

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Možnosti akumulace elektrické energie

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef KOZÁK**
Osobní číslo: **E15B0146P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Možnosti akumulace elektrické energie**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování:

1. Popište a uveďte příklady, proč se uplatňuje a využívá akumulace elektrické energie.
2. Vypracujte přehled stávajících systémů v ČR a ve světě.
3. Proveďte jejich srovnání z hlediska dosažitelné kapacity, dosažitelného výkonu, účinnosti, doby akumulace apod.
4. Představte nové technologie v oblasti akumulace energie.

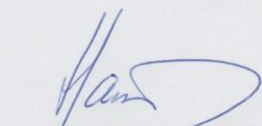
Kopie zadání – strana 1

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

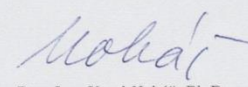
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaroslav Holý
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2017


Doc. Ing. Jiří Hampejba, Ph.D.
děkan
V Plzni dne 14. října 2016




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

Kopie zadání – strana 2

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis současných možností v oblasti akumulace elektrické energie hlavně v měřítku pokrývání proměnlivé spotřeby během dne.

Klíčová slova

Akumulace elektrické energie, výroba elektrické energie, záložní systémy napájení

Abstract

The master theses presents the difrent principles how store electrical energy with high priority for daily using.

Key words

storage of electric energy, production of electric energy, UPS

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Josef Kozák

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své práce ing. Jaroslavu Holému, za vedení správným směrem pro úspěšné dokončení práce.

Obsah

Obsah	8
1. Úvod	10
2. Proč akumulovat elektrickou energii.....	11
2.1. Odběr.....	11
2.2. Výroba elektrické energie	12
2.2.1 Konstantní výroba	12
2.2.2. Kolísání výroby	13
2.3. Akumulace.....	14
3. Přehled systémů pro akumulaci elektrické energie	15
3.1. Přečerpávací vodní elektrárna	15
3.1.1 Popis	15
3.1.2. Princip.....	16
3.1.3. Souhrnné zhodnocení	17
3.2. Adiabatická tlakovzdušná akumulární elektrárna.....	17
3.2.1. Popis	17
3.2.2. Princip.....	19
3.2.3. Souhrnné hodnocení	19
3.3. Setrvačnickové akumulátory.....	20
3.3.1 Popis	20
3.3.2. Princip.....	21
3.3.3. Souhrnné hodnocení	23
3.4. Chemické články.....	24
3.4.1. Popis	24
3.4.2. Princip.....	24
3.4.3. Souhrnné hodnocení	27
3.5. Superkapacitory	27
3.5.1. Popis	27
3.5.2. Princip.....	28
3.5.3. Souhrnné hodnocení	29
3.6. Akumulace do vodíku	30
3.6.1. Popis	30

3.6.2. Princip.....	30
3.6.3. Souhrnné hodnocení.....	31
4. Porovnání systémů akumulace elektrické energie.....	32
4.1. Porovnávání z hlediska dosažitelného výkonu.....	32
4.2. Porovnání z hlediska množství akumulované energie.....	33
4.3. Porovnání z hlediska účinnosti.....	34
4.4. Porovnání z hlediska ceny na vybudování.....	35
4.5. Porovnání z hlediska životnosti.....	36
4.6. Porovnání z hlediska doby akumulace.....	36
5. Nově vyvíjené technologie.....	38
5.1. Využití supravodivé cívky.....	38
5.1.1. Popis.....	38
5.1.2. Princip.....	38
5.1.3. Souhrnné hodnocení.....	39
5.2. Uložení energie do vlaku.....	40
5.2.1. Popis.....	40
5.2.2. Princip.....	40
5.2.3. Souhrnné hodnocení.....	41
5.3. Vyvíjené inovace známých principů.....	42
5.3.1. akumulace do stlačeného vzduchu.....	42
5.3.2. Akumulace přečerpáváním vody.....	42
6. Závěr.....	43
7. Seznamy zdrojů.....	44

1. Úvod

Ve své bakalářské práci se chci věnovat tématu akumulování elektrické energie jak v rovině vykrývání nerovnoměrností spotřeby a výroby během dne, tak i z pohledu využívání akumulované energie pro lokální využití. Nerovnoměrnosti výroby způsobují výraznou mírou solární a větrné elektrárny, jež jsou závislé na aktuálním počasí. Nerovnoměrnosti spotřeby jsou ovlivněny denní dobou a ročním obdobím.

Toto téma jsem si vybral, protože energetické trendy a politické směry současné doby jsou dle mého názoru hrozbou pro dlouhodobý vývoj, zejména snaha stavět čím dál větší část výroby elektrické energie na nestálých zdrojích využívajících větru a slunce. V hustě osídlené Evropě je lepší využívat volné plochy k zemědělství a lesnímu hospodářství. Větrné elektrárny se postupně rozrůstají i na mořích, ovšem regulace jejich výkonu tak, aby byla udržena stabilita rozvodné sítě, je zatím bohužel nedostačující, a její vývoj je teprve v počátcích. Mořské větrné parky se ve velkém rozrůstají především v okolí britských ostrovů a Dánska. Solární panely by pak bylo lepší umístit na jinak nevyužitelné plochy, jako jsou kontaminované pozemky či pouště.

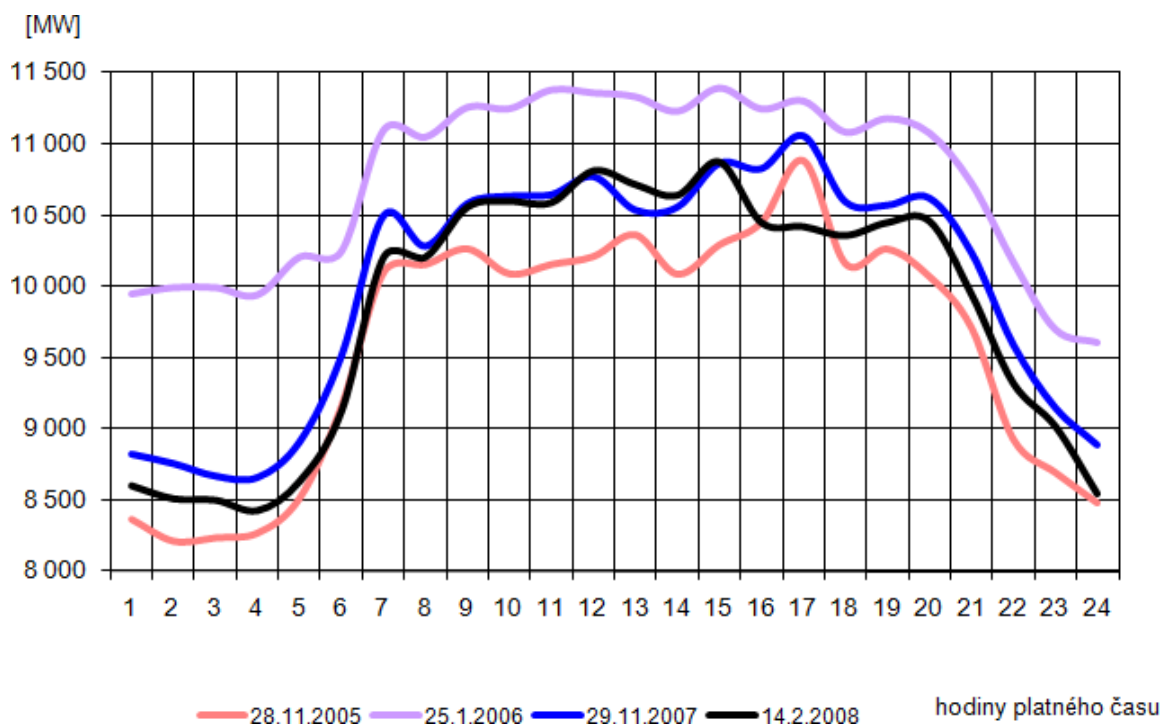
Nejprve se budu věnovat důvodům proč akumulovat elektrickou energii a popíšu problematiku vyrovnávání výroby a spotřeby. Dále vypracuji přehled systémů akumulace energie, se kterými se lze setkat v oblasti energetiky, a následně provedu jejich srovnání z hlediska použitelnosti a výkonnosti. Poslední kapitola práce bude věnovaná nově vyvíjeným způsobům akumulace elektrické energie a inovacím principů stávajících.

2. Proč akumulovat elektrickou energii

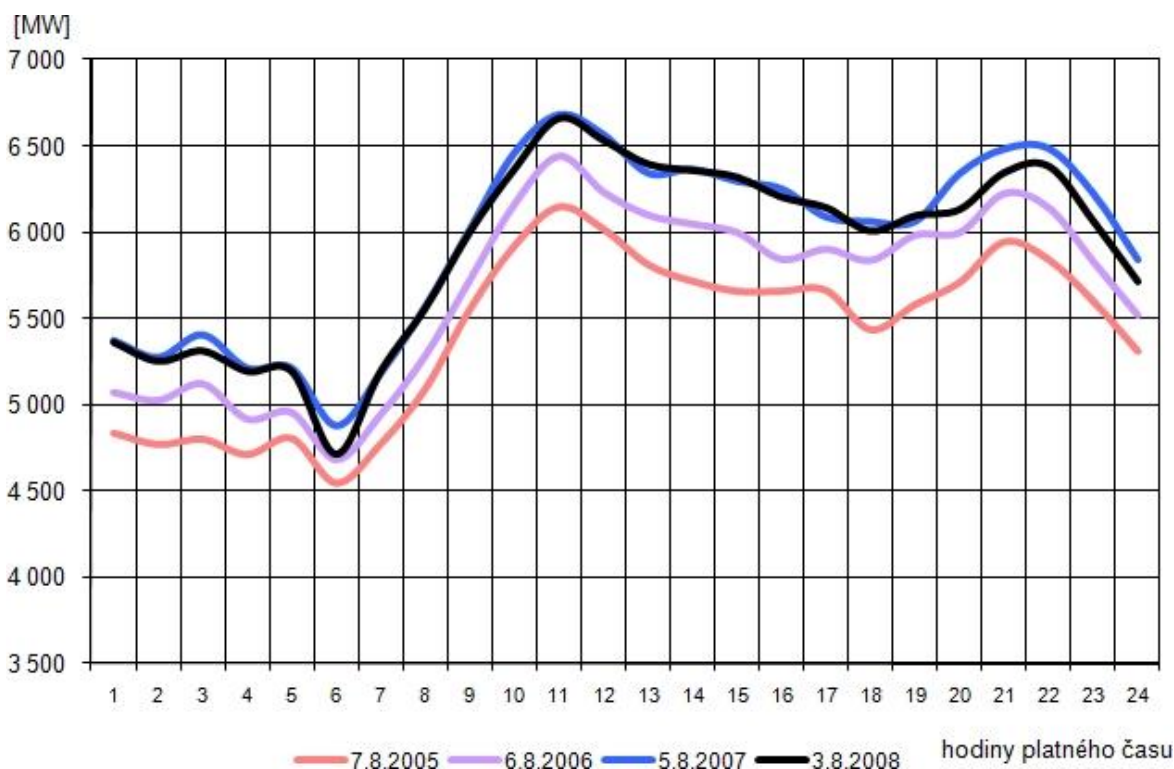
První důvod, který napadne snad každého, je vyhnout se nutnosti neustálého připojení k rozvodné síti. Nejjednodušší příklad je mobilní telefon, který pracuje z energie uchované v Li-Ion či Li-pol akumulátoru. Z hlediska elektroenergetiky je však potřeba uchování mnohem větších energií než, aby na to bylo vhodné využívat princip akumulátoru mobilního telefonu.

2.1. Odběr

Odběr elektrické energie z rozvodné sítě, například v rámci státu, se mění doslova z minut na minutu, je závislý na denní době, dni v týdnu a ročním období. Nejproblémovější však je pružně reagovat právě na změny v krátkém časovém úseku během jednoho dne. Při pohledu na diagram denní spotřeby by se dala oblast grafu rozdělit horizontálně na dvě části. Spodní část stálého zatížení, která je neměnná během dne, se nazývá základní zatížení. Toto zatížení se mění velice pozvolna v závislosti na ročním období, kdy v zimě stoupá z důvodu vytápění budov. Vrchní část, která je shora omezená křivkou diagramu vyjadřuje proměnlivost odběru během dne a jak je vidět z obrázku, mění ve velmi rychle a na to je potřeba pružně reagovat. [19]



Obr. 1: diagram denní spotřeby ČR v zimních měsících [19]



Obr. 2: diagram denní spotřeby v letních měsících [19]

2.2. Výroba elektrické energie

2.2.1 Konstantní výroba

Velké výkonné zdroje energie, které v současnosti pokrývají takzvané základní zatížení, nejsou schopny reagovat na náhlé změny odběru z rozvodné sítě. Jedná se především o uhelné, jaderné a velké vodní elektrárny. Velké vodní elektrárny jsou doménou států s vysokými pohořími jako například Rakousko či severské státy, nebo států s velkými vodními toky jako USA a Čína. Jejich schopnost reakce na rychlou změnu odběru je pouze v točivé rezervě kinetické energie rotorů jejich generátorů, která dokáže stabilně ustát změnu výkonu/odběru jen v krátkém časovém úseku desítek sekund, a proto se využívají na základní zatížení, kde je jejich výkon neměnný.



Obr. 3: JE Temelín [21]

Proměnou část denní spotřeby, která je znázorněná křivkou diagramu denní spotřeby, je třeba vykrývat zdroji, které dokáží svůj výkon regulovat rychle a ve velkém rozsahu. K tomu se využívají například akumulární vodní nádrže, přehrady, které mají relativně vysoký výkon generátorů, ale mohou fungovat jen část dne. Dále se využívají přečerpávací vodní elektrárny, malé vodní elektrárny a paroplynové elektrárny. [19]

2.2.2. Kolísání výroby

Ačkoli velké elektrárny mají často stabilní dodávky elektrické energie do rozvodné soustavy, nejsou využívány jen ty. Především z důvodů ekologie, ceny výroby, či nevhodnosti velké elektrárny v oblasti se využívá jiných zdrojů. Podle lokalit lze využít výroby elektřiny pomocí vody, slunce, větru, příliv a odlivu, a dalších zdrojů, které jsou na první pohled výhodné tím, že využívají přírodních energií k výrobě čisté, bezemisní elektrické energie. Tyto zdroje jsou zároveň v čase proměnlivé, a to zvláště v případě větru a slunce, tudíž s nimi nelze předem počítat a musíme je využít ve chvíli, kdy jsou k dispozici a ne kdy je potřebujeme. Například když je jasno a větrno, máme nadbytek energie, a když je zataženo a bezvětří, musíme obstarávat elektrickou energii z jiných zdrojů. Tento problém řeší ve zvýšené míře Německo, které se snaží zvyšovat podíl vyrobené elektřiny ve prospěch větrných elektráren. [19]



Obr. 4: plocha zastavěná větrnými turbínami [22]

2.3. Akumulace

Jak je vidět z předchozích odstavců, není možné naplánovat výrobu elektrické energie dopředu tak, aby přesně odpovídala poptávce v rozvodné síti. Z toho důvodu je snaha při přebytečné elektrické energii akumulovat, a pak v případě špiček zatížení, tuto akumulovanou energii využít. Elektrickou energii je problematické skladovat přímo, tím spíše elektrickou energii střídavého napětí sinusového průběhu, který se používá v rozvodné síti.

Elektrická energie se pro potřeby akumulace mění na jinou formu energie lépe uchovatelnou po delší dobu. Přímé uskladnění je možné jen v kondenzátorech, které nedosahují příliš vysoké hustoty energie oproti ostatním možnostem. Kondenzátorů se využívá jen jako nouzového napájení při výpadku dodávek elektřiny pro elektroniku, kde jsou schopny dodávat dostatek energie, než dojde k bezpečnému uložení dat, nebo pro potřeby nárazových dodávek elektrické energie, například v elektromobilech.

3. Přehled systémů pro akumulaci elektrické energie

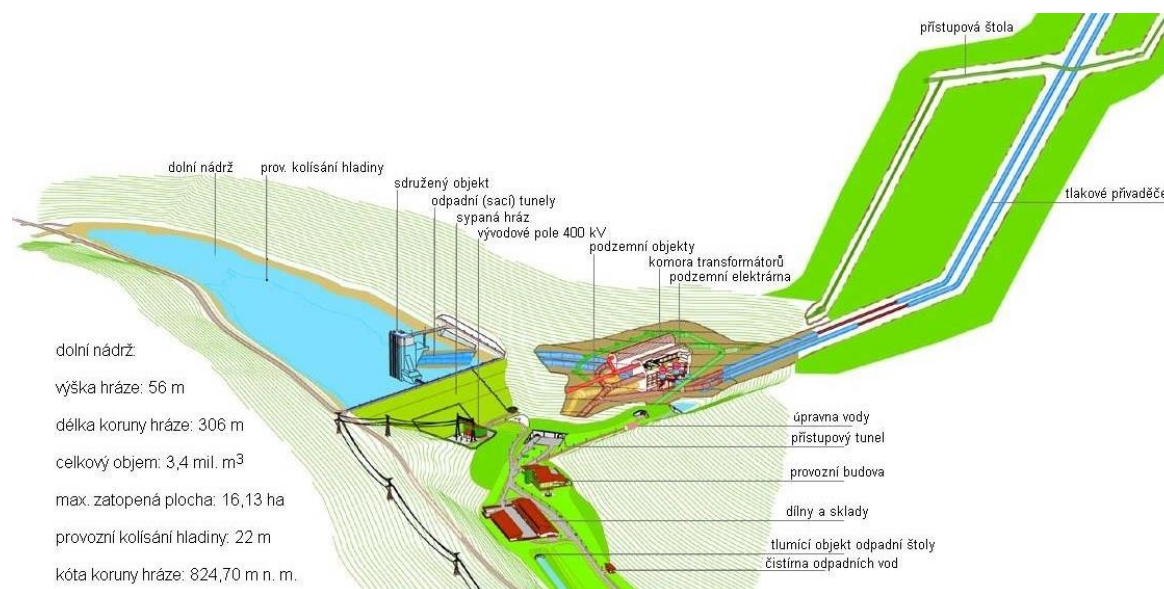
3.1. Přečerpávací vodní elektrárna

3.1.1 Popis

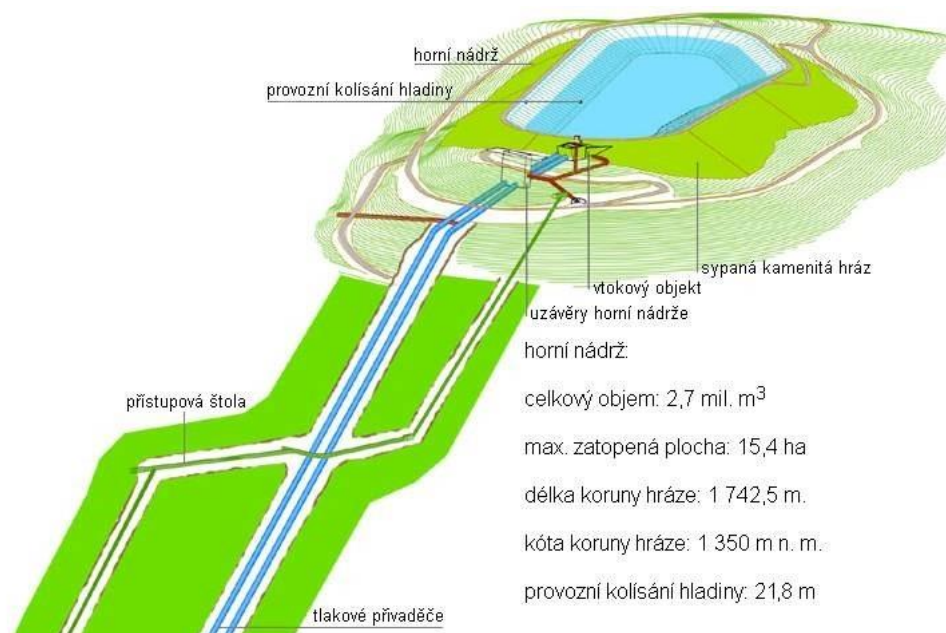
Přečerpávací vodní elektrárna je v současnosti asi nejdůležitější technologie v oblasti akumulace elektrické energie pro účely stabilizace rozvodné sítě. Přečerpávací vodní elektrárna je schopná dosáhnout vysokého výkonu, akumulovat velké množství energie po dlouho dobu a během krátkého okamžiku, v řádu desítek sekund, začít vyrábět elektrickou energii.

Historie akumulace elektrické energie v přečerpávacích elektrárnách se začala psát už téměř před 100 lety. V České republice máme každodenně používané tři, Štěchovice II postavené roku 1947, Dalešice z roku 1978 a Dlouhé Stráně z roku 1996. U nás největší přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně s výkonem 650MW, byla svého času zároveň třetí největší na světě. Dnes je tou světově největší Dirnowic v severním Walesu o výkonu 1800MW.

[1, 2, 8, 9, 10]



Obr. 5: Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně – dolní nádrž [23]



Obr. 6: Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně – horní nádrž [23]

3.1.2. Princip

Tento typ elektrárny využívá přeměnu elektrické energie na přeměnu potenciální energie vody. Sestává se ze dvou nádrží, obvykle přehradou v údolí a vodní nádrží na kopci. Mimo špičku, kdy je elektrické energie nadbytek, se elektrická energie spotřebovává pro čerpání vody z níže položené nádrže do výše položené. V době, kdy je elektrické energie nedostatek, se voda vypouští z výše položené nádrže na lopatky turbíny a ta vyrábí elektrickou energii a dodává jí do sítě.

Výkon získaný z vodní elektrárny lze ovlivnit výškou vodní hladiny nad turbínou, neboli spádem, a objemem vody, který proteče turbínou za jednotku času. Proto je při výběru lokality pro stavbu přečerpávací vodní elektrárny dobré vybrat takové místo, kde bude velký výškový rozdíl mezi oběma nádržemi. Tento parametr se označuje poměrem H/L , kde H je výškový rozdíl hladin horní a dolní nádrže a L udává délku přivaděčů vody z horní nádrže. Vztah pro výkon vodní elektrárny při zanedbání ztrát je

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \text{ (vzorec 1)}$$

kde je

P – teoretický výkon (W)

Q – průtok turbínou (m^3/s)

ρ – hustota vody (kg/m^3)

g – tíhové zrychlení (m/s^2)

H – střední spád (m)

Energetická kapacita elektrárny při zanedbání ztrát je vyjádřena vztahem

$$E = P \cdot t = V \cdot \rho \cdot g \cdot H \text{ (vzorec 2)}$$

kde je

E – teoretická zásoba energie vody (J, W .s)

V – využitelný objem vody (m^3)

t – čas (s)

Ztráty, které jsou spojené s akumulací energie elektrické do potenciální energie vody, jsou hlavně ztráty při čerpadlovém provozu na pohon, ztráty na turbíně při výrobě elektrické energie, hydraulické ztráty na potrubí a tepelné ztráty na vedení. Celková počítaná energie na svorkách transformátoru na straně elektrizační soustavy při akumulaci a následné výrobě elektrické energie udává účinnost akumulace kolem 75-85%, přičemž od budoucího vývoje si lze slibovat zlepšení pouze o několik procent. [1, 2, 8, 9, 10]

3.1.3. Souhrnné zhodnocení

Přečerpávací vodní elektrárny jsou v současnosti nejvýkonnějším a nepoužívanějším systémem pro vyrovnávání výroby a spotřeby elektrické energie při poměrně vysoké efektivitě. Jejich výstavba je však značně omezena požadavky na lokalitu vhodnou ke stavbě, a vysokými cenami.

3.2. Adiabatická tlakovzdušná akumulární elektrárna

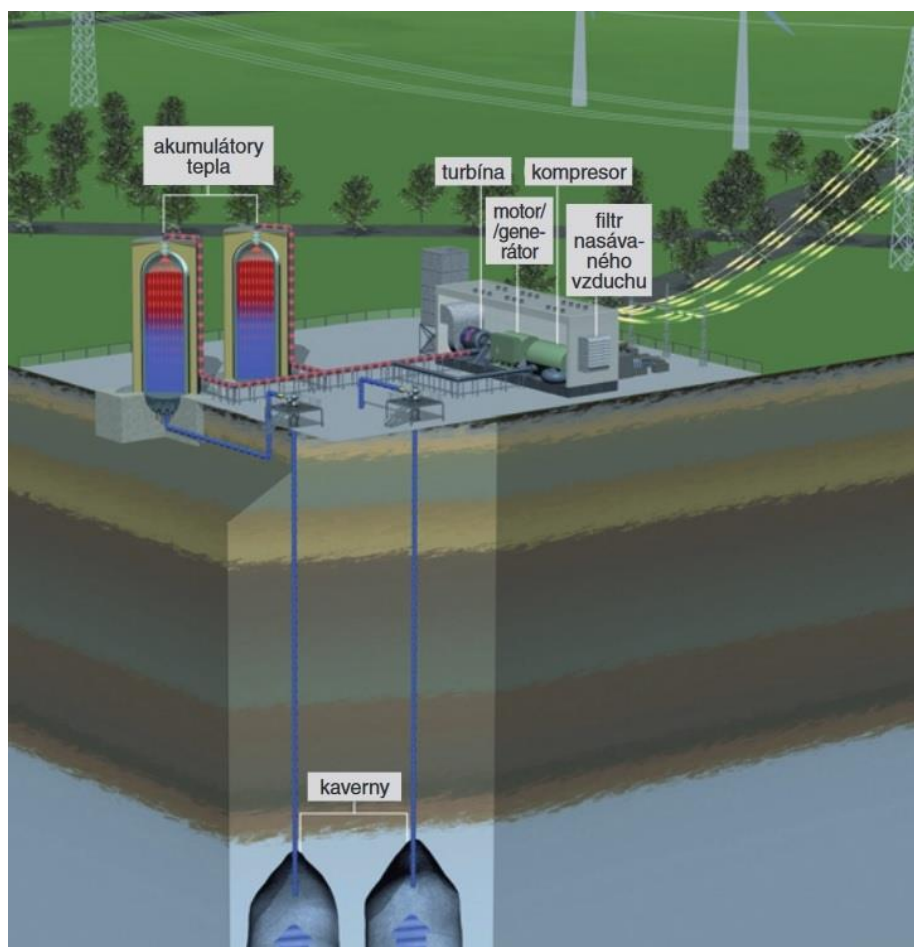
3.2.1. Popis

Adiabatická tlakovzdušná akumulární elektrárna (dále jen ATAE) je principem svého fungování podobná přečerpávací vodní elektrárně. Přbytek energie v rozvodné síti akumuluje v podobě stlačeného vzduchu do utěsněných prostor, kaveren, které jsou obvykle pod zemí. Při poptávce po elektrickém výkonu se takto natlakovaný vzduch vypouští přes plynovou turbínu, která roztáčí generátor vyrábějící elektrickou energii. Jako kaverna se dá například využít bývalý důlní komplex, jeskyně či artézské studně.

První zařízení tohoto typu fungovalo od roku 1978 v Německu. Prostor pro stlačený vzduch měl objem $310\,000\ m^3$ při provozním tlaku 72 barů po naplnění. Ve špičce byla elektrárna schopná dodávat do sítě 290MW elektrického výkonu, s celkovou účinností 42%. Následně se podařilo využíváním odpadního tepla pro předehřátí vzduchu zvýšit účinnost až na 55% a celkový maximální výkon na 320MW. Jako kaverna se používala

solná jeskyně, což vedlo k několika komplikacím v důsledku znečištění vzduchu agresivním solným prachem. Z tohoto důvodu již v současnosti tato ATAE není v provozu. Koncept této elektrárny byl později přepracován pro dosažení vyšší účinnosti, která již dosahuje úrovně přečerpávacích elektráren, tj. přes 70%.

V současnosti je rozpracováno několik nových projektů v USA a jeden v EU. Projekt v EU má na starosti zhruba desítku firem, z nichž se každá specializuje na určitou část. Projekt EU pod názvem ADELE, z německého *Adiabater Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung*, fungující někdy od roku 2009, si dal za cíl vyvinutí nových technologií, díky kterým by princip ATEA byl prakticky a efektivně využitelnou možností při stabilizaci elektrizační soustavy. V současnosti by měl být projekt ve fázi, kdy se jednotlivé části ověřují pro komerční nasazení pro výstavbu dalších zařízení tohoto typu. Po dokončení by ADELE měla mít parametry akumulované energie 1000MWh při výkonu až 260MW, účinnost 70%, výkonové ztráty na úbytcích tlaku vzduchu do 3% denně, a náběh na plný výkon do 15-ti minut. [3, 4, 5, 6, 8, 9, 10]



Obr. 7: grafické schéma ATAE [3]

3.2.2. Princip

Při přebytku energie v elektrické rozvodné síti se odebírá elektrický výkon pro pohon kompresoru. Ten vzduch z okolí stlačuje, čímž vzniká značné teplo. Teplota stlačeného vzduchu stoupá na 600-1000°C. Tento horký vzduch je přiveden do tepelného akumulátoru, kde se ochladí a dále je veden do kaverny. Tlak vzduchu v kaverně se obvykle pohybuje v rozmezí 5-10MPa podle aktuálního naplnění.

Při potřebě dodání elektrické energie do sítě se přivádí natlakovaný vzduch do tepelného akumulátoru, kde se zahřeje, a následně je přiveden na plynovou turbínu, která pohání generátor elektrické energie. Právě akumulace tepla má velký vliv na zvýšení efektivity akumulace energie. Vzduch vypouštěný na lopatky turbíny musí mít dostatečnou teplotu, aby vlivem snížení tlaku za současného snížení teplot nedocházelo k namrzání lopatek turbíny. [3, 4, 5, 6, 8, 9, 10]

3.2.3. Souhrnné hodnocení

Akumulace energie principem ATAE je v počátcích svého vývoje, avšak již fungující a vyvíjené projekty ukazují, že se jedná o důležitý prvek v budoucích možnostech řízení elektrických rozvodných soustav. ATAE dokáže naakumulovat velké energie, omezené prostorem využívaným k uskladnění tlakového vzduchu, pro něž se můžou využívat jak přírodní, tak umělé podzemní prostory. To udává více příležitostí ke stavbě těchto zařízení, než například v porovnání s přečerpávacími vodními elektrárnami, pro které je většina využitelných lokalit již používána.

Další výhodou je právě počátek vývoje technologie, takže se dá do budoucna očekávat další nárůst efektivity a dalších parametrů díky budoucímu vývoji, založenému na zlepšování výsledků dosažených vývojem současným.

Můj osobní pohled na využití této technologie je kombinace s větrnými parky, kde by se větrná energie používala primárně pro pohon kompresorů, a tlakový vzduch z kaveren by se dal regulovaně pouštět na turbínu pro výrobu elektrické energie. Odpadl by tak přímý problém s rozkolísáváním sítě a následnou regulací, neboť výstupem z takovéto kombinace byl již mnohem stálejší výkon, který by byl zároveň dobře regulovatelný v rámci možností zásob tlakového vzduchu. [3, 4, 5, 6, 8, 9, 10]

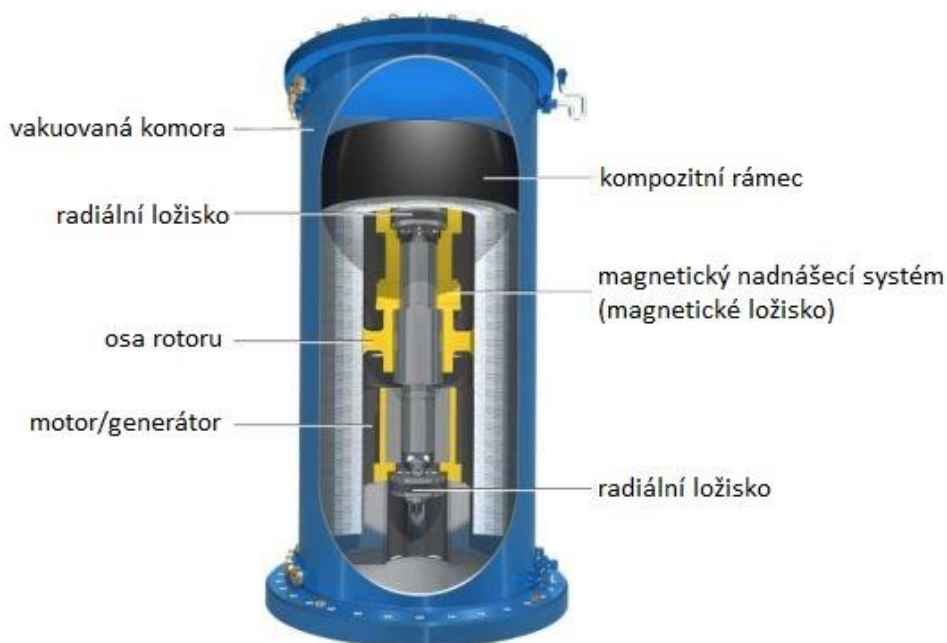
3.3. Setrvačnickové akumulátory

3.3.1 Popis

Setrvačnick je nejstarším aparátem pro akumulaci elektrické energie vůbec. Principu setrvačnicku se využívá od hrnčířských stolků, přes parní lokomotivy, spalovací motory v automobilech, až po možnosti krátkého zásobování elektrickou energií v případě výpadků elektrické rozvodné sítě. Setrvačnickové akumulátory jsou obecně dimenzovány na krátkodobé pokrývání výkonů v řádech od kilowatů až po megawatty, či desítek megawattů v případě seskupení více setrvačnicků do soustavy.

Další možností využití setrvačnicků je tam, kde je potřeba dodání velkých výkonů jen občasná, či nárazová. Jako příklad se dá uvést pražské výzkumné středisko pro výzkum plasmy, kde byly velké energetické nároky na vytvoření vhodných podmínek pro experimenty, ale z důvodu okolní zástavby nebylo možné dodatečně vybudovat nové elektrické vedení k laboratoři. Bylo proto využito dvou setrvačnicků, které ze stávající elektrického připojení naakumulovaly dostatek energie pro počáteční silný impuls.

V Průmyslu se například používají setrvačnickový akumulátor typu DYBAT, který dokáže dodávat elektrický výkon 70kW po dobu půl minuty, po které dojde bezpečně k přepnutí na záložní zdroje. Náběh výroby energie setrvačnicku je v řádech jednotek milisekund, takže nedojde k výpadku počítačů a výroby, což je v některých průmyslech mimořádně důležitá vlastnost. [7, 8, 9, 10]



Obr. 8: setrvačnick

3.3.2. Princip

Pro ukládání energie do setrvačnicku se využívá jeho energie rotující hmoty, nejčastěji v podobě válce. Ve stěnách nádoby pro rotor jsou umístěné cívky statoru a v rotoru poté permanentní magnety. Při akumulaci se soustava chová jako motor a roztáčí se rotor. Při potřebě energii dodat se do cívek indukuje napětí rotujícím polem permanentních magnetů. Řídící výkonová elektronika pak zajišťuje konstantní napěťový výstup v určitém rozsahu otáček, neboť s klesajícími otáčkami klesá i indukované napětí v cívkách podle vzorce

$$U_i = B \cdot S \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (\text{vzorec 3})$$

Kde je

U_i – indukované napětí (V)

B – magnetická indukce permanentních magnetů rotoru (T)

S – plocha cívky rotoru (m^2)

$\sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$ – okamžitý sklon mezi plochou cívky a směrem magnetické indukce (-)

f – otáčky rotoru za sekundu (Hz)

Energie uložená v setrvačnicku je závislá na momentu setrvačnosti a rychlosti, s jakou se setrvačnick otáčí. Z toho vycházejí dva způsoby zvyšování energetické kapacity setrvačnicku.

První možností je zvyšování hmotnosti, která začíná na desítkách kilogramů u malých setrvačnicků. To je způsob technologicky méně náročný, avšak výsledný setrvačnick je náročný rozměrově a na údržbu. Tyto setrvačnick dosahují rychlostí otáčení do 10 000 otáček za minutu. Za takovýto setrvačnick se dá považovat i každá hřídel generátoru elektrárny. Jde většinou o poměrně robustní stroje s hmotností i desítek tun, kde se využívá takzvané točivé rezervy strojů pro pokrývání minimální změn v odběrech v rozvodné síti, na které nelze jinak reagovat. Například na rozsvícení žárovky na nočním stolku není reakce elektráren reálná.

Druhou možností zvýšení elektrické kapacity setrvačnicku je zvýšení otáček. Tato možnost je technologicky velmi obtížná, jelikož klade vysoké nároky na materiál setrvačnicku, který musí mít velkou pevnost v tahu, aby vydržel velké odstředivé síly, dále na ukotvení rotoru a ložiska. Možnost jak dosáhnout nejvyšších možných rychlostí skýtá použití magnetických ložisek, které postrádají fyzické spojení a nedochází tudíž ke tření a opotřebení. Pro další zvýšení otáček se používají vakuované nádoby rotoru, kde již nedochází k téměř žádnému tření, a výsledný setrvačnick tak udrží energii akumulovanou

i desítky let. Výhodou těchto setrvačníků je minimální náročnost na údržbu a malé rozměry v porovnání se setrvačníky velkých hmotností, jelikož rychlé setrvačníky mají nízké hmotnosti. Rekord v rychlosti setrvačnicku je neuvěřitelný 1 000 000 otáček za minutu, při hmotnosti rotoru 0,6kg.

Pro výpočet energie akumulované v setrvačnicku slouží několik vzorců, které ukazují, že výhodnější je směřovat vývoj k náročnější druhé variantě.

Výsledný vzorec energie setrvačnicku je

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot I \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \text{ (vzorec 4)}$$

Kde je

E_k – kinetická energie rotujícího tělesa (J)

I – moment setrvačnosti (kg/m^2)

f – počet otáček za sekundu (Hz)

Moment setrvačnosti můžeme rozepsat

$$I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \text{ (vzorec 5)}$$

Kde je

M – hmotnost (m)

r – poloměr válce (m) (při rovnoměrném rozložení hmotnosti)

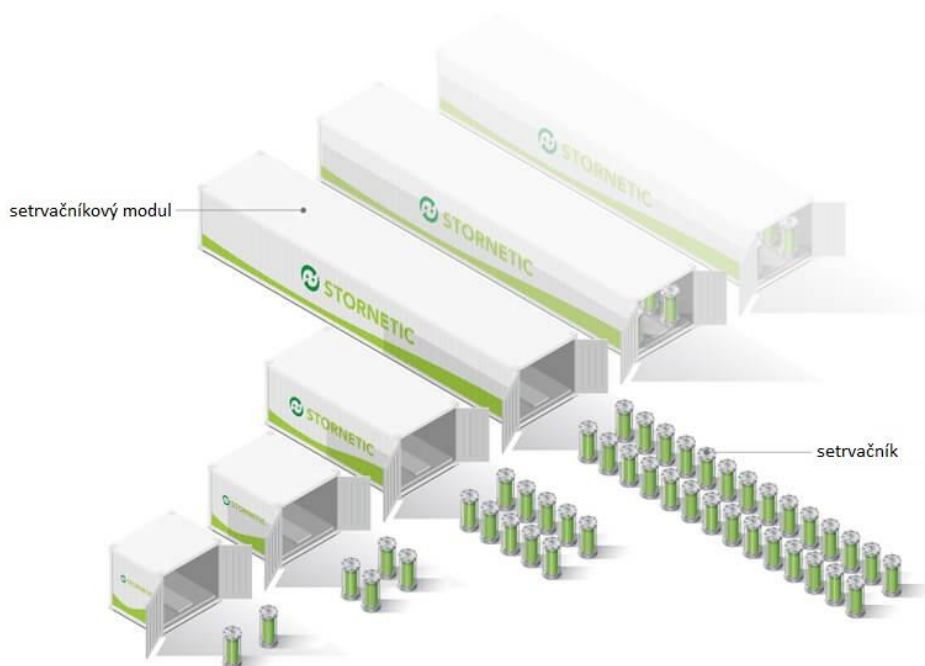
Vezmeme-li v úvahu, že proměnné hodnoty jsou otáčky, poloměr a hmotnost, můžeme vzorec upravit na

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 = \pi \cdot m \cdot r^2 \cdot f^2 \text{ (vzorec 6)}$$

Změna rozměrů blízce souvisí s hmotností, ovšem má své limity v konstrukčních vlastnostech, především v nárocích na ložiska a přetížení po obvodu setrvačnicku. Proto se zvyšuje hmotnost při zvětšování rozměru převážně v ose otáčení, tudíž je nárůst energie lineální. Oproti tomu při zachování malých rozměrů a zvyšováním otáček se energie zvyšuje kvadraticky a lze díky tomu na menším zastavěném prostoru akumulovat více energie. [7, 8, 9, 10]

3.3.3. Souhrnné hodnocení

Technologie setrvačnicku je výhodná v dlouhé životnosti, která se u pokročilých modelů udává na statisíce i miliony cyklů, při vysoké účinnosti přes 90%. Nevýhodou je ale poměrně nízká hustota uložené energie, kterou však může vyvážit možnost tuto energii využít v krátkém čase s velkým výkonem. Další nevýhoda je komplikovanost mobilního řešení, například pro elektromobily, kvůli gyroskopickému efektu. Maximální možný výstupní okamžitý výkon setrvačnicků je v dnešní době omezen z velké části výkonovou elektronikou regulující výstupní napětí. Tyto nevýhody by se daly obejít využíváním setrvačnicků pro stacionární akumulátorové stanice, kde by se menší setrvačnický slučovaly do baterií a společně by poskytovali velké zásoby elektrické energie. Tyto stanice by mohli být umístovány v lokalitách výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů, kde by pomáhaly zrovnoměrňovat křivky výkonu.



Obr. 9: škálovatelné řešení setrvačnickových baterií připravované společností STORNETIC [26]

Osobně mě napadá například využití u fotovoltaické elektrárny, které mají jako primární výrobu stejnosměrné napětí. To by mohlo být využito k roztáčení těžkého setrvačnicku na 3000 otáček za minutu, a ten by byl připojen na třífázový generátor a bylo by docíleno výroby i jalové složky energie, kterou jinak nejsou schopné fotovoltaické elektrárny produkovat. Technologii by bylo třeba doplnit i menší akumulační kapacitou například pomocí super kondenzátorů na stejnosměrné straně, aby se dosáhlo co nejhladšího průběhu výroby energie. [7, 8, 9, 10]

3.4. Chemické články

3.4.1. Popis

S chemickými články pro akumulaci stejnosměrné elektrické energie se běžně setkáváme a využíváme je všichni. Každý si jistě vybaví nejčastěji používané lithium-iontové a lithiumpolymerové akumulátory v telefonech, autoakumulátory tvořené olovem a kyselinou sírovou, či klasické dobíjecí tužkové baterie využívající více chemických sloučenin.

3.4.2. Princip

Elektrická energie se ukládá do energie chemické vazby mezi dvěma prvky či dvěma sloučeninami. Jedná se o vratný proces, kdy při nabíjení je energie dodávána a vznikají chemické vazby, které po odpojení akumulátoru od zdroje dají vzniknout rozdílu elektrického potenciálu mezi elektrodami akumulátoru. Velikost elektrického potenciálu a se závislá na použitých materiálech účastnících se chemické vazby, většinou se napětí pohybuje v rozsahu 1-2 volty na jeden článek akumulátoru, a vyššího napětí je dosaženo sériovým zapojováním těchto článků. [8, 9, 10, 24]

Olověné akumulátory

Olověné akumulátory patří mezi nejstarší a nejrozšířenější používané akumulátory. Používají se zejména v automobilech a v systémech záložního napájení. Výhodou je odolnost proti nízkým teplotám a nízká cena, problémová je však toxicita olova a kadmia. Nejčastěji se vyrábí v provedení se jmenovitým napětím 12V, 24V, a 48V.

Elektrody akumulátoru jsou tvořené olovem a oxidem olovnatým v roztoku kyseliny sírové. Při vybíjení vzniká na elektrodách síran olovnatý a svorkové napětí jednoho článku jsou 2V. [8, 9, 10, 24]



Obr. 10: olověný akumulátor pro automobil [27]

Nikl-kadmiové akumulátory

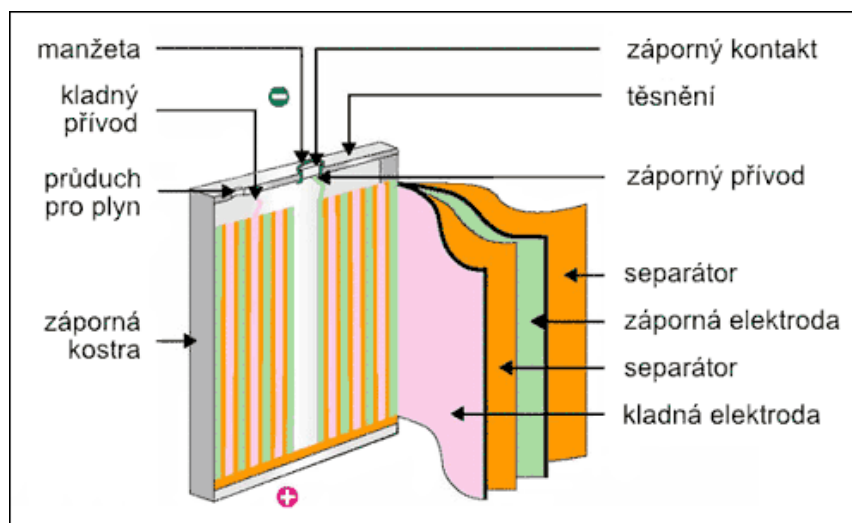
Využívají reakce oxo-hydroxidu nikelnatého na kladné elektrodě, který při vybíjení přechází na hydroxid nikelnatý při současné reakci záporné kadmiové elektrody na sloučeninu oxidu kademinatého. Elektrolytem je vodný roztok hydroxidu draselného. Výsledné napětí článku je 1,2V a má podobné uplatnění jako olověný akumulátor. Vylepšením jsou pak NIMH akumulátory. [8, 9, 10, 24]



Obr. 11: NiCd akumulátor v provedení tužkové baterie [28]

Lithium iontové akumulátory

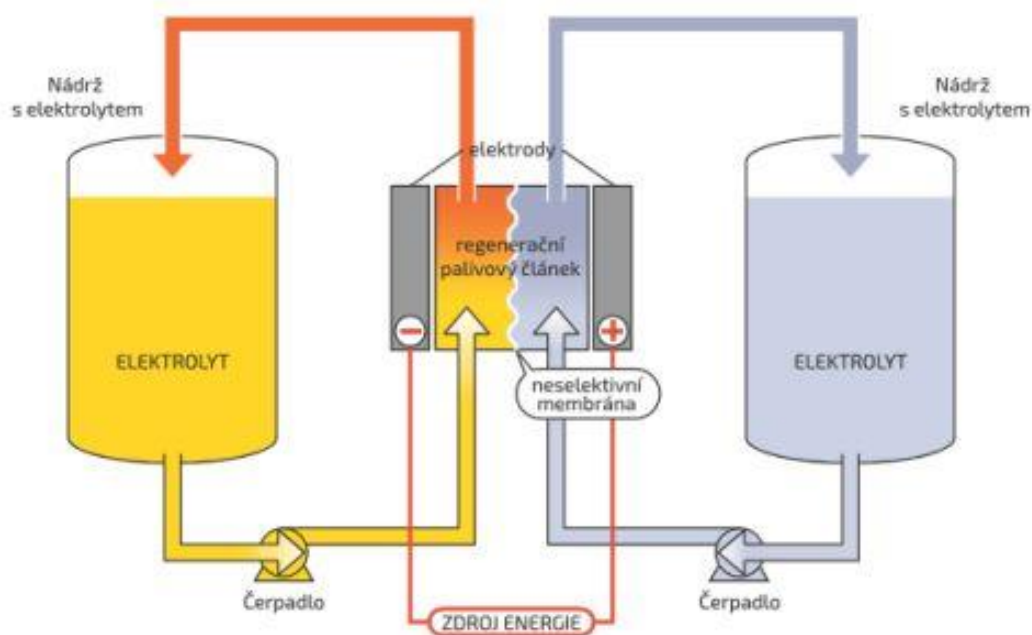
Základem akumulátoru je katoda z kobaltnatanu lithného, anoda z uhlíku s vrstevnatou strukturou a elektrolyt lithné soli rozpuštěné v organickém karbonátu. Lithium iontové a lithium polymerové akumulátory jsou v současnosti na vzestupu díky rozmachu elektroautomobilového průmyslu. Vyznačují se dobrými možnostmi tvarování výsledných akumulátorů, což je výhoda pro vkládání do malých zařízení jako jsou telefony, kde se hledí na každý milimetr, vysokou hustotou energie a napětím 3,6-4,2 voltu podle úrovně nabití. Nevýhodou je snižování maximální kapacity hlubokým vybíjením článku a vyšší cena. Při špatném zacházení s baterií může také dojít ke vznícení či dokonce výbuchu, zvláště při proražení, kdy dojde ke zkratu mezi svinutými elektrodami. [8, 9, 10, 24]



Obr. 12: grafický průřez Li-ion akumulátorem [29]

Průtokové baterie

Tento typ není jako klasické články. Je vhodný především pro velkokapacitní ukládání energie v průmyslovém měřítku. Baterie se skládá ze dvou rezervoárů naplněných elektrolyty. Ty se přečerpávají přes membránu či separátor, při čemž jeden podléhá chemické redukci, a druhý chemické oxidaci, čímž se mezi nimi vytváří elektrický potenciál a protéká elektrický proud přes připojené elektrody. Kapacita se poté odvíjí od množství elektrolytů v rezervoárech, výkon podle typů elektrolytů a plochy membrán. Typické napětí je v rozmezí 1,2-2V na jeden pár membrán. [8, 9, 10, 24]



Obr. 25: princip průtokové baterie [38]

Srovnávací tabulka chemických článků

Název	Počet cyklů	Energie Wh/kg	Výkon W/kg
Olověné akumulátory	800	35	200
Nikl-kadmiové	1000	35	260
Lithium-iontové	600	155	375

Srovnání je pouze orientační, především výkony se mohou lišit podle cílení konstrukce článku. Nejvíce je variabilní výkon lithium-iontového akumulátoru. Jeho konstrukce se velmi liší pro použití v mobilních telefonech, přes notebooky až po elektromobily. Tabulkový údaj je dopočítaný na základě parametrů notebookové baterie pro napájení notebooku s typickou maximální spotřebou 150W. [24]

3.4.3. Souhrnné hodnocení

Je spousta druhů chemických akumulátorů elektrické energie. Některé se dále inovují, další nové se vyvíjejí a slibují někdy až převratné výsledky. Největší význam mají do budoucna inovace baterií pro automobily a často stále náročnější mobilní telefony. Další velké uplatnění teď i do budoucna nalézají chemické akumulátory v ostrovních systémech menšího rozsahu, kde jde o levný způsob akumulace značného množství energie pro potřeby rodinných domů či chat, a záložní napětí při výpadku elektrické energie. Další výhodou je poměrně vysoká efektivita dosahující přes 80%. Pro regulaci v rámci elektrizační soustavy ale budoucnost tohoto způsobu akumulace nevidím, jelikož všechny typy elektrochemických akumulátorů trpí na opotřebování v rámci stovek, maximálně několika málo tisíc cyklů u těch nejpokročilejších, což by i při denním zatěžování značně prodražovalo jejich dlouhodobý provoz vyměňováním opotřebovaných jednotek za nové. [8, 9, 10, 24]

3.5. Superkapacitory

3.5.1. Popis

Podobně jako klasické kondenzátory uchovávají energii v podobě nahromaděného elektrického náboje na elektrodách oddělených dielektrikem. Ovšem oproti klasickým elektrolytickým či svitkovým kondenzátorům dosahují o několik řádů vyšších kapacit. Jejich masivní využívání je teprve na začátku, avšak technologie pro jejich masivní výrobu se již rozvíjí a tak se stávají superkapacitory stále dostupnější. [9, 10, 13]



Obr. 13: Superkapacitor 3000F[30]

3.5.2. Princip

Základní princip, jakým superkapacitory ukládají elektrickou energii, je stejný jako u klasických svitkových či elektrolytických kondenzátorů. Dvě elektrody oddělené dielektrikem, na nichž se hromadí elektrický náboj. Kapacita kondenzátoru se vypočítá podle vztahu

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d} \text{ (vzorec 7)}$$

Kde je

C – kapacita kondenzátoru (F)

ε_0 – permitivita vakua (F/m)

ε_r – relativní permitivita materiálu dielektrika (-)

S – plocha elektrod (m^2)

d – vzdálenost mezi elektrodami (m)

Energie uložená v kondenzátoru vychází z kapacity

$$E = \frac{CU^2}{2} \text{ (vzorec 8)}$$

Kde je

E – energie uložená v kondenzátoru (J)

U – napětí mezi elektrodami kondenzátoru (U)

A maximální výkon dosažitelný kondenzátorem

$$P = \frac{U^2}{R} \text{ (vzorec 9)}$$

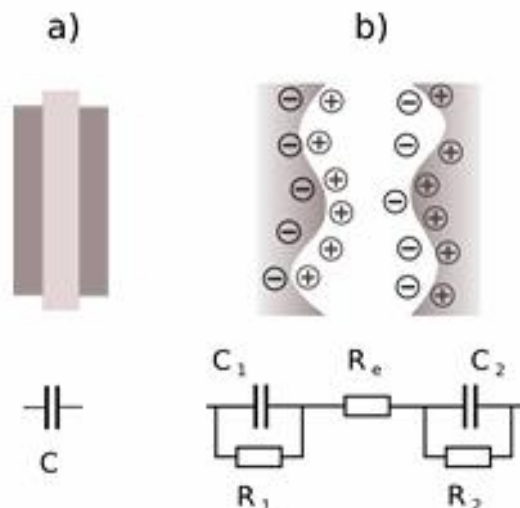
P – maximální výkon kondenzátoru (W)

R – sériový odpor kondenzátoru (Ω)

Z uvedených vzorců je vidět že kapacitu lze navyšovat snižováním tloušťky dielektrika a zvětšováním plochy elektrod. Právě plocha elektrod je to co dává superkapacitorům tak velkou kapacitu oproti klasickým kondenzátorům. Velká plocha elektrod je dosažena díky použitému materiálu. Elektroda je pokryta porézním uhlíkem, konkrétně se používají formy uhlíkových sazí či expandované grafity, s obrovskou plochou povrchu až 3000 metrů čtverečných na jediný gram materiálu.

Elektrolyty se používají dvojího typu. První jsou založeny na kyselinách či alkáliích, mají vyšší vodivost a dovolují výsledné napětí v okolí jednoho voltu. Druhou možností jsou

organická rozpouštědla jako propylen ethylen karbonát a některé druhy solí. Tyto elektrolyty dovolí pracovní napětí až 4V. Každé rozhraní elektroda-elektrolyt pak vytváří chemickou dvojvrstvu chovající se jako kondenzátor, rozhraní samotné je pak dielektrikem. [9, 10, 13]



Obr. 14: a) kondenzátor s dielektrikem, b) kondenzátor s elektrochemickou dvojvrstvou [30]

3.5.3. Souhrnné hodnocení

Výhody superkapacitorů jsou především rychlé nabíjení a vybíjení, relativně vysoký výkon, vysoká efektivita akumulace přes 90% a stále se snižující cena a zvyšující kapacita. Do budoucna lze očekávat, že tento trend bude pokračovat díky pokračujícímu vývoji a rozšiřování masovosti výroby. V možnostech stabilizace elektrické soustavy lze superkapacitory využít především v kombinaci s fotovoltaickými elektrárnami, které primárně produkují stejnosměrný proud. Další využití se nachází ve vzrůstajícím elektroautomobilovém průmyslu, kde by mohli po navýšení kapacity a s dostatečnou infrastrukturou nabíjecích stanic nahradit baterie, především pro městský provoz. Pro toto použití je však jejich výhoda zároveň i jejich nevýhodou, jelikož krátké a vysoké odběry elektrické energie pro jejich nabíjení mohou vést k destabilizaci dnešních rozvodných sítí, které je nutné na elektromobily připravit. [9, 10, 13]

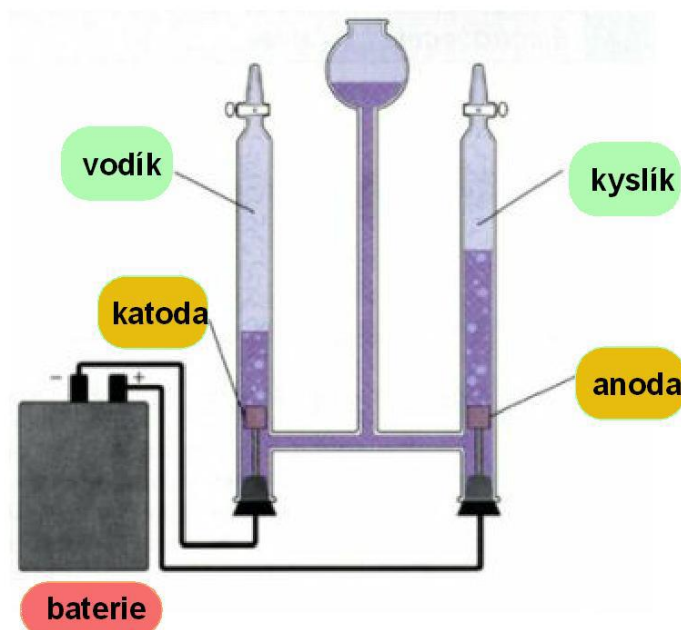
3.6. Akumulace do vodíku

3.6.1. Popis

Vodík při slučování s jinými prvky či molekulami uvolňuje značné množství energie odvíjející se od daného typu reakce. Může jít o palivové články vodíkových elektromobilů, spalování vodíku v motorech či turbínách, v raketových motorech. Většinou jde o slučování s kyslíkem, z čehož vyjde jako produkt reakce čistá voda, či vodní pára, takže jde o ekologicky šetrný zdroj energie. Protože se však vodík takto dobře slučuje za uvolňování velkého množství energie, není běžně dostupný a musí se vyrábět. Vyrobit vodík lze chemickou či elektrickou cestou, což také značnou energii spotřebovává. [10, 15]

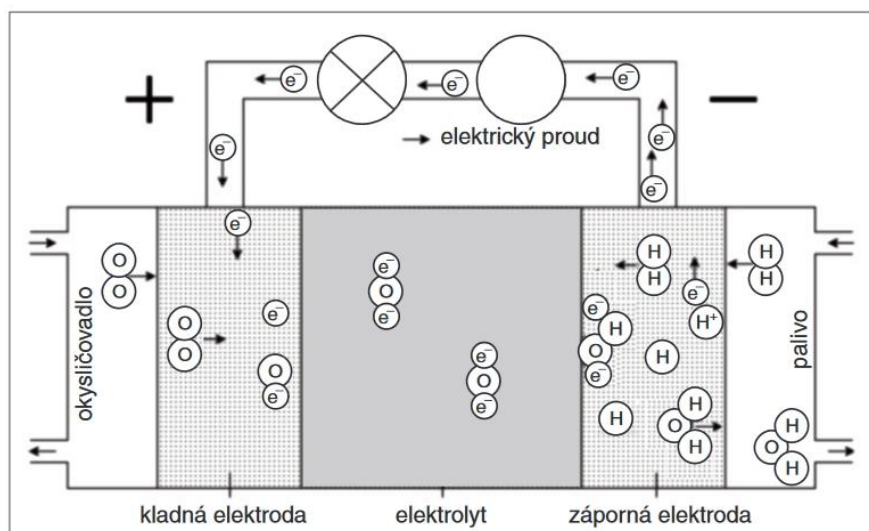
3.6.2. Princip

Výroba vodíku pomocí elektřiny se nazývá hydrolýza vody. Jde o proces, kdy stejnosměrný proud prochází vodou a rozštěpí při tom chemickou vazbu mezi vodíkem a kyslíkem. Čistá voda je velmi špatný vodič, proto se do vody přidávají kyseliny zvyšující její elektrickou vodivost. Výsledkem hydrolýzy je plynný kyslík, a plynný vodík, oba s vysokou čistotou. Účinnost hydrolýzy je 80-92%. Na výrobu jednoho kilogramu vodíku je spotřebováno 9kg vody a 38kWh elektrické energie. Následně pro praktické účely je ještě vodík zkapalňován, aby bylo možné s ním lépe zacházet, to spotřebovuje dalších přibližně 10kWh energie.



Obr. 15: elektrolýza vody [32]

Zpětně se pak elektrické energie z vodíku získává klasickým spalováním s kyslíkem, které může navázat na paroplynový cyklus jako v tepelných elektrárnách, nebo se využívá chemického uvolňování elektrické energie přímo v palivových člancích. Této reakci se říká studená oxidace, či studené spalování. Jde o oxidačně redukční reakci za přímého vzniku elektrického proudu a menšího množství tepla. K elektrodám je kontinuálně přiváděn vodík a kyslík, a odváděna vodní pára. Elektrody jsou pórovité a jsou odděleny elektrolytem. V pórech vzniká třífázové rozhraní, ve kterém dochází k chemické oxidaci vodíku a chemické redukci kyslíku. Pórovitost elektrody umožňuje elektrolytu vzlínat do pórů, ale plyn za elektrodou působí tlakově proti pronikání skrze póry přes elektrodu. Elektrody bývají vyráběny z ušlechtilých kovů, například z platiny, které působí v elektrochemické reakci i jako katalyzátor. [10, 15]



Obr. 16: schéma palivového článku [33]

3.6.3. Souhrnné hodnocení

Výhodou ukládání energie do výroby vodíku je ekologičnost procesu. Na začátku se spotřebovává voda, a výslednými spalinami na konci procesu je opět voda. Vyrobený vodík lze také snadno uskladňovat i delší dobu a převážet. V mobilitě dostupného výkonu je jakýmsi ekvivalentem fosilních paliv, kde se převážá pouze akumulovaná energie a využije se až na místě spotřeby, kde je dostupná technologie. Dají se takto zásobovat místa, kam je levnější dopravovat palivo pro výrobu elektrické energie než přivádět elektrické vedení a zároveň je to mnohem ekologičtější ve srovnání s fosilními palivy. Nevýhodou je, že princip elektrické výroby není vhodný pro potřeby krátkodobé akumulace energie využitelné pro potřeby rozvodné sítě. Provozní napětí jednoho článku je jen cca 0,5 voltu, proto je nutné slučování více článků do jednoho zařízení. [10, 15]

4. Porovnání systémů akumulace elektrické energie

V této kapitole se pokusím o porovnání parametrů jednotlivých systémů tak, aby uvedené hodnoty řádově odpovídali nejčastějším hodnotám aplikovaných systémů již používaných či již vyvinutých a připravovaných pro komerční použití.

4.1. Porovnávání z hlediska dosažitelného výkonu

Typ systému	Dosahované výkony [kW]
Přečerpávací vodní elektrárny	200 000 – 2 000 000
Adiabatické tlakovzdušné akumulární elektrárny	200 000 – 300 000
Setrvačníky	70 – 1 600 000
Chemické články	0,01 - 10 (10 000 - 100 000)
Superkapacitory	0,01 – 0,1
Akumulace vodíku	0,002

Výkonové hodnoty jednotlivých systémů jsou uvedeny pro jeden objekt (jednu přečerpávací elektrárnu, jeden palivový vodíkový článek). V případě chemických článků jsou v závorce uvedeny hodnoty udávající výkony velkých akumulátoroven sloužících ke stabilizaci sítě.

V praxi se pro zvýšení výkonů menších akumulčních jednotek využívá dobré škálovatelnosti pro dosažení vyšších hodnot, především u chemických článků, superkapacitorů a vodíkových palivových článků. [1-15]



Obr. 17: Kalifornská akumulátorovna o výkonu 30MW a kapacitě 120MWh

4.2. Porovnání z hlediska množství akumulované energie

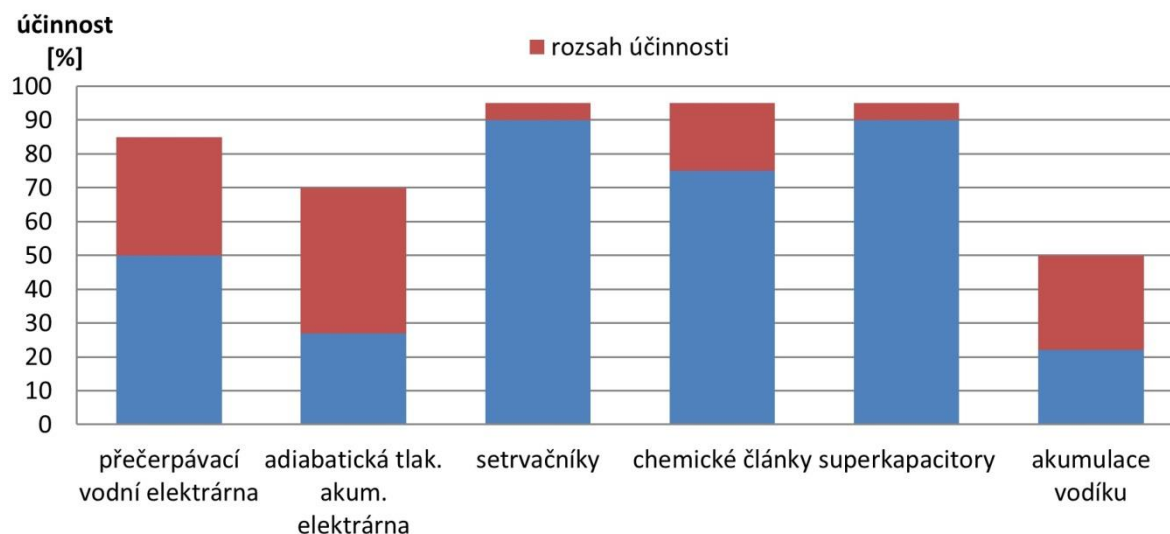
Typ systému	Dosahované energie [kWh]
Přečerpávací vodní elektrárny	100 000 – 11 000 000
Adiabatické tlakovzdušné akumulární elektrárny	1 000 000
Setrvačníky	0,1 – 10 (1 – 1000)
Chemické články	0,001 – 5 (10 000 – 400 000)
Superkapacitory	0,001 – 0,01 (0,01 – 0,1)
Akumulace vodíku	8 – 25 (na jeden kg vodíku)

Výkonové hodnoty jednotlivých systémů jsou opět uvedeny pro jeden objekt (jednu přečerpávací elektrárnu, jeden palivový vodíkový článek). Hodnoty v závorkách ukazují hodnoty soustav používaných jako jeden celek. Pro chemické články to jsou velké akumulátorovny určené pro stabilizaci sítě, pro setrvačníky jsou to kontejnerové moduly více vzájemně propojených setrvačnicků, pro superkapacitory zase moduly používané v elektromobilech, či systémech KERS vozů F1. [1-15]



Obr. 18: kontejner se zapojenými setrvačníky [26]

4.3. Porovnání z hlediska účinnosti



Obr. 27: grafické znázornění rozsahu dosahovaných účinností

Účinnost jednotlivých systémů je dána především technologickým pokrokem v dané oblasti. Rozsah hodnot účinnosti je dán rokem výroby zařízení a dostupnou technologií v té době. Jak je vidět tak prostor pro výrazné zlepšení je pouze v možnostech akumulace energie pomocí vodíku, a částečně také u adiabatických tlakovzdušných elektráren. U ostatních systémů lze očekávat růst maximálně v procentech. [1-15]



Obr. 19: modulové zapojení více superkapacitorů pro dosažení vyššího napětí

4.4. Porovnání z hlediska ceny na vybudování

Typ systému	Investiční náklady CZK/kWh
Přečerpávací vodní elektrárny	11750 - 108100
Adiabatické tlakovzdušné akumulární elektrárny	11750 - 35250
Setrvačníky	3055 - 11750
Chemické články	7050 - 82250
Superkapacitory	3055 - 11750
Akumulace vodíku	11750 - 17625

Hodnoty jsou přepočítané z hodnoty dolaru podle kursu k datu 7. 6. tj. 1USD = 23,5CZK. Vyšší investice do budování velkých akumulárních elektráren jsou ovlivněné především terénem a lokalitou kde jejich výstavba probíhá. V případě horských oblastí, jako jsou třeba Alpy, komplikuje terén výstavbu a tím zvyšuje cenu, dále i počasí, ovlivněné především roční dobou a nadmořskou výškou. Setrvačníky a kondenzátory mají nižší náklady díky vysoké sériovosti výroby. Chemické články sice také těží ze sériovosti, avšak vyžadují určité bezpečnostní opatření vzhledem k použitým chemikáliím. [1-15]



Obr. 20: fotografie přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé stráně [35]

4.5. Porovnání z hlediska životnosti

Typ systému	Počet cyklů
Přečerpávací vodní elektrárny	20 000 – 100 000
Adiabatické tlakovzdušné akumulární elektrárny	10 000 – 20 000
Setrvačníky	50 000 – 1 000 000
Chemické články	500 – 2 000
Superkapacitory	10 000 – 1 000 000
Akumulace vodíku	neomezeně

Počet cyklů přečerpávací vodní elektrárny a adiabatické tlakovzdušné elektrárny je omezen především mechanickým namáháním jejich mechanických částí. Při správné údržbě a opravách však jejich životnost lze průběžně prodlužovat. Pokročilé setrvačníky využívající magnetických ložisek a vakua již nepodléhají téměř žádnému mechanickému namáhání a proto dosahují dlouhé životnosti i přes mechanickou podstatu ukládání energie. Životnost chemických článků je silně omezená paměťovým efektem a dalšími degenerativními vlivy chemických reakcí, které postupně snižují využitelnou kapacitu článků. Jako hranice životnosti chemických článků se uvažuje 80% počáteční hodnoty akumulované energie. Superkapacitory jsou chemicky mnohem stálejší oproti chemickým článkům, nepodléhají mechanickému namáhání a tak je jejich životnost omezená hlavně stárnutím materiálů použitých v jeho konstrukci. [1-15]

4.6. Porovnání z hlediska doby akumulace

Typ systému	Doba akumulace
Přečerpávací vodní elektrárny	Dle klimatických podmínek
Adiabatické tlakovzdušné akumulární elektrárny	9 dní
Setrvačníky	Až desetiletí
Chemické články	měsíce
Superkapacitory	Desítky dní
Akumulace vodíku	9 dní

Doba akumulace vody v přečerpávací vodní elektrárně je ovlivňována hlavně klimatickými podmínkami, především odpařováním vody v horkých letních dnech. To ale není nijak zásadní omezení vzhledem k nárokům na denní potřebu regulace rozvodné sítě tímto systémem. Doba akumulace adiabatických tlakovzdušných elektráren ovlivňuje nejvíce těsnost kaveren. Pokles tlaku je udáván přibližně o 3% za den, to je pokles na 80% původní kapacity přibližně za 9 dní. Na tento typ se rovněž kladou nároky na denní využití, takže tato ztrátovost tlaku není nijak omezující. Pokročilé setrvačníky se vyznačují téměř nulovým mechanickým odporem otáčení, tudíž se předpokládá, že energie rotačního pohybu může být využita i po desetiletí. Chemické články podléhají podobně jako superkapacity pozvolnému samovybití. Rychlost samovybití je ovlivněna nejvíce teplotou článků. Čím je vyšší, tím rychlejší je proces samovybití. Při pokojové teplotě je pokles na 80% kapacity přibližně po desítkách dní až měsících. Vodík, skladovaný v kapalném skupenství v tlakových nádobách o tlaku do 5 barů, je vlivem tepla okolí ohříván což zvyšuje tlak uvnitř tlakové nádoby. Tento vzrůstající tlak je snižován upouštěním bezpečnostního ventilu udržujícím tlak uvnitř lahve na bezpečné úrovni. V závislosti na podmínkách skladování a izolaci nádoby je upuštěno maximálně 3% objemu vodíku za den. Za 9 dní tak poklesne hmotnost vodíku na 80% původní hodnoty. [1-15]



Obr. 21: tlaková nádoba na vodík [36]

5. Nově vyvíjené technologie

5.1. Využití supravodivé cívky

5.1.1. Popis

Objev supravodivosti se datuje do roku 1911 nizozemským fyzikem Heike Kamerlingh Onnsem. Ten zkoumal vlastnosti látek při teplotách blízcích se absolutní nule, to je $-273,15^{\circ}\text{C}$ či 0K. Při pokusech se rtuť došlo ke skokovému poklesu odporu vůči stejnosměrnému proudu na neměřitelnou úroveň a proud obíhal v odpojené smyčce rtuťi ještě týdny po odpojení od zdroje proudu. K tomu došlo při teplotě 4,2K, Později bylo dosaženo supravodivosti u více materiálů při podobně nízkých teplotách, a u některých materiálů i při teplotách okolo 70K. Jev byl objasněn až v roce 1957 vědci Bardeenem, Cooprem a Schriefferem. Výsledkem jejich práce bylo objasnění nízkoteplotní, též konvenční, supravodivosti, která spočívá v párování elektronů, kteréžto dvojice pak mají pouze jeden kvantový stav a získají schopnost pohybovat se látkou bez odporu a vypuzovat vnější magnetické pole. Jev supravodivosti při 70K, vysokoteplotní supravodivosti, se dodnes nepodařilo objasnit. V laboratorním prostředí se již podařilo dosáhnout supravodivosti i za pokojové teploty, avšak šlo pouze o krátkodobý nestabilní jev. Příklady konvenčních supravodičů jsou rtuť, olovo, cín indium, pro vysokoteplotní supravodiče pak sloučeniny kovů, slitiny a některé druhy keramiky. [8, 10, 16]

5.1.2. Princip

Základ pro akumulaci elektrické energie s využitím supravodivosti je cívka. Cívka vhodného materiálu po dostatečném ochlazení na supravodivý stav, se nabudí stejnosměrným proudem, který vytvoří magnetické pole v okolí cívky. Následně je zdroj proudu odpojen, ale díky supravodivosti cívkou proud protéká stále a stále udržuje magnetické pole. Velikost akumulované energie v magnetickém poli se určí vzorcem

$$E = \frac{L \cdot I^2}{2} \text{ (vzorec 10)}$$

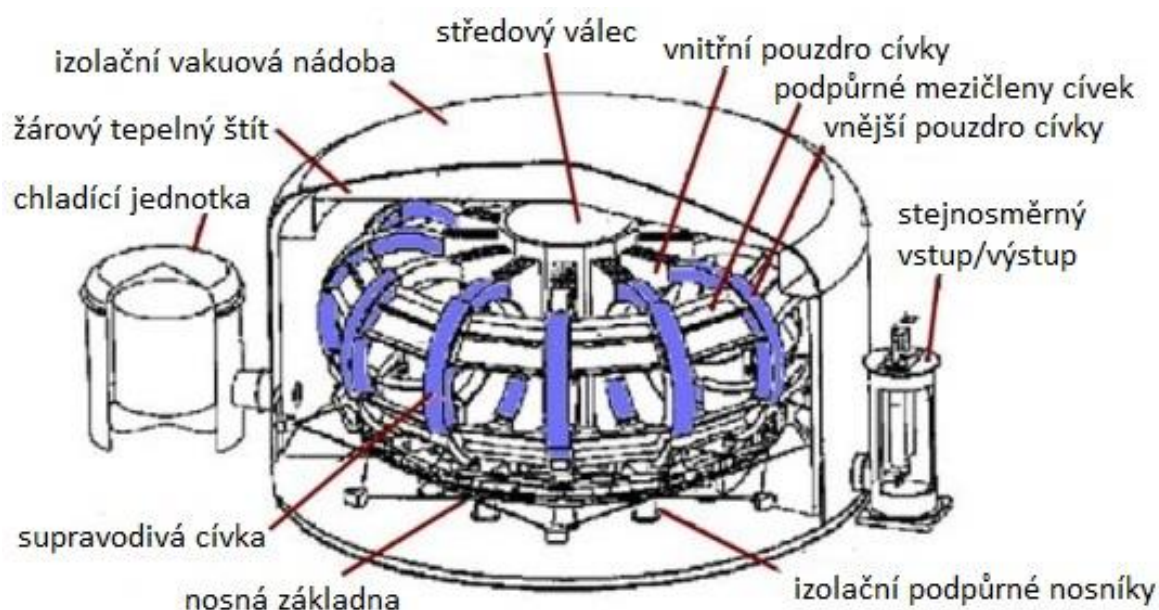
Kde je

E – energie (J)

L – indukčnost cívky (H)

I – procházející proud (A)

Cívka musí být dobře tepelně izolována od okolí, aby se udržel supravodivý stav. Celé zařízení je proto vybaveno kryogenickou jednotkou udržující nízkou teplotu. Dále jsou pak přítomny prvky řízení nabíjení a vybíjení, tvořené polovodičovým usměrňovačem a střídačem. Celková účinnost takového zařízení pro akumulaci elektrické energie přesahuje až 95%. [8, 10, 16]



Obr. 22: nákres akumulátoru využívajícího supravodivou cívku

5.1.3. Souhrnné hodnocení

Technologie je zatím ve stádiu zkoušení prototypů a jejich experimentálního nasazení, které má za úkol ověřit možnost technologie. Zjištěné výhody jsou podobného charakteru jako u setrvačnicků či kondenzátorů, možnost rychlého nabíjení a vybíjení, velice krátká reakční doba až v řádu mikrosekund, a vysoké dosažitelné výkony. Pokud ověření technologie dopadne dobře, lze očekávat snahu o navyšování výkonů a kapacit až na úroveň dnešních přečerpávacích elektráren. [8, 10, 16]

5.2. Uložení energie do vlaku

5.2.1. Popis

Jde o technologii využívající stejný princip jako přečerpávací vodní elektrárny, rozdíl je však v použitém ukládacím médiu. Zatím co vodní přečerpávací elektrárny ukládají elektrickou energii do potenciální energie tím, že vypumpují vodu z níže položené nádrže do výše položené nádrže, tento systém využívá těžké vlakové soupravy, které lokomotivy vyvezou po nakloněné rovině na kopec. Nejde o nijak převratnou technologii, ale o využití stávající technologie novým způsobem. [17,18]



Obr. 23: první prototyp zařízení ARES ověřující funkčnost [17]

5.2.2. Princip

Při přebytku elektrické energie bude vlaková souprava těžkých vagonů vytažena na kopec elektrickými lokomotivami. Při poptávce, v období špičkové spotřeby, se lokomotivy přepnou do generátorového režimu a gravitační síla dodá pohybovou energii pro zpětnou výrobu elektrické energie. Úroveň akumulované energie se určí vztahem [17,18]

$$E = h \cdot m \cdot g \text{ (vzorec 11)}$$

Kde je

E – akumulovaná energie (J)

h – výškový rozdíl překonání vlakovou soupravou (m)

m - hmotnost vlakové soupravy (m)

g – gravitační konstanta (m/s^2)

5.2.3. Souhrnné hodnocení

Projekt zabývající se zkoumáním tohoto typu ukládání energie, se nazývá ARES (Advanced rail energy storage) a vzniká v Nevadě. Má již za sebou etapu ověřující možnosti v malém měřítku a tento rok vstupuje do fáze vybudování zkušební tratě s využitelnými parametry pro regulaci rozvodné sítě. Konstrukční parametry stavěné zkušební tratě jsou délka 8,8km při průměrném stoupání 7% a výškovým rozdílem 610 metrů, vlaková souprava složená ze dvou lokomotiv a sedmi zatěžovacích vagonů o celkové hmotnosti 9280 tun. Elektrické parametry jsou odběr 56,7MW při ukládání energie a výroba 44,1MW s možností akumulovat až 12,5MWh elektrické energie při celkové účinnosti 80%. Zároveň projekt slibuje, že tato forma ukládání by měla být na vybudování výrazně levnější než přečerpávací vodní elektrárny a to až na úrovni 60% při stejných výkonech a možnostech akumulace. Pokud se tato technologie osvědčí, mohla by být alternativou přečerpávacích vodních elektráren hlavně v oblastech s nedostatkem vody. Technologie „energetického vlaku“ vypadá slibně především tím, že uplatňuje a využívá známé principy a techniku, a není tudíž zapotřebí složitého a zdlouhavého výzkumu s nejasným koncem. [17,18]



Obr. 24: grafické znázornění dokončené současné fáze projektu ARES [37]

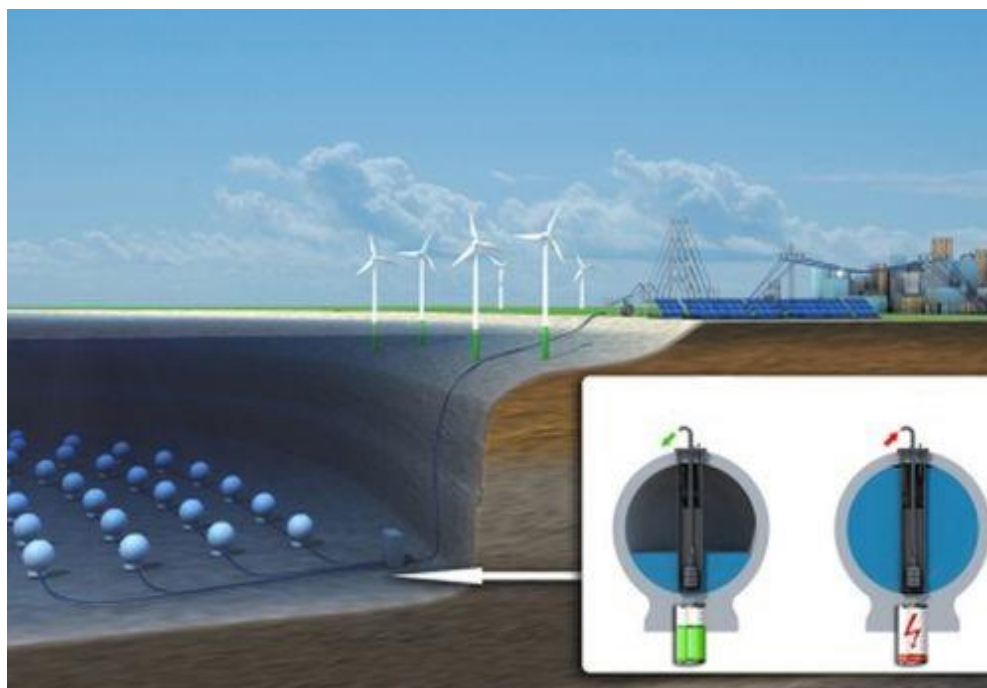
5.3. Vyvíjené inovace známých principů

5.3.1. akumulace do stlačeného vzduchu

Na stejném principu, na jakém pracuje tlakovzdušná akumulární elektrárna, probíhá i vývoj, při kterém se stlačený vzduch vhání do velkých balónů umístěných na mořském dně. Vodní sloupec působící svou vahou na balón, který je napumpovaný vzduchem o tlaku kompenzujícím toto zatížení. Tato technologie bude využívána v kombinaci s mořskými větrnými parky tak, aby bylo možná regulovat příkon do rozvodné sítě přímo u zdroje. Odhaduje se, že takto ukotvené balóny o průměru 230m v hloubce 500m by dokázaly akumulovat až 500MWh elektrické energie. [4]

5.3.2. Akumulace přečerpáváním vody

Velmi podobný návrh, vycházející však z vodní přečerpávací elektrárny, je založen taktéž na objektech umístěných na mořské dno. V tomto konceptu však figuruje masivní betonová koule. Při potřebě výroby elektrické energie se koule pod vysokým tlakem u mořského dna napouští vodou přes turbínu, přičemž okolní mořská voda funguje jako výše položená nádrž tradiční přečerpávací elektrárny, a generátor propojený s turbínou generuje elektřinu. Naopak při potřebě spotřeby energie se voda vypumpovává z koule ven. Očekávaný výkon je 20MW na jednu betonovou jednotku. [20]



Obr. 26: betonové koule na mořském dně využívané pro akumulaci elektrické energie přečerpáváním [20]

6. Závěr

Při vypracovávání této práce jsem se snažil čerpat z více zdrojů, abych si mohl utvořit jasnou představu o výhodách a nevýhodách každé technologie, a získaná fakta jsem spojil do informačně hodnotného textu. Mým cílem bylo, aby i člověk neznalý této problematice pochopil základní principy technologií.

Ze zpracovaných technologií pro akumulaci bych za nejperspektivnější odhadl technologie adiabatické tlakovzdušné akumulární elektrárny, setrvačnick, a využívání potenciální energie těžkotonážního vlaku. Hlavně první dvě technologie jsou dobře využitelné i pro hustě osídlené území Evropy, kde setrvačnickové moduly mohou být umístěny i přímo ve městech, a adiabatickou akumulaci lze využít u vytěžených důlních komplexů a slují.

Především v Evropě, je otázka jakým směrem se bude ubírat regulace v rozvodné síti velice důležitá. Některé státy chtějí upustit od výroby elektrické energie v jaderných elektrárnách a nahradit jejich výkon obnovitelnými zdroji, především pak větrnou energií a fotovoltaikou. Tyto zdroje jsou však velice nestále a na jejich výkyvy je třeba rozvodnou síť připravit jak pro nárazový vzrůst výroby, tak pro její nárazový pokles v průběhu dne. Osobně jsem zastáncem jádra a myslím si, že není dobré nahrazovat takové velké a stále zdroje energie nepředvídatelnými zdroji, a že by tyto zdroje měli hrát úlohu spíše v nahrazování starších dosluhujících uhelných elektrárnách a jako doplňkové zdroje pro akumulární systémy, které pak následně budou sloužit pro vykrývání kolísavosti spotřeby.

7. Seznamy zdrojů

- [1] – Vobořil, David, www.oenergetice.cz [online] publikováno 3. 1. 2017 [citováno 11. 3. 2017] dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrarny-cr/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice/>
- [2] - http://www.physics.muni.cz/~blazkova/dp/Alternativni_zdroje1.htm [citováno dne 11. 3. 2017]
- [3] – Ing. Kabeš, Karel, <http://www.odbornecasopisy.cz> [online] publikováno červen 2011 [citováno 13. 5. 2017] dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43684.pdf> včetně obr. 7
- [4] – Jančar Rost'a, <http://technet.idnes.cz> [online] publikováno 9. 11. 2009 [citováno 13. 5. 2017] dostupné z: http://technet.idnes.cz/cez-zkouma-skladovani-elektriny-pod-zemi-podivejte-se-jak-to-funguje-1jd-/tec_technika.aspx?c=A091022_140139_tec_technika_rja
- [5] – Tůma, Jan, <http://www.technickytydenik.cz> [online] publikováno 1. 1. 2006 [citováno 13. 5. 2017] dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/velkokapacitni-zasobniky-spolehlive-uskladni-prebytky-elektriny_17387.html
- [6] – blog serveru <http://forschung-energiespeicher.info> [online] publikováno 18. 10. 2016 [citováno 13. 5. 2017] dostupné z: <http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelansicht/95/DruckluftstattPumpspeicher/>
- [7] – článek portálu Ekodům, www.ekodum.cz [online], citováno dne 14. 5. 2017, dostupné z <http://www.ekodum.cz/podpzar/akumulat/mechakum.php>
- [8] blog serveru ČEZ, www.ces.cz [online] citováno dne 13. 5. 2017, dostupné z https://www.ces.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html
- [9] – Ing. Dvořák, Petr, <http://oze.tzb-info.cz> [online] publikováno 9. 5. 2011 [citováno 15. 5. 2017] dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>
- [10] – Ing. Mareš, Jan, prof. Ing. Libra CSc, Martin, Ing. Poutek CSc, Vladislav, <http://www.odbornecasopisy.cz> [online] publikováno únor 2011 [citováno 20. 5. 2017] dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42869.pdf>
- [11] – Tůma, Jan, www.3pol.cz [online] publikováno 2. 1 2012 [citováno 20. 5. 2017] dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/obnovitelne-zdroje/998-precerpavaci-elektrarny-pod-vrcholky-alp>

- [12] – Mastný, Gabriel, www.itnetwork.cz [online] publikováno 25. 11. 2017 [citováno 20. 5. 2017] dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/zpravodajstvi/hardware/zprava-technologie-baterie>
- [13] – Černý, Michal, www.robodoupe.cz [online] publikováno dne 29. 9. 2014 [citováno dne 20. 5. 2017] dostupné z: <http://robodoupe.cz/2014/superkapacitory-misto-akumulatoru/> včetně obr. 19
- [14] – Budín, Jan, www.oenergetice.cz [online] publikováno 6. 5. 2017 [citováno 20. 5. 2017] dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/technologicky-plan-v-oblasti-akumulace-energie/>
- [15] – Dlouhý, Petr, Janík, Luděk, www.hytep.cz [online] publikováno 17. 5. 2007 [citováno 20. 5. 2017] dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>
- [16] – Molek, Tomáš, www.oenergetice.cz [online] publikováno 5. 10. 2015 [citováno 21. 5. 2017] dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/supravodivost-princip-a-vyuziti/> včetně obr. 22
- [17] – Molek, Tomáš, www.oenergetice.cz [online] publikováno 6. 5. 2016 [citováno 21. 5. 2017] dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/zeleznice-jako-uloziste-energie-budoucnosti/> včetně obr. 23
- [18] - <http://www.aresnorthamerica.com> [online] publikováno 2017 [citováno 21. 5. 2017] dostupné z: <http://www.aresnorthamerica.com/about-ares-north-america>
- [19] – Vlášková, Klára, www.nalezno.cz [online] publikováno 28. 6. 2010 [citováno 11. 3. 2017] dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/elektrina-vite-kdy-spotrebovavame-nejvic.aspx> včetně obr 1, 2
- [20] – portál www.solarninovinky.cz [online] publikováno 1. 9. 2016 [citováno 31. 5. 2017] dostupné z: <http://www.solarninovinky.cz/?akumulace/2016090102/bude-se-elektrina-nakonec-skladovat-v-nadrzich-pod-vodou> včetně obr. 26
- [21] – obr. 3: http://technet.idnes.cz/jak-funguje-temelin-byli-jsme-primo-v-srdci-reaktoru-f9n-tec_reportaze.aspx?c=A070417_135542_tec_technika_rja dne 11. 3. 2017
- [22] – obr. 4: <http://www.nazeleno.cz/energie/vetna-energie/mala-vetna-elektrarna-v-praxi-kolik-vydela.aspx> dne 11. 3. 2017
- [23] – obr. 5, 6: http://www.casopisstavebnictvi.cz/sedmy-div-ceske-republiky_N435 dne 11. 3. 2017

- [24] – Ing. Ph. D. Radil, Lukáš, <http://www.odbornecasopisy.cz> [online] publikováno 16. 3. 2016 [citováno 1. 6. 2017] dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/data-ftp-user/konference/2016/Energie_pro_budoucnost_AMPER_2016/08-RADIL.pdf
- [25] – obr. 8: http://www.solarninovinky.cz/?akumulace/2015042301/nova-setrvacnikova-baterie-muze-zpusobit-prulom-ve-skladovani-elektriny_dne_13_5_2017
- [26] – obr. 9, 18: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/edf-zacala-pracovat-projektu-smart-grids-se-setrvacniky/> dne 15. 5. 2017
- [27] – obr. 10: <https://im9.cz/iR/importprodukt-orig/441/4410160e7b6d6ed846e49c7e6d49d3e7.jpg> dne 5. 5. 2017
- [28] – obr. 11: http://www.repasebaterii.cz/files/img/prumysl/_640x480/n-600aak.jpg dne 15. 5. 2017
- [29] – obr. 12: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2014_26_jyr.php dne 15. 5. 2017
- [30] – obr. 13: http://static3.tme.eu/products_pics/4/7/b/47ba327b57be22b98eee0e5dc3e14711/12715.jpg dne 16. 5. 2017
- [31] – obr. 14: <http://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/6710-superkondenzatory> dne 20. 5. 2017
- [32] – obr. 15: <http://www.zsletohrad.cz/eu/chemie/foto/pokus10/foto5.jpg> dne 20. 5. 2017
- [33] – obr. 16: www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42869.pdf dne 20. 5. 2017
- [34] – obr. 17: <http://www.hybrid.cz/i/auto/Escondido-bateriove-uloziste-baterie-kalifornie.jpg> dne 20. 5. 2017
- [35] – obr. 20: http://oenergetice.cz/wp-content/uploads/2015/05/01_dlouhe_strane.jpg dne 20. 5. 2017
- [36] – obr. 21: <http://oenergetice.cz/elektrina/australie-norsko-se-predhaneji-naplneni-japonske-vodikove-vize/> dne 20. 5. 2017
- [37] – obr. 24: http://s3.amazonaws.com/siteninja/multitenant/assets/20773/files/original/NV_artist_rendering-1000.jpg dne 21. 5. 2017
- [38] – obr. 25: <http://www.solarninovinky.cz/admin/editor/upload/1448318738-b64-s-r-o.jpg> dne 31. 5. 2017