díky malému sériovému odporu řádově v jednotkách miliohmů. Díky tomu mohou superkapacitory velmi rychle naakumulovat velké množství elektrické energie nebo jej naopak dodat do sítě. Špičkové výkony při uvolnění energie ze superkapacitoru v poměru k jeho hmotnosti jsou v řádech kilowattů na kilogram.[5]



Obrázek 5 Rozdíl kondenzátoru a superkapacitoru [8]

Výhodou superkapacitorů je jejich poměrně vysoká účinnost akumulace, která může být až 95%. Na rozdíl od elektrochemických akumulátorů nedochází ke snižování kapacity v důsledku opakovaného nabíjení a vybíjení a netrpí paměťovým efektem. Jejich funkčnost není výrazně ovlivněna teplotou. Nevýhodou je závislost napětí na uloženém náboji, které může způsobit průraz. To lze minimalizovat použitím napěťových měničů. Také cena je zatím poměrně vysoká v důsledku malého objemu zavedení v průmyslu a zatím nesériovým vyráběním. Díky dobré perspektivě je vývoji superkapacitorů věnována značná pozornost i finanční prostředky pro výzkum a vývoj. Lze proto očekávat další rozvoj tohoto způsobu akumulace energie.[7]

V současné době se superkapacitory nejvíce využívají především v hybridních automobilech a elektromobilech, kde jsou určeny k rychlé akumulaci energie při rekuperaci během brzdění a k rychlému dodání energie pro akceleraci.[5] Dále je lze využít jako krátkodobé záložní zdroje energie. Díky jejich schopnosti rychle dodat velké množství energie je možné je využít jako elektronické pojistky proti přetížení či přepětí nebo toho využít u laserů nebo urychlovačů částic. Superkapacitory se jeví vhodné i pro použití v oblasti fotovoltiky, především jako vyrovnávací akumulátory elektrické energie pro menší systémy spojené se sítí, kde mohou kompenzovat krátkodobé výkyvy výkonu. Jejich použití se rovněž předpokládá

Analýza rizik akumulace energie

v ostrovních fotovoltaických systémech, kde by mohly časem konkurovat klasickým elektrochemickým akumulátorům. [5, 24]

2.3 Chemické akumulátory

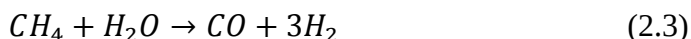
2.3.1 Vodíkové hospodářství

Coby zdroj energie se vodík využívá už přes 200 let a je hlavní složkou syntetických plynů vyráběných zplynováním fosilních paliv i biomasy. V současné době představuje využívání vodíku zhruba 1 % ze všech zdrojů energie a většinou se jedná o vodík získaný z fosilních paliv. Myšlenka využití vodíku jako energetického systému tzv. vodíkové hospodářství se zkoumá od 60. let 20. století.

Hlavní myšlenkou je využití převážně elektrické energie (nebo jiné) k výrobě vodíku elektrolýzou vody a poté jeho jímání a skladování pro pozdější použití. Takto akumulovaná energie může být později přeměněna oxidací vodíku na jiný druh energie, např. elektrickou, mechanickou či tepelnou. K oxidaci může docházet buď přímým spalováním v plynovém kotli či ve spalovacím motoru, nebo řízeně elektrochemickou cestou v palivovém článku.

K výrobě 1 kg vodíku elektrolýzou vody při účinnosti elektrolyzérů $\eta = 90 \%$ a ke zkapalnění 1 kg vodíku je potřeba energie asi 48 kWh. Vodík jako palivo má určité výhody. Jeho výhřevnost je nejvyšší ze všech paliv a to zhruba 100 MJ/kg v závislosti na čistotě. Při spalování vodíku vzniká pouze vodní pára a menší množství oxidů dusíku. Nedochází ke vzniku oxidů uhlíku a síry ani jiných škodlivin. Kapalný i plyný vodík lze použít i jako palivo do spalovacích motorů, ale takové motory musí být k tomu účelu zvláště konstruovány. V současnosti existují automobily i autobusy na vodík i čerpací stanice pro ně určené. Můžeme si jich všimnout v městské hromadné dopravě. Zkapalněný vodík se také používá jako palivo pro raketové motory a do budoucna i pro proudová letadla.

Vodík lze vyrobit i chemickou reakcí metanu za vysokých teplot 800 až 1 700 °C, přičemž nastávají tyto reakce:



Reakce mohou probíhat v tzv. fotochemickém reaktoru, kde se vysokých teplot dosahuje koncentrací slunečního záření.

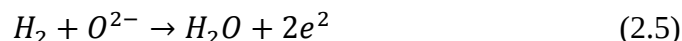
Ke skladování vodíku jsou určeny speciální tlakové zásobníky vyrobené z materiálů nereagujících s vodíkem. V mnoha materiálech totiž vodík difunduje do krystalické mřížky a působí křehnutí materiálu. Vodík lze vázat i na kovové prášky, s nimiž tvoří hydridy kovů. S vodíkem je nutné při jeho skladování zacházet velmi opatrně, podle přísných bezpečnostních norem. Již malé množství vodíku ve vzduchu tvoří výbušnou směs.

Energie akumulovaná do vodíku může být opět přeměněna na elektrickou energii ve zmíněných palivových článcích řízenou elektrochemickou reakcí - tzv. studenou oxidací vodíku neboli studeným spalováním.

Palivové články jsou elektrochemická zařízení přeměňující chemickou energii v palivu během oxidačně-redukční reakce přímo na generaci elektrického proudu za vzniku menšího množství tepla. Kontinuálně musí být přiváděno palivo i okysličovadlo k elektrodám a odváděny spaliny.

Analýza rizik akumulace energie

Nejjednodušší a nejpracovnější jsou palivové články založené na slučování vodíku s kyslíkem. Porézní elektrody jsou odděleny elektrolytem, v oblasti pórů vzniká třífázové rozhraní, kde dochází k elektrochemické oxidaci paliva a k redukci oksysočvadla. Pórovitá elektroda umožňuje elektrolytu vzlínat do pórů, ale tlak plynu za elektrodou nedovoluje kapalině póry pronikat. Elektrody bývají z ušlechtilých materiálů (např. platiny) a fungují i jako katalyzátory chemických reakcí. Na záporné elektrodě nastává reakce:



a dva volné elektrony se předají elektrodě. Na kladné elektrodě nastává reakce:



a dva volné elektrony se přijmou z elektrody. Celkovou reakci lze tedy vyjádřit rovnicí:



Existují palivové články různých konstrukcí, rozměrů a maximálních výkonů. Podle konstrukce a typu mohou pracovat při teplotách od 60 do 1 000 °C, jako palivo mohou používat kromě vodíku např. metan (CH₄), metanol (CH₃OH), hydrazin (N₂H₄) apod., elektrolytem může být např. roztok kyseliny fosforečné (H₃PO₄), hydroxidu draselného (KOH), tavenina alkalických uhličitánů či pevný oxidický elektrolyt (Y₂O₃). Napětí jednoho palivového článku bývá přibližně U » 1 V, články se rovněž mohou skládat sériově do baterií. Zajímavým využitím palivových článků je vodíkový elektromobil, který nemá spalovací motor s přímým vstřikováním, ale palivové články a elektromotor.[2, 5]

2.3.2 Biopaliva

Jedná se o jeden z nejstarších způsobů akumulace energie vůbec. V principu pouze akumulujeme energii všude kolem nás do rostlin. Příkladem toho může být výsadba monokulturních lesů a rychle rostoucích dřevin. Ten způsob akumulace kromě slunečního záření, vody a živin vyžaduje pouze čas a hrubou práci člověka. Není zde potřeba žádného náročného technologického procesu. Tako získanou energii využívají všichni, kteří doma topí dřevem v krbu nebo kamnech.

Biopaliva však nebyla vyvinuta přímo jako způsob akumulace energie, protože se jedná o časově velmi zdoluhavý a energeticky ne příliš účinný proces. Jde spíše o sekundární využití odpadu vzniklého při primární činnosti člověka například štěpka v lese vzniklá při kácení, nebo zpracování dřeva na pile.

Přeměna energie spočívá ve spálení materiálu a využití vzniklého tepla. V tomto směru se za posledních několik let rozvinulo odvětví přímo zaměřené na spalování biomasy a její využití v energetice.

Výhodou je prakticky nulová náročnost na akumulaci energie. Problém vzniká při její přeměně, kdy při spalování hraje roli spousta faktorů. Jedním z hlavních je vlhkost obsažená ve spalovaném materiálu. Další výhodou je znatelně lepší ekologičnost vzhledem k ostatním systémům akumulace.

2.4 Mechanické akumulátory

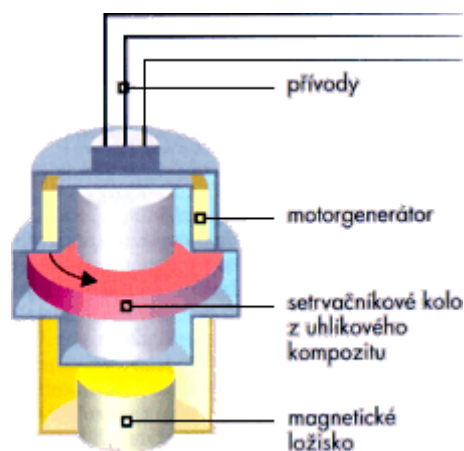
2.4.1 Setrvačníky

Setrvačníky akumulují energii ve formě kinetické energie. Funguje na principu upevnění co nejtěžšího setrvačníku na hřídel elektromotoru. Při roztočení hřídele pomocí elektrické energie se tato energie akumuluje v rotujícím setrvačníku a po odpojení se sítě je odtud odebírána. Při odběru energie ze setrvačníku se setrvačnick změnil na dynamo nebo alternátor a mění kinetickou energii rotujícího setrvačníku na elektrickou energii. Takto akumulovanou energii můžeme vyjádřit pomocí vztahu:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 [J] \quad (2.7)$$

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 [kg \cdot m^2] \quad (2.8)$$

Ze vztahu vidíme, že ideální podmínky pro navýšení energie jsou vysoká uhlová rychlost setrvačníku ω , se kterou se otáčí. Pro zvýšení momentu setrvačnosti kotouče J se setrvačníky dělají co nejtěžší a s co největším poloměrem r . Jako vždy i zde jsem omezení velikostí, kterou je možné ještě využít.



Obrázek 6 Princip setrvačníku [2]

Již před čtyřiceti roky zavedlo Švýcarsko na zkoušku elektrické gyrobusy. Upravené trolejbusy s jedenapůltunovým setrvačnickem pod podlahou na hřídeli elektrického stroje. Po zastavení ve stanici vozidlo vysunulo sběrače k napájecímu stožáru a během jedné a půl minuty proud se sítě urychlil setrvačnick, do jehož otáček se naakumulovala energie 10 kWh. S takovýmto množstvím naakumulované energie je plně naložený elektrobuss schopný v městském provozu ujet nejméně dva kilometry včetně zastávek a křižovatek. Přestože navíc mohou akumulovat i část energie ztracené při brzdění, kvůli gyroskopickému momentu se ani lehčí typy vysokootáčkových gyroskopů u elektromobilu neuplatnily. Roztočený setrvačnick jen velmi těžko mění svojí rovinu rotace. To nepříznivě ovlivňuje dynamiku a stabilitu jízdy zejména při zatáčení.[2]

Analýza rizik akumulace energie

V dnešní době je již upuštěno od těžkých litinových kol setrvačníku a jsou vyráběny z lehkých kompozitních materiálů uložených v magnetických ložiskách a ve vakuové komoře za účelem snížení tření. Tyto setrvačníky jsou schopny se otáčet až desettisíckrát za minutu a rekord drží supersetrvačník, který se s hmotností 0,6 kg otáčí v prstenci indukčních cívek jedenmilionkrát za minutu.[2]

Setrvačnickové akumulátory se využívají jako záložní zdroje energie pro překonání krátkodobého výpadku sítě. Jako příklad můžeme uvést Setrvačnickový akumulátor DYBAT, který se svou hmotností 70 kg je schopen dodávat výkon 70 kW po dobu 30 s. Vysokootáčkové setrvačníky jsou dílem špičkové techniky a jsou použity jen ve velmi speciálních aplikacích jako například setrvačník pro polohovou stabilizaci ve vesmírném projektu NASA.

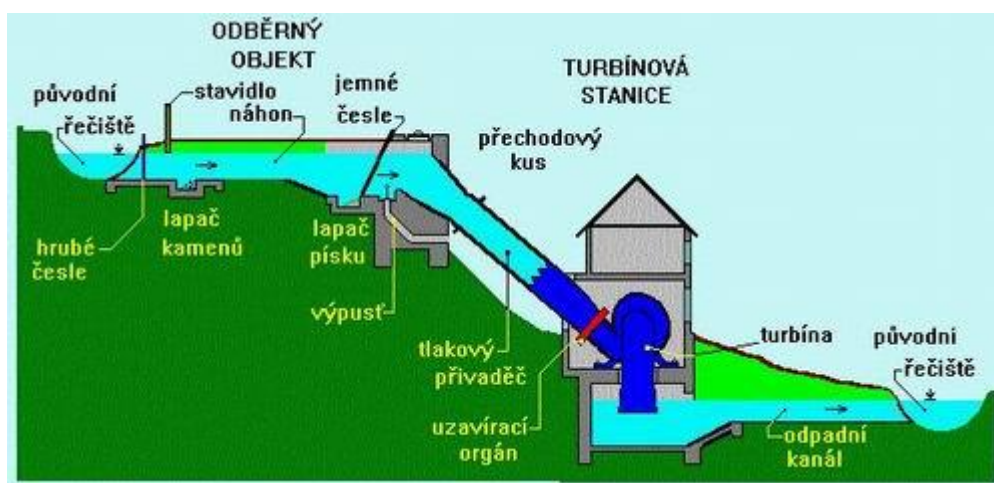
Výhodou setrvačnickových akumulátorů je jejich vysoká účinnost přesahující 80 %. Při kombinaci magnetických a mechanických ložisek je možné dosáhnout životnosti až 10 let při nepřetržitém otáčení. Je i možnost je zapojit paralelně do baterii, schopných vydat krátkodobý výkon až několika MW. Nevýhodou je jejich vysoká cena a rozměry při statickém použití. Při použití v elektromobilech neschopnost změnit rovinu rotace. [5]

2.4.2 Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny fungují na principu využití gravitace a potenciální energie. Přečerpávací elektrárna má dvě nádrže při čemž jedna z nich musí být výše než druhá. Obě nádrže jsou spojeny tlakovým přívaděčem, kterým proudí voda. Při akumulaci energie elektrárna zapne čerpadla a začne přečerpávat vodu z dolní nádrže do horní. Při tomto procesu je transformována elektrická energie do potenciální energie vody. Takto získanou energii můžeme vyjádřit vztahem:

$$E_p = m \cdot g \cdot \Delta h \text{ [J]} \quad (2.9)$$

Ze vztahu nám vyplývá, že množství takto naakumulované energie je přímo závislé na celkové hmotnosti přečerpané kapaliny m a rozdílu výšek Δh , který při tom překonáme.



Obrázek 7 Schéma přečerpávací vodní elektrárny [10]

Analýza rizik akumulace energie

Při opačném procesu kdy je potřeba vyrábět elektřinu se z horní nádrže žene voda tlakovým převaděčem do lopatky turbíny spojené s generátorem nebo alternátorem. Při současném stupni techniky jsem schopni akumulovat energii s účinností zhruba 75 %. Z toho vyplývá, že na akumulaci 1 kWh je potřeba 1,3 kWh.

Přečerpávací elektrárny čerpají vodu do horní nádrže hlavně v noci na tzv. noční proud kdy je cena každé kiliwatthodiny nízká a přes den je proměněno zpět na elektřinu s vysokým ziskem.

Přečerpávací elektrárny jsou schopné najet na plný provoz během několika desítek sekund popřípadě jednotek minut.

Přečerpávací elektrárny mohou být dvojího typu a to buď s umělou akumulací, nebo se smíšenou. Přečerpávací elektrárna s umělou akumulací má uměle postavenou horní nádrž, do které je přečerpávána voda z přirozeného vodního toku, který tvoří spodní nádrž. Přečerpávací elektrárna se smíšenou akumulací je postavena na korytě řečiště a je tvořena hrází, jak je znázorněno na obrázku. Tento druhý způsob je určitě výhodnější, ale je velmi málo míst vhodných pro jeho aplikaci.

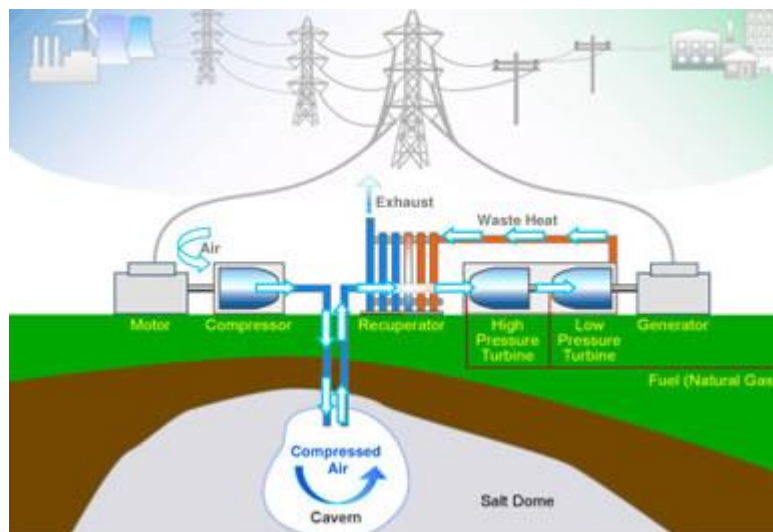
Přečerpávací elektrárny dosahují účinnosti 75 %. Jejich největší výhodou je určitě schopnost okamžitě reagovat na energetické špičky v síti a vyrovnávat tak pokles či nárůst energie v síti.

Jejich velkou nevýhodou jsou náročné požadavky na umístění. Za prvé je potřeba najít vodní tok s dostatečným průtokem a to ve výškovém členitém terénu pro získání maximální spádu. Dalším kritériem může být například dostupnost z důvodů co nejkratšího napojení do energetické sítě nebo dostupnosti pro stavební techniku. Nevýhodou je i vysoká cena dlouhá doba stavby a uvedení do provozu. [2, 5]

2.4.3 CAES systém

CAES (compressed air energy storage) je systém funkce tlakovzdušných akumulačních elektráren. Jedná se o elektrárny podobné přečerpávacím, které využívají energii stlačeného vzduchu. Opět v době kdy je přebytek energie je přebytečná energie využita k pohánění kompresoru, který stlačuje vzduch do kaveren. Kaverna je velká podzemní prostora určena u tlakovzdušných elektráren pro skladování stlačeného vzduchu. Tlak vzduchu, který pojme kaverna o objemu 150 000 m³ je zhruba 5 až 7,5 MPa. Při stlačování vzduchu dochází k jeho ohřevu, a proto je nutné jej chladit. Naopak při výrobě elektřiny kdy je stlačený vzduch hnán přes turbínu je potřeba jej znovu ohřát za pomoci zemního plynu. Dříve byl kompresor během provozu poháněn turbínou a tak se zhruba 60 % energie nevyužilo k výrobě elektřiny, ale ke stlačení vzduchu. Tento problém byl vyřešen oddělením provozu turbíny a kompresoru a to časově a mechanicky. Kompresor lze pohánět elektromotorem na noční proud. Tím bylo dosaženo využití plného výkonu tlakovzdušné turbíny.

Analýza rizik akumulace energie



Obrázek 8 Schéma CAES systému [14]

Kvůli malé účinnosti, která činí 50 %, vlivem tepelných ztrát je vyvíjena technologie AA-CAES (advanced adiabatic CAES). Hlavním účelem této technologie je využití tepla, které vzniká při stlačování vzduchu. Takto získané teplo je využito při opětovném zahřátí vzduchu vhaněného do tlakovzdušné turbíny. Tím by účinnost celého procesu měla stoupnout na 70 % a mělo by dojít ke snížení spotřeby zemního plynu potřebného pro ohřev stlačeného plynu.

V současné době jsou postaveny dvě zařízení toho typu. Prvním je v německém Huntorf, která je v provozu od roku 1978. Kompresory jsou poháněny mimošpičkovým proudem a vhaní vzduch do kaveren v hloubce 650 až 800 metrů a kapacitě 310 000 m³, kterou lze vyplnit na provozní tlak přibližně za osm hodin. Při plném výkonu je elektrárna schopná dodávat do sítě výkon 290 MW.

Druhá je ve státě Alabama ve Spojených státech v provozu od roku 1991. Elektrárna je v provozu s čistě plynovými bloky o kapacitě 538 000 m³ s výkonem 150 MW. Dle amerických energetiků je možné tento výkon navýšit až na 360 MW.[12]

Výhodou tlakovzdušných elektráren jsou poměrně nenáročné vstupní suroviny na výrobu elektřiny a jejich velká kapacita skladované energie.

Nevýhodou je poměrná náročnost na jejich umístění. Pro kaverny se využívají například vytěžené prostory nebo jeskyně. Takto přirozeně vzniklá místa jsou téměř vyčerpána a jejich umělé vytvoření je velmi nákladné. Hlavní nevýhodou je jejich současná nízká akumulace okolo 50 % a nedokonalé zvládnutá technologie. [11, 20, 26]

2.5 Magnetické akumulátory

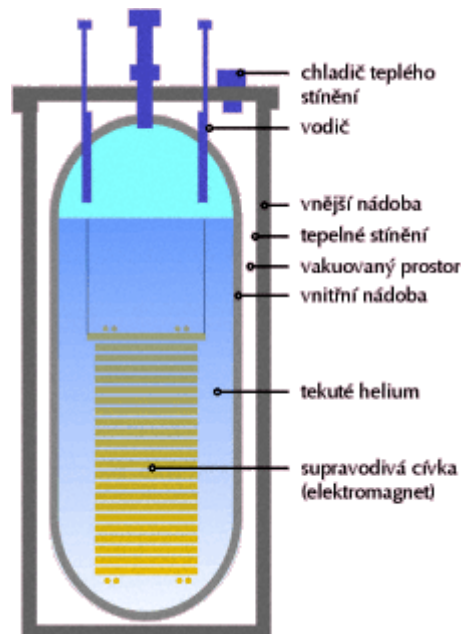
2.5.1 Supravodivé indukční akumulátory

Princip funkce indukčních akumulátorů je založen na supravodivosti. Supravodivost je vlastnost vodiče přenášet elektrický proud bez ztrát v podobě tepla. Toho je dosaženo pomocí ochlazení vodiče na tak nízkou teplotu, že z něj téměř zcela vymizí elektrický odpor, který způsobuje přeměnu elektrické energie v tepelné ztráty.

Indukční akumulátory jsou tvořeny cívkou. Cívka je elektronická součástka tvořená vodičem navinutým na nosnou kostru. Cívky rozlišujeme na dva typy. Prvním z nich je solenoid

Analýza rizik akumulace energie

(velmi dlouhá cívka) a druhým toroid (cívka stočená do kruhu). Pro zvětšení magnetických vlastností cívky se do ní vkládá jádro z magneticky měkké oceli.



Obrázek 9 Schéma indukčního akumulátoru [2]

Princip akumulace energie do magnetického pole je založen na stejnosměrném elektrickém proudu, který protéká cívkou. Jakmile je cívka nabita ze sítě tak elektrický proud v ní cirkuluje stále dokola jen s minimální ztrátou 0,3 kWh za 24 hodin. Cívky pro tyto akumulátory se konstruují pro velké hodnoty proudu a jsou ze supravodivého materiálu [5]. energii akumulovanou do cívky o indukčnosti L protékané proudem I můžeme vyjádřit pomocí vztahu:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \text{ [J]} \quad (2.10)$$

$$L = \frac{\mu \cdot N^2}{l} \cdot S \text{ [H]} \quad (2.11)$$

Ze vztahu pro indukčnost plyne, že při dostatečně velkém množství závitů N bychom získali dostačující hodnotu vlastní indukčnosti cívky L . S počtem závitů nám ale roste délka cívky l a tento vztah je platný pouze pro Solenoid, kde délka cívky je mnohanásobně větší než její poloměr. Tudíž nemůžeme ani dostatečně zvýšit její průřez S . Opět se dostáváme k problému s velikostí daného akumulátoru.

Cívky v supravodivých indukčních akumulátorech i přes použití supravodivých vodičů vytvářejí stále velké množství tepla a proto musejí být náležitě chlazeny. Chlazení je i podmínka pro zachování supravodivosti. K tomu se obvykle používá kapalné helium.

V současné době odborníci uvádějí supravodivé cívky se schopností akumulovat 1 800 – 4 000 MJ energie. Ty mají mít podobu prstence, v němž je smyčka z tlustého měděného vodiče ponořena v kapalném heliu. Ztráty se započtením příkonu kryogenní stanice udržující helium na teplotě pod minus 269 °C nemají být menší než 1 %.[2]

Analýza rizik akumulace energie

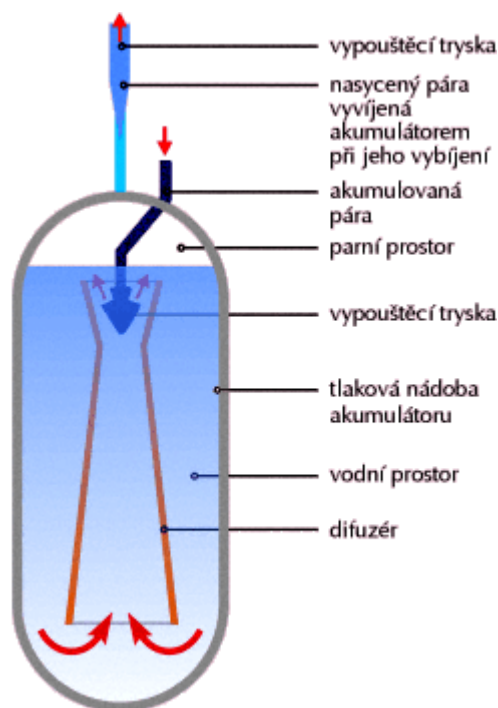
Výhodou supravodivých indukčních akumulátorů je především jejich vysoká účinnost a schopnost reagovat na vyrovnání napětí během 0,2 mikrosekund. Potřebná doba k jejich nabití i vybití je extrémně krátká a pracuje s účinností větší než 95 %, které dosahují elektrické akumulátory. Naopak jejich nevýhodou je vysoká cena chladicího média. [5]

2.6 Tepelné akumulátory

2.6.1 Horkovodní a parní akumulátory

Přestože většinu energie kterou spotřebujeme spotřebujeme ve formě tepla, tak ani dosud nemáme dlouhodobý účinný akumulátor pro tento druh energie. Používáme pouze krátkodobé zásobníky tepla v domácnostech jako například bojlerů nebo akumulací kamna.

Energetika se začala zabývat horkovodními a parními akumulátory zhruba ve 30. letech minulého století v souvislosti s rozvojem parních elektráren. Dosud nejúspěšnějším zařízením je Ruthsův parovodní akumulátor. Do něj se přivede nadbytečná pára z kotelní a ta předává svou tepelnou energii chladnější vodě kondenzací při čemž návratnost je zhruba 2 250 kJ na každý kilogram, které musela kotelná dodat k jejímu odpaření. Při přivádění další páry do parovodního Ruthsova akumulátoru v něm roste tlak a teplota. V případě potřeby odběru energie se otevře ventil v horní části akumulátoru. I při nepatrném poklesu tlaku v parním prostoru nad hladinou horké vody dojde k jejímu prudkému varu a odpařování. Pára může být následně využita pro pohon turbíny.



Obrázek 10 Ruthsův akumulátor páry [1]

Stovky takových parovodních akumulátorů sloužily v předválečných tepelných elektrárnách a kotelnách. Přes noc se nabíjely přebytečnou parou a v době špičkového odběru

Analýza rizik akumulace energie

byl touto parou výkon kotlů, nebo byla vedena do turbín, případně v zimním období byla využívána teplotně.

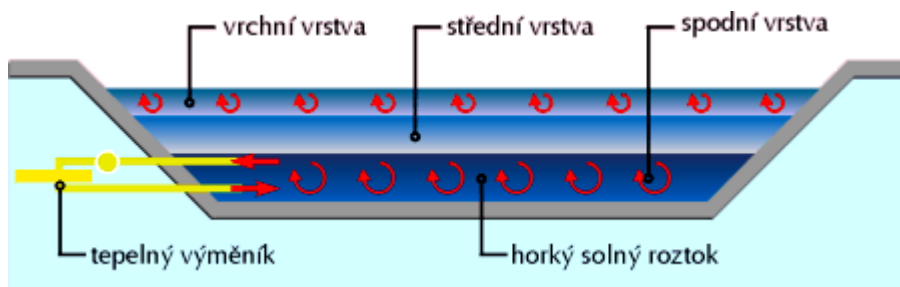
Akumulátor vysoký jako několikapatrový dům mohl akumulovat až 600 tun páry. To by v dnešních tepelných velkoelektrárnách vystačilo sotva na hodinový provoz 200 megawattového turbosoustrojí.

Pro akumulaci tepla získaného ve slunečních kolektorech jsou vyvíjeny nejrůznější typy latentních zásobníků tepla. Ty jsou založeny na vypařování, kondenzaci, tání nebo tuhnutí nejrůznějších látek, jejichž teplota se v průběhu akumulace nemusí příliš měnit. Například glycerol, parafin nebo Glauberova sůl. Do budoucna vědci plánují využití zeolitů - křemičitanů s velkou vnitřní plochou struktury, která je schopná pojmout značné objemy vody a absorbovat až 800 J na každý cm^3 .

V současnosti jsou do provozu uvedeny spíše jednodušší metody akumulace nízkopotenciálního tepla a to ve vodních nádržích nebo ve šterkovém loži. Rozsáhlý pokus o celoroční vytápění sídliště s 55 rodinnými domky prakticky jen solární energií se uskutečňuje ve Švédsku. Teplo soustředěné z parabolických kolektorů s plochou 2 600 m² je akumulováno do horkovodního zásobníku o objemu 14 tisíc m³. V mrazivých dnech však musí vypomáhat pomocná kotelná na topný olej. Švýcarský projekt počítá s akumulátorem vyplněným šterkem, který se ohřívá cirkulujícím médiem na 30 až 100 °C. Ukázalo se, že každý m³ vody je schopen akumulovat 40 kWh, kdežto m³ šterku sotva polovinu této energie.[1]

Nejjednodušší tepelné akumulátory, které se využívají, jsou tzv. sluneční bazény. Mají na černo natřené dno a stěny z důvodu vyššího pohlcování tepelného záření a v jejich vodní náplni se rozpouští sůl tak, aby koncentrace u dna dosáhla 28 %. Sluneční paprsky postupně prostoupí horními vrstvami, které jsou méně slané, a asi 30 % pohlcené energie se akumuluje v nejspodnější vrstvě, odkud je cirkulací přes výměník tepla v případě potřeby odebíráno. Pokud je hladina bazénu kryta průsvitnou fólií, můžeme v bazénu dosáhnout teploty od 50 °C v zimě do 95 °C v létě.

Největší sluneční bazén zřízený k vyhřívání městského plaveckého bazénu byl zřízen v Miamisburgu ve Spojených státech. Zaujímá plochu půl hektaru a v 12 milionech litrů vody má rozpuštěny dva tisíce tun soli. Do hloubky tří metrů se podle koncentrace voda rozděluje na tři vrstvy s různou samovolnou cirkulací.[1]



Obrázek 11 Rozložení slaných vrstev vody ve slunečním rybníku [1]

2.6.2 LAES systém

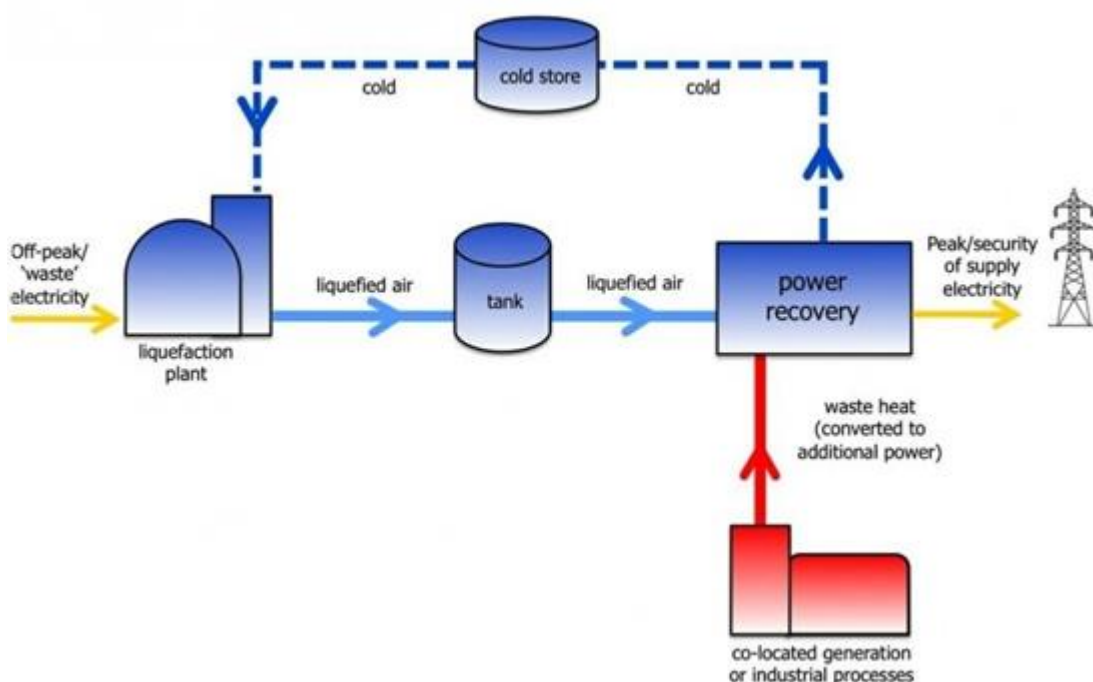
LAES (liquid air energy storage) je systém, který akumuluje energii ve formě tepla. Toho je dosaženo na principu využití elektřiny k ochlazení vzduchu, dokud nezkapalní. Funkci můžeme rozdělit do tří fází.

Analýza rizik akumulace energie

V první fázi je použit zkapalňovač, který nasaje vzduch z okolí, vyčistí ho a poté ho ochlazuje, dokud nezkapalní. Ze 700 litrů vzduchu, který se nachází v okolí, je zkapalněn 1 litr tekutého vzduchu.

V druhé fázi je zkapalněný vzduch skladován v tepelně izolované nádrži při nízkém tlaku. Tato zařízení jsou celosvětově využívána pro skladování tekutého dusíku, kyslíku a LNG (liquid natural gas). Tyto nádrže použité v průmyslu mohou potencionálně skladovat energii řádově v GWh.

Ve třetí fázi dochází k přeměně zkapalněného plynu zpět na elektřinu. Zkapalněný vzduch je nasát z nádrží a čerpán pod vysokým tlakem. Vzduch je odpařen a přehřát na teplotu okolí. Tím získáme vysokotlaký plyn, který je použit k roztočení turbíny.



Obrázek 12 Schéma LAES systému [15]

Díky nízkému bodu varu zkapalněného vzduchu můžeme zvednout účinnost reverzním postupem. To znamená, že během první fáze systém použije odebírané teplo zkapalňovanému vzduchu a použije jej na ohřátí zkapalněného vzduchu ve třetí fázi. Stejně tak lze využít studeného vzduchu ve fázi 3 a využít ho při zkapalňování během první fáze. Celý proces je také schopen do sebe začlenit tepelné ztráty vzniklé při různých průmyslových procesech.[13]

Největší výhodou LAES systému je schopnost přeměnit tepelné ztráty na energii, která může být později využita. Výhodou je podobně jako u systému CAES vstupní materiál. Zkapalněný vzduch můžeme v nádržích udržet pod nízkým tlakem bez poměrně náročné údržby po velmi dlouhou dobu. Výhodou je i množství akumulované energie. Jako nevýhodu bych uvedl, že výkon, který jsou schopny poskytnout je v porovnání s ostatními pouhých 350 kW. Využití najdou tedy především jako malé zásobníky energie ve větších továrnách. [27, 40]

3. POROVNÁNÍ SYSTÉMŮ AKUMULACE ENERGIE

Cílem porovnávání jednotlivých systémů je získání toho nejlepšího pro danou aplikaci. Abychom toho dosáhli, musíme zvolit vhodné kritérium, vůči kterému budeme jednotlivé systémy vztahovat. Systémy lze vůči sobě porovnávat například z hlediska objemu akumulované energie, výkonu, účinnosti nebo poměru ceny k výkonu. Dalšími významnými faktory jsou bezpochyby jejich vliv na okolní prostředí, dosavadní zvládnutelnost jejich technologie výroby a provozu nebo také možnosti inovací do budoucna. Při zjišťování se jednotlivé údaje lišili zdroj od zdroje, nebo výrobce od výrobce a tak uvedené hodnoty jsou pouze orientační a měli by být brány s odstupem a nadhledem.

3.1 Výkon a kapacita

Pokud bychom chtěli jednotlivé systémy porovnávat vzhledem k množství akumulované energie, nastává problém, že nejsme schopni přímo porovnat jednotky, ve kterých jsou vyjádřeny. Kapacita energie pro elektrické, elektrochemické a chemické akumulátory je udávána v ampérhodinách, zatím co pro mechanické, magnetické a tepelné akumulátory ve watthodinách. Ampérhodina vyjadřuje, jaký proud po jakou dobu lze z akumulátoru odebrat bez ohledu na napětí akumulátoru. Watthodina nám naopak říká jaký příkon (výkon) po jakou dobu lze z akumulátoru odebrat v závislosti na napětí. Proto není možné jednotky mezi sebou přímo převádět. Pokud ale budeme uvažovat konstantní napětí v průběhu celého vybíjení, můžeme výkon určit jako:

$$P = U \cdot I [Wh, Ah, V] \quad (3.1)$$

Jedná se však pouze o odhad, protože v praxi takového napětí nedosáhneme.

S výkonem nám souvisí i kapacita jednotlivých systémů. Udává jaké množství energie je daný systém schopný akumulovat a v případě potřeby dodávat do systému. U té nám však nastává obdobný problém s jednotkami jako u výkonu a také že je vždy vztažena na velikost daného zařízení. Zjištěné údaje jsou uvedeny v následující tabulce.

Systém	Výkon	Kapacita	Zdroj
Olověné akumulátory	30-40 Wh/kg	50 Ah	[2, 23]
Pokročilé elektrochemické akumulátory	100-730 Wh/kg	0,3 – 8 Ah	[2]
REDOX systém	25 kWh	-	[18]
Superkapacitory	1 MW	4000 MW	[2]
Palivové články	1500 – 2150 W	-	[33, 28]
Biopaliva	-	-	[-]
Setrvačníky	70 KW – několik MW	-	[2]
Přečerpávací vodní elektrárny	> 1000 MW	-	[2]
CAES systém	20 kWh	-	[45]
Supravodivé indukční akumulátory	1 MW	4000 MW	[2]
Horkovodní a parní akumulátory	40 kWh/m ³ vody	-	[2]
LAES systém	-	20 MWh – 1 GWh	[40]

Tab. 3.1. Porovnání výkonu a kapacity akumulačních systémů

U systémů u kterých není uvedena kapacita, většinou záleží na velikosti zařízení. Například u přečerpávací vodní elektrárny lze jen těžko odhadnout množství vody v nádrži. Stejně tak se kapacita CAES a LAES odvozuje od velikosti zásobníku a kavern.

Analýza rizik akumulace energie

V současné době v praxi z hlediska výkonu jednoznačně vedou přečerpávací vodní elektrárny. Ostatní systémy nejsou dosud natolik rozvinuty, aby byly schopny konkurence ve větším měřítku. Jako možný konkurent se jeví supravodivé indukční akumulátory.

3.2 Doba nabíjení a životnost

Dalším důležitým faktorem je jak dlouho se daný systém nabíjí, než je schopný být uveden do provozu. Následně na to navazuje jeho životnost. Ta nám udává jak dlouho je daný systém schopný plnit svoji funkci, než dojde k výraznému zhoršení jeho vlastností. V následující tabulce je vztažena na počet cyklů.

Systém	Doba nabíjení	Životnost	Zdroj
Olověné akumulátory	5h	1 000 cyklů	[46]
Pokročilé elektrochemické akumulátory	5h	1 500 - 2 000 cyklů	[46]
REDOX systém	-	10 000 cyklů	[47]
Superkapacitory	10s	500 000 cyklů	[6]
Palivové články	-	10 000 hodin	[48]
Biopaliva	-	-	[-]
Setrvačníky	60s	-	[25]
Přečerpávací vodní elektrárny	-	-	[-]
CAES systém	-	-	[-]
Supravodivé indukční akumulátory	řádově vteřiny	řádově miliony cyklů	[25]
Horkovodní a parní akumulátory	-	-	[-]
LAES systém	-	-	[-]

Tab. 3.2. Porovnání doby nabíjení a životnosti akumulačních systémů

Z hlediska doby nabíjení a životnosti jsou jednoznačně nejlepší supravodivé indukční akumulátory.

U většiny systémů je životnost vztažena na počet cyklů, které byly zvoleny jako nejvhodnější měřítko. U systémů, kde není hodnota uvedena, se jedná o větší zařízení, kde se životnost odvozuje spíše od trvanlivosti jednotlivých strojních částí, jako mohou být například turbíny.

3.3 Účinnost

Další možnost, jak vůči sobě jednotlivé systémy porovnat je účinnost. Ta je pevně dána a představuje, s jakou ztrátou energie jsou jednotlivé systémy schopny energii akumulovat. Na rozdíl od ostatní hodnot se získané hodnoty účinnosti z jednotlivých zdrojů příliš nelišily.

Systém	Účinnosti v procentech	Zdroj
Olověné akumulátory	80 %	[2]
Pokročilé elektrochemické akumulátory	85 %	[2]
REDOX systém	73 %	[39]
Superkapacitory	< 95%	[26]
Palivové články	35 - 50 %	[33]
Biopaliva	50 %	[-]
Setrvačníky	85 %	[25]
Přečerpávací vodní elektrárny	75 %	[2]
CAES systém	27-70 %	[20]
Supravodivé indukční akumulátory	< 95 %	[2]
Horkovodní a parní akumulátory	< 45 %	[-]
LAES systém	60 %	[40]

Tab. 3.3. Porovnání účinnosti akumulačních systémů

Nejvyšší účinnosti dosahují supravodivé indukční akumulátory a superkapacitory. Těsně za nimi jsou elektrochemické akumulátory a setrvačníky.

Účinnosti je rozhodně nejlepším srovnávacím kritériem. Ze získaných hodnot vyplývá, že nejvyšší účinnosti dosahují superkapacitory a supravodivé indukční akumulátory. Naopak nejnižších hodnot dosahují tepelná zařízení omezená Carnotovým cyklem. V praxi bohužel účinnost neodpovídá výkonu a objemu vyrobené energie.

4. APLIKACE SYSTÉMŮ AKUMULACE ENERGIE V OKOLÍ BRNA

Hlavním důvod, proč konstruujeme akumulátory je ten, že se nám střídají chvíle, kdy vyrábíme příliš elektřiny a nejsme schopni ji spotřebovat a chvíle, kdy ji naopak máme nedostatek a není ji odkud vzít. V ideálním případě bychom byli schopni vyrábět elektřinu pouze v případě potřeby, avšak soudobá technologie toho není schopná vzhledem k individuálním potřebám jedince. Každý potřebuje energii v jiný čas a v jiném množství a takovýto způsob je v současné době neekonomický.

Řešením je částečně centralizovaná rozvodná síť, jejíž jádro tvoří elektrárny. Ty dle statistického odhadu navyšují nebo naopak snižují svůj výkon v závislosti na spotřebě energie v síti. Nejsou ale schopny včasné reagovat na kolísání. Proto je snaha do sítě zapojit akumulátory, které by přebytečnou energii uschovaly na dobu, kdy ji bude potřeba.

Podle mého názoru u akumulátorů máme dvě možnosti jak je aplikovat podobně jako elektrárny. Buď jako centrální nádrže energie, nebo jako individuální zařízení v každé domácnosti či továrně.

4.1 Globální řešení

V případě globálního řešení bychom stavěli velké zařízení pravděpodobně v těsné blízkosti elektráren, nebo odběrových zařízení, kde by mohli okamžitě reagovat na kolísání energie v síti a dodávat energii.

Nevýhodou je jako vždy cena. Náklady na stavbu akumulátoru potřebných rozměrů by mohli několikanásobně převýšit náklady na stavbu nové elektrárny. Navíc v případě možné poruchy by došlo k výpadku na velmi rozsáhlém území.

4.2 Lokální řešení

V lokálním řešení by každé odběrové zařízení mělo vlastní akumulační zásobník energie podle vlastní potřeby. Energii by bylo možno brát ze sítě. V současné době spousta domů má vlastní solární panely a další drobné elektrárny budou následovat a tudíž se skýtá možnost akumulovat energii, kterou si lidé vyrobí sami doma. Tento model již využívá spousta továren, které mění odpadní teplo a tepelné ztráty zpět na elektrickou energii, kterou jsou schopny využít.

Hned na první pohled jsou však zřejmé nevýhoda. Drobné akumulační nádrže jsou drahé. Dosud není nikde zavedena velkosériová výroba, a tudíž je nákladná jak samotná výroba, tak potřebný materiál.

4.3 Aplikace jednotlivých systémů

4.3.1 Elektrochemické akumulátory

Akumulátory v současné době fungují jako pomocný zdroj energie. Můžeme je najít jako nedílnou součást pohonu golfových vozíků. Využity jsou i v elektrotechnice jako například v notebooku nebo mobilním telefonu. Jsou součástí nouzových osvětlení, nebo jako nouzový pojezd u šalin. Téměř v každém autě najdeme olověný akumulátor jako startér.

Analýza rizik akumulace energie

Elektrochemické akumulátory byly vyvinuty jako krátkodobý zdroj energie pro energeticky méně náročné stroje, nebo pomocné zařízení pro dodávku energie při výpadku proudu. O jejich rozvoj a navýšení významu se pokouší REDOX systém a v budoucnu by mohly sloužit jako velkokapacitní zásobník energie.

Nedávno firma Tesla Motors uvedla na americký trh stokilovou lithiovou baterii, která by měla usnadnit přechod na solární zdroje energie. Tato baterie by měla pokrýt čtvrtinu denní spotřeby průměrné americké domácnosti. Instalovaná kapacita je sedm kilowatthodin. Baterie by mělo být možné instalovat ve větším počtu a tím zvýšit jejich kapacitu. Prozatímni cena činí 73 tisíc korun. Stále se ale jedná pouze o zvětšený klasický elektrochemický akumulátor se stejnými nevýhodami jako je samovybíjení nebo krystalizace elektrolytu.

4.3.2 Palivové články

Palivové články do budoucna slibují velký pokrok a rozvoj. Díky jednoduchému principu využití vodíku získaného elektrolýzou vody mají velký energetický potenciál. Jedná se o efektivní zdroj paliva, který jen chybí patřičně využít. V současnosti jsou palivové články použity k pohonu hybridních automobilů. Využití našli i u ponorek a raketoplánů. V několika posledních letech se společnost Panasonic snaží vyvinout palivový článek pro domácí užití. V případě úspěchu by se jednotky mohly využít v každé domácnosti.

4.3.3 Superkapacity

Superkapacity jsou díky své hlavní součásti kondenzátoru především uplatněny jako stabilizující prvky v elektrotechnice. Jejich hlavní předností je rychlé dodání velkého množství energie v krátkém čase. Mohou být použity jako krátkodobé zdroje energie dokud nedojde k jejich vybití. K dlouhodobému skladování energie pro Brno a okolí nevhodné.

4.3.4 Biopaliva

Biopaliva jsou levný a všude přítomný zdroj energie, který většinou vzniká jako odpad. Bezpochyby je ekologicky přínosné takto vzniklý odpad zužitkovat a uplatněný mohou najít při vytápění menších obytných jednotek, ale do budoucna se ale určitě nejedná o řešení velkokapacitního skladování energií. Stejně tak biopaliva asi nikdy nenahradí uhlí ani jiný zdroj energie využívaný v tepelných elektrárnách.

4.3.5 Setrvačníky

Jejich výhodou je technologická nenáročnost na uchování energie. Z toho důvodu se setrvačníky především využívají jako stabilizátory. Jinak jako regulátory otáček strojů s nepravidelným chodem, nebo jako gyroskop, který vyrovnává polohu a směr. V historii byl setrvačník využíván na hrnčířském kruhu a dnes jej budeme většinou znát z dětských hraček. Do budoucna by rozhodně stálo za to se setrvačníkům více věnovat. Pokud se zamyslíme, tak zjistíme, že největší setrvačník na Zemi je Země sama a její rotace má vliv na všechny věci kolem nás. Její rotace okolo vlastní osy vyvolává dostředivé zrychlení, jehož důsledkem je zploštění na pólech a vydutí na rovníku. Při rotaci vzniká i Coriolisova síla, která má vliv na proudění vzduchu v atmosféře a vody v oceánech. Jeho jediným omezujícím prvkem je jeho

Analýza rizik akumulace energie

hmotnost a velikost. Ale i přes to se jeví jako schopný zdroj akumulace energie ať už čisté, nebo odpadové.

4.3.6 Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny jsou největšími dostupnými akumulátory energie. Mají skvělou dobu náběhu, výkon i kapacitu. Jejich snad jedinou nevýhodou kromě vstupní ceny je nedostatek vhodných míst pro stavbu. Na první pohled stavět přečerpávací vodní elektrárnu na rovině nemá příliš velký význam. Tuto myšlenku ale chce rozptýlit Japonsko, které plánuje stavět přečerpávací vodní elektrárny na pobřeží a uměle přečerpávat mořskou vodu. V okolí Brna pro obdobnou aplikaci nejsou klimatické podmínky.

4.3.7 CAES systém

Stlačováno vzduchu jako media pro akumulaci energie je rozhodně dobrým nápadem. Jako všechny tepelné systémy se i tento potýká s problémy nízké účinnosti a Carnotovým cyklem. Do budoucna se ale určitě jeví jako slibný energetický akumulační systém. Problém je pouze technologická zvládnutelnost, která by pro lidstvo neměla být problém v budoucnu překonat. Velkokapacitní nádrž poblíž Brna by určitě našla využití.

4.3.8 Supravodivé akumulátory

Supravodivé indukční akumulátory jsou bezesporu technologicky náročnou a rozhodně ne levnou cestou akumulace energie. Výhodou je přímá akumulace elektrické energie, jejich vysoká účinnost a kapacita, kterou by mohly v budoucnu nahradit přečerpávací vodní elektrárny. Pro dlouhodobé uložení energie jsou ale problémem ztráty při neustálé cirkulaci proudu v cívce. Zde se opět jedná o překonání technologických problémů.

4.3.9 Horkovodní a parní akumulátory

Přestože vodní pára dnes vyrábí velké množství elektrické energie, využití odpadního tepla a páry jako akumulačního systému má svá nejlepší léta za sebou. Jak ukázalo Švédsko, ve svém projektu celoročního vytápění sídliště solární energií za pomoci horkovodních zásobníků, tak tento způsob akumulace není dostatečný a musí být podporován pomocnými zdroji. V současné době nevhodné pro použití v okolí Brna.

4.3.10 LAES systém

Systém zkapalnění vzduchu je velmi podobný systému jeho stlačení a potýká se vesměs se stejnými problémy a výhodami.

5. ZÁVĚR

Cesta akumulace energie je určitě cestou, kterou bychom se měli vydat. Výrobu energie bych přirovnal k produkci potravin. Umíme je vypěstovat a také je následně uskladnit na zimu kdy není možné je pěstovat. Stejně tak jsme schopni vyrobit energii, ale už ne ji uchovat pro pozdější využití. Proto je důležité věnovat větší pozornost technologii akumulace energie abychom byli schopni ji efektivně uskladnit.

V této bakalářské práci jsou uvedeny všechny dostupné systémy akumulace energie. U každého systému je popsán a vysvětlen jeho princip a popsány výhody, nevýhody a využití. Nelze však porovnávat všechny systémy vůči jednomu srovnávacímu faktoru, neboť každý byl vyvinut v jiné době, s jinými prostředky a pro jiné účely. Je potřeba je srovnávat s jistým odstupem a nadhledem.

Každý uvedený systém plní svoji funkci, ke které by sestojen. Ale je snaha vytvořit univerzální velkokapacitní akumulátor, který by byl schopen vyrovnávat kolísání v energetické síti a zároveň byl schopný akumulovat obrovské množství energie. V takovém případě by bylo možné odstavit elektrárny škodlivé pro životní prostředí jako například tepelné a plně využít solárních, větrných nebo jaderných, které by přes noc zásobily akumulátory, ze kterých by se tato energie přes den odebírala. Pro ten to model se jako nejvhodnější jeví supravodivé indukční akumulátory především díky své vysoké účinnosti a energetickému potenciálu. Stejné využití by mohly najít i systémy CAES a LAES. Vhodné by mohli být i palivové články a setrvačníky ovšem v menším měřítku.

V budoucnu se spíše než velkokapacitní akumulční nádrže jeví jako uskutečnitelnější menší akumulční jednotky například u rodinných domů. Nejdřív je ale potřeba technologicky zvládnout proces akumulace na této úrovni a zavést velkosériovou výrobu pro větší cenovou dostupnost. V tomto směru myslím, že můžeme vidět analogii se solárními panely z poslední doby.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] AKUMULÁTORY TEPLA JEŠTĚ NEDOZRÁLY. *cez.cz*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/akumulat_1.html
- [2] CESTY K AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE. *cez.cz*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html
- [3] UČEBNICE. *elic.cz*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://eluc.cz/verejne/lekce/2282>
- [4] Olověné akumulátory. *canov.jergym.cz*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://canov.jergym.cz/elektro/clanky2/olov.pdf>
- [5] ELEKTRO. *ODBORNECASOPISY*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html
- [6] Superkapacity. *ECOM*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.ecom.cz/files/documents-news/108.pdf>
- [7] SEDLÁK, P. *Možnosti akumulace energie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, 2013. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Moskalík.*
- [8] Ultrakapacity: Potenciální nástupce baterií. *ŽIVĚ*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.zive.sk/clanok/30645/ultrakapacity-potencialny-nastupca-baterii>
- [9] 5 iluzí o obnovitelných zdrojích – nahradí uhlí a jádro?. *nazeleno.cz*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/nazelenoplus/komentare-1/5-iluzi-o-obnovitelných-zdrojích-nahradi-uhli-a-jadro.aspx>
- [10] Vodní elektrárny. *automatizace*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006121301>
- [11] TECHNET. *iDNES.cz*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/cez-zkouma-skladovani-elektřiny-pod-zemi-podivejte-se-jak-to-funguje-1jd-tec_tecnika.aspx?c=A091022_140139_tec_tecnika_rja
- [12] Advanced CAES Demonstration. *DC BUREAU*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.dcbureau.org/documents/SenecaPPMaindoc.pdf>
- [13] ENERGY STORAGE. *Energy Storage Association*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/pumped-hydroelectric-storage>

Analýza rizik akumulace energie

[14] Compressed Air Energy Storage: Renewable Energy. *phys.org*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://phys.org/news/2010-03-compressed-air-energy-storage-renewable.html>

[15] Wind or Solar Power Can Now Be Stored as Liquid Air. *CALFINDER*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://solar.calfinder.com/blog/solar-research/wind-or-solar-power-can-now-be-stored-as-liquid-air>

[16] WHY SOFC TECHNOLOGY. *ENERGY.GOV*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://energy.gov/fe/why-sofc-technology>

[17] Vanadium Redox Gaining Ground in Energy Storage. *IEEE SPECTRUM*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://spectrum.ieee.org/energywise/energy/renewables/vanadium-redox-gaining-ground-in-energy-storage>

[18] Microsoft's New Fuel Cell Partner is Ready to Blow Away the Bloom Box. *DailyTech*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.dailytech.com/Microsofts+New+Fuel+Cell+Partner+is+Ready+to+Blow+Away+the+Bloom+Box/article36118.htm>

[19] How a Solid Oxide Fuel Cell Works. *bloomenergy*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.bloomenergy.com/fuel-cell/solid-oxide-fuel-cell-animation/>

[20] ENERGY STORAGE. *Energy Storage Association*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://energystorage.org/compressed-air-energy-storage-caes>

[21] paměťový efekt. *Bateria*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.bateria.cz/stranky3/zabava-pouceni/pece-o-baterie/pametovy-efekt.htm>

[22] Abeceda baterií a kaumulátorů. *BATTEX*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/povery-a-myty-o-hermetickych-akumulatorech/pametovy-efekt-memory-effect>

[23] Olověné baterie. *Elektromobily*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://elektromobil.vseznamu.cz/baterie-v-elektromobilech/oloveny-akumulator>

[24] Kondenzátory. *ELEKTROTECHNIKA*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://et-pocitacovesystemy.wz.cz/elektronicke_soucastky/kondenzatory.html

[25] Hledá se kýbl na elektřinu. *VTM*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/clanek/hleda-se-kybl-na-elektrinu>

Analýza rizik akumulace energie

[26] Superkapacitory. *st Sdělovací technika*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.stech.cz/Portals/0/Konference/2013/03-20%20Elektronika,%20%20Mikroelektronika,%20%20Inovace/06%20BOUSEK_SUPERCA P.pdf

[27] ENERGY STORAGE. *Energy Storage Association*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/liquid-air-energy-storage-laes>

[28] Palivové články. *cez.cz*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>

[29] Solid Oxide Fuel Cells. *ILLINOIS INSTITUTE OF TECHNOLOGIES*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://mypages.iit.edu/~smart/garrear/fuelcells.htm>

[30] STANFORD ENGINEERS DEVELOP FUEL CELL . *Stanford ENGINEERING*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://engineering.stanford.edu/research-profile/stanford-engineers-develop-fuel-cell-can-deliver-record-power-square-inch-record-lo>

[31] Velká elektrická revoluce. *EURO*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://euro.e15.cz/archiv/velka-elektricka-revoluce-muze-muska-postavit-na-roven-edisonovi-1171891>

[32] Superkapacitory: budoucnost napájení elektromobilů?. *elektrickevozy*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://elektrickevozy.cz/clanky/superkapacitory-budoucnost-napajeni-elektromobilu/>

[33] Že by konečně „rodinný“ vysoce účinný palivový článek?. *OSEL*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/6283-e-by-konecne-rodinny-vysoce-ucinny-palivovy-clanek.html>

[34] Superkapacitory. *ECOM*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.ecom.cz/files/documents-catalogue/47.pdf>

[35] Hydrogen Fuel Cell. *acallenergy*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.acalenergy.co.uk/news/release/acal-energy-system-breaks-the-10000-hour-endurance-barrier/en>

[36] Fuel Cell Vehicles: Hype or Hope?. *greentechmedia*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.greentechmedia.com/articles/read/fuel-cell-vehicles-hype-or-hope>

Analýza rizik akumulace energie

[37] Wasserstoffspeicherung im geologischen Untergrund. *KBB UNDERGROUND TECHNOLOGIES*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.kbbnet.de/wp-content/uploads/2011/05/201111_K%C3%B6ln_Cro-Wasserstoffspeicherung-im-geol-Untergrund.pdf

[38] Present Trends in Compressed Air Energy and Hydrogen Storage in Germany. *KBB UNDERGROUND TECHNOLOGIES*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.kbbnet.de/wp-content/uploads/2011/09/Present-trends-in-compressed-air-energy-and-hydrogen-storage-in-Germany1.pdf>

[39] Efficient Vanadium Redox Flow Cell. *ECS*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://jes.ecsdl.org/content/134/12/2950>

[40] Liquid Air Energy Storage. *ALL-ENERGY*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.all-energy.co.uk/_novadocuments/54268?v=635376493882370000

[41] Wind Coupled To Compressed Air Energy Storage For Baseload Power Generation. *PRINCETON UNIVERSITY*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.princeton.edu/pei/energy/presentations/Succar_Eurosolar_Poster.pdf

[42] Setrvačník KERS v automobilech Volvo. *HYBRID*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/setrvacnik-kers-v-automobilech-volvo>

[43] Na trh přichází energetická nezávislost. *solarninovinky*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.solarninovinky.cz/?zpravy/svet/2011031405/na-trh-prichazi-energeticka-nezavislost-fotovoltaiku-ceka-obrovsky-boom#.VVwvW_ntlBc

[44] TECHNET. *iDNES.cz*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/tesla-baterie-revoluce-071-tec_technika.aspx?c=A150504_144747_tec_technika_mla

[45] Compressed Air Energy Storage System. *MDPI*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: www.mdpi.com/2079-9292/3/1/1/pdf

[46] Skoro vše o akumulátorech a nabíjení. *MOTOBANDA LANŠKROUNSKÁ*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni_clanky/akumulatory.pdf

[47] DICP vanadium redox flow battery. *Greenn Car Congress*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.greencarcongress.com/2011/06/dicp-20110609.html>

[48] Palivové články. *proelektroniky*. [online]. 20.5.2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/obnovitelne-zdroje/16.php>

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[49] CENEK, Miroslav. *Akumulátory od principu k praxi*. Praha: FCC Public, 2003, 248 s. ISBN 80-86534-03-0.

[50] CENEK, Miroslav. *Akumulátory a baterie*. Vyd. 1. Praha: STRO.M, 1996, 149 s.

[51] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. 1. vyd. Praha: Grada, 2010, 296 s. ISBN 978-80-247-3250-3.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Jednotka	Význam
C	[F]	kapacita
d	[m]	vzdálenost
E_k	[J]	kinetická energie
E_p	[J]	potencionální energie
ε_r	[F·m ⁻¹]	permitivita prostředí
ε_0	[F·m ⁻¹]	permitivita vakua
Δh	[m]	rozdíl výšek
I	[A]	proud
J	[kg·m ²]	moment setrvačnosti
l	[m]	délka
L	[H]	indukčnost
m	[kg]	hmotnost
N	[-]	počet závitů
P	[W]	výkon
r	[m]	poloměr
S	[m ²]	obsah
U	[V]	napětí
μ	[H·m ⁻¹]	permeabilita prostředí
W	[J]	práce
ω	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Graf spotřeby elektrické energie [9].....	10
Obrázek 2 Princip funkce olověného akumulátoru [3].....	11
Obrázek 3 Princip funkce REDOX systému [17].....	12
Obrázek 4 Pochody uvnitř systému REDOX [18].....	13
Obrázek 5 Rozdíl kondenzátoru superkapacitoru [8].....	14
Obrázek 6 Princip setrvačníku [2].....	17
Obrázek 7 Schéma přečerpávací vodní elektrárny [10].....	18
Obrázek 8 Schéma CAES systému [14].....	20
Obrázek 9 Schéma indukčního akumulátoru [2].....	21
Obrázek 10 Ruthsův akumulátor páry [2]	22
Obrázek 11 Rozložení laných vrstev vody ve slunečním rybníku [2].....	23
Obrázek 12 Schéma LAES systému [15].....	24

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1. Porovnání výkonu a kapacity akumulčních systémů.....	26
Tab. 3.2. Porovnání doby nabíjení a životnosti akumulčních systémů.....	27
Tab. 3.3. Porovnání účinnosti akumulčních systémů.....	28