



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

Akumulace elektrické energie v elektrizačních soustavách

Energy Storage in Electrification Systems

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika, management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Jan Švec, Ph.D.

Daniel Jirát
Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Jiráť Jméno: Daniel Osobní číslo: 435025
Fakulta/ústav: Fakulta elektrotechnická
Zadávající katedra/ústav: Katedra elektroenergetiky
Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Akumulace elektrické energie v elektrizačních soustavách

Název bakalářské práce anglicky:

Energy Storage in Electrification Systems

Pokyny pro vypracování:

1. Vysvětlíte důvody pro využití systémů s akumulací el. energie v ES v souvislosti se změnami v sítích.
2. Popíšete principy hlavních technologií akumulace el. energie.
3. Zanalyzujete výhody a nevýhody některých akumulčních systémů v ES.
4. Zhodnotíte přínosy vybraných aplikací na provoz sítí.

Seznam doporučené literatury:

- [1] CIGRE Working group C8.15: Electric Energy Storage Systems. Technical brochure. 2011
- [2] Weedy, B.M. et. al.: Electric Power Systems. Wiley, 2012
- [3] CIRED international conference proceedings

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Švec Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 03.01.2017 Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze, 26.5.2017

.....
Daniel Jirát

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu této práce panu Ing. Janu Šveci Ph.D. za jeho věnovaný čas, připomínky a odbornou pomoc. Díky také patří mému blízkému okolí za psychickou podporu během celé doby mého studia.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá možnostmi využití akumulčních systémů v elektrizační soustavě pro řešení nastávajících změn. V první části jsou popsány probíhající změny v elektrizační soustavě a vize podoby sítě v budoucnu. Ve druhé části jsou představeny dostupné akumulční technologie rozdělené dle druhu přeměny energie. Třetí část představuje možnosti využití akumulčních systémů pro zlepšení parametrů elektrizační soustavy. Závěrečná část uvažuje využití některých akumulčních systémů pro vybrané aplikace na různých napěťových hladinách s ukázkou již fungujících projektů.

Klíčová slova

Akumulace energie, akumulční systém, elektrizační soustava, ukládání energie

Abstract

The bachelor thesis deals with possibilities of utilization of storage systems in the electrification system for the solution of the forthcoming changes. The first part describes the ongoing changes in the electricity system and its vision in the future. The second part presents available storage technologies divided by the type of energy conversion. The third part is the use of storage systems to improve the parameters of the power system. The final part considers the use of some accumulation systems for selected applications at different voltage levels with the demonstration of already functioning projects.

Key words

Accumulation of energy, storage system, electrification system, energy storage

Obsah

1. ÚVOD.....	- 3 -
1.1. ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA	- 4 -
1.2. INTELIGENTNÍ SÍŤ	- 5 -
2. TECHNOLOGIE AKUMULAČNÍCH SYSTÉMŮ.....	- 7 -
2.1. ELEKTRICKÉ SYSTÉMY	- 7 -
2.1.1. Super-kondenzátory (DLC).....	- 7 -
2.1.2. Supravodivý magnetický akumulační systém (SMES).....	- 8 -
2.2. ELEKTROCHEMICKÉ SYSTÉMY	- 9 -
2.2.1. Standartní akumulátory.....	- 9 -
2.2.2. Li-ion akumulátory (Li-ion)	- 10 -
2.2.3. Nikl-kadmiové akumulátory (NiCd)	- 11 -
2.2.4. Olověné akumulátory (Pb).....	- 11 -
2.2.5. Sodíkovo-sírový (Na-S).....	- 12 -
2.2.6. Metal-vzduchové akumulátory (Metal-air)	- 13 -
2.2.7. (Redox) Flow battery (RFB).....	- 14 -
2.3. MECHANICKÉ SYSTÉMY.....	- 15 -
2.3.1. Přecherčovací vodní elektrárna (PVE)	- 15 -
2.3.2. Setrvačnick (FESS)	- 16 -
2.3.3. Skladování energie stlačeným vzduchem (CAES).....	- 17 -
2.4. CHEMICKÉ SYSTÉMY	- 19 -
2.4.1. Vodík (H ₂)	- 19 -
2.4.2. Syntetický zemní plyn (SNG).....	- 20 -
2.5. TEPELNÉ SYSTÉMY	- 20 -
3. SLUŽBY AKUMULAČNÍCH SYSTÉMŮ	- 21 -
3.1. POKRÝVÁNÍ VÝKONOVÝCH ŠPIČEK.....	- 21 -
3.2. REGULACE FREKVENCE	- 21 -
3.3. DISTRIBUOVANÁ AKUMULACE U VĚTRNÝCH FAREM.....	- 22 -
3.4. PODPORA ES	- 23 -

3.5. RAMPOVÁ KONTROLA	- 23 -
3.6. INTEGRACE MALÝCH DECENTRALIZOVANÝCH ZDROJŮ	- 24 -
3.7. KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	- 24 -
3.8. UPS A BLACK-START	- 24 -
3.9. ELEKTROMOBILITA.....	- 25 -
4. POROVNÁNÍ.....	- 25 -
4.1. AKUMULAČNÍ SYSTÉMY V NÍZKONAPĚŤOVÉ DISTRIBUČNÍ SÍTI	- 30 -
4.1.1. Integrace malých decentralizovaných zdrojů	- 30 -
4.1.2. Kvalita elektrické energie.....	- 31 -
4.1.3. DC mikrosítě a elektromobilita	- 32 -
4.2. AKUMULACE NA STRANĚ VYSOKÉHO A VELMI VYSOKÉHO NAPĚTÍ	- 33 -
4.2.1. Pokrývání výkonových špiček.....	- 33 -
4.2.2. Regulace frekvence.....	- 35 -
4.3. POROVNÁNÍ CELOSVĚTOVÉHO ZASTOUPENÍ AKUMULAČNÍCH SYSTÉMŮ	- 39 -
5. ZÁVĚR	- 41 -
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	- 43 -
7. SEZNAM OBRÁZKŮ	- 44 -
8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	- 45 -
9. SEZNAM TABULEK.....	- 45 -

1. Úvod

Celosvětová spotřeba elektrické energie stále narůstá a s tím vzrůstá i instalovaný výkon elektráren. V dobách minulých se jednalo především o elektrárny tepelné a jaderné, tedy výrobu energie z fosilních paliv, kterých je na zemi jen omezené množství. Jedním ze směrů pro oddálení nedostatku fosilních paliv je například vyvinutí efektivnějšího jaderného reaktoru, což umožní získání většího množství energie z uranu, ale v konečném důsledku nevyřeší problém s budoucím nedostatkem fosilních paliv. Předpokládaným řešením problému jsou fotovoltaické (sluneční), vodní, větrné a jiné typy elektráren společně tvořících skupinu takzvaných obnovitelných zdrojů energie (OZE). Je zřejmé, že obnovitelné zdroje zatím nemohou nahradit celkovou výrobu elektrické energie a tepla, které jsou dnes získávány z tepelných nebo jaderných elektráren, ale mohou výrazně snížit těžbu fosilních paliv a díky své variabilitě přivést elektřinu do míst, kam by se elektřinu z velkých elektráren ekonomicky nevyplatilo zavádět.

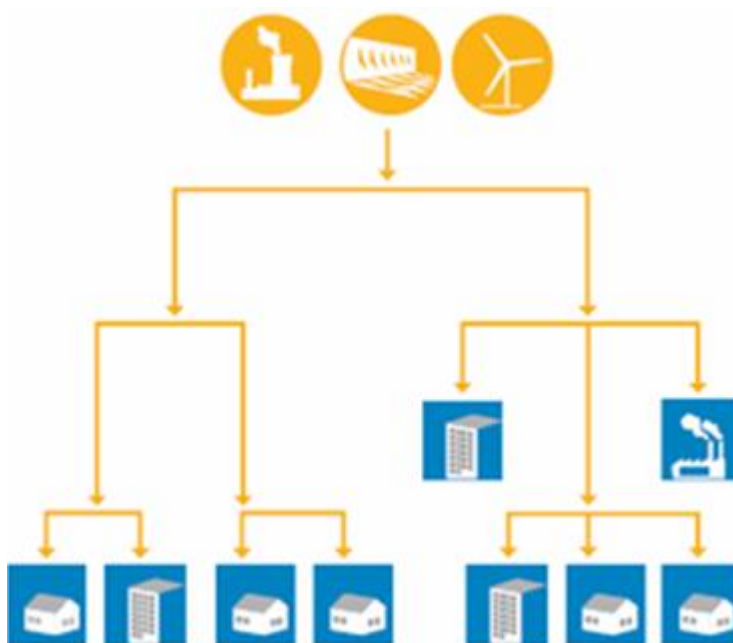
Připojených míst do elektrizační soustavy jsou miliony a každé místo potřebuje jiný objem energie v jinou dobu. Díky tomu vzniká nestálá poptávka po elektřině, což nutí elektrárny regulovat svou výrobu tak, aby bylo dostupné tolik energie kolik se spotřebuje. Regulace výkonu velkých elektráren je velmi obtížná a omezená, například uhelná elektrárna najíždí na plný výkon skoro půl dne, jaderná elektrárna přes týden. U větrných či fotovoltaických elektráren je problém nerovnoměrné výroby kvůli různé intenzitě větru a svitu. V rámci problematiky je součástí řešení právě akumulace přebytečné energie v dobách jejího přebytku pro následné využití v dobách nedostatku, čímž jsou vyrovnávány špičky v odběrech a celkově zlepšovány podmínky v síti. V ostrovním režimu je akumulace téměř nezbytnou nutností kvůli efektivitě celého systému.

Za poslední století bylo vynalezeno mnoho druhů akumulace elektrické energie. Skladování čisté elektřiny je velmi obtížné, proto většina systémů využívá přeměny elektřiny na jinou formu, ve které ji lze efektivněji uskladnit a v případě potřeby znovu přeměnit zpět na energii elektrickou. Samotné technologie se liší v kapacitě a velikosti, v účinnosti přeměny či době odezvy a také v době po kterou jsou schopny uschovat naakumulovanou energii s přijatelnými ztrátami. Ty nejvýznamnější a potenciálně využitelné budou v rámci této práce porovnány z hlediska využitelnosti pro elektrizační soustavu a práce v mikrosítích.

1.1. Elektrizační soustava

Ještě, než si řekneme o možných výhodách akumulačních systémů pro budoucnost, je třeba říci, jakou činnost plní elektrizační soustava, jakou má podobu a proč je potřeba začít využívat akumulaci, když do teď nebyla zdánlivě potřeba.

Najdeme mnoho způsobů, jak definovat elektrizační soustavu. Jednou z možných definic může být, že elektrizační soustava (ES) je celek složený z přenosové soustavy a distribuční soustavy. Přenosová soustava (páteřní část celé ES) provozovaná na napětových hladinách 400 kV a 220 kV zajišťuje přenos elektřiny po celém území České republiky a zároveň je součástí mezinárodního propojení Evropy. Distribuční soustava je napájena z přenosové soustavy a jedná se o hladiny 110 kV a nižší, nejčastěji potom 22kV, 10 kV a u konečného odběratele 0,4 kV. V obecném schéma (Obr. 1) se výroba energie nachází na začátku přenosové soustavy, pomocí které je přes řadu transformátorů a vedení přenášena energie k zákazníkům, ať továrnám na vysokonapětové části distribuční soustavy nebo k domácnostem na nízkonapětové části.



Obr. 1 - Schéma klasické elektrizační soustavy

Tento model začíná být v posledním desetiletí nevyhovující, jelikož se objevuje právě spousta malých OZE připojovaných do distribuční soustavy. To způsobuje řadu aspektů namáhajících soustavu. Příkladem můžou být fotovoltaické a větrné elektrárny, které jsou velmi závislé na počasí. Elektrárna tedy vyrábí, avšak jelikož po obloze běhají mraky, nemá konstantní výkon a vlivem této nerovnoměrné

dodávky dochází ve vedení k fluktuacím výkonových toků, totéž platí pro větrnou elektrárnu a vítr. V celorepublikovém měřítku se jedná o obrovské neřiditelné toky. Řešením je vhodně zvolená akumulace, kdy mám nastavený požadovaný výstupní výkon, a nedostatky energie ze zdroje dodává akumulací systém a přebytky do sebe naopak ukládá.

Na podobném principu fungují i velké akumulací systémy v ES. Jednou z podmínek ideální soustavy je, je-li výroba energie stejná jako odběr neboli když nabídka přesně pokrývá poptávku. Při takovémto stavu je soustava vyvážená a stabilní. Při přebytku energie se začne systém nabíjet a energii uschovávat. V dobách nedostatku energii vrací. Je-li doba mezi nabitím a vybíjením krátká a systém vhodně navržen, dostáváme zpět energii s minimálními ztrátami. Typickým příkladem může být čas mezi pátou a osmou hodinou ranní, kdy v pět hodin většina obyvatel spí, v půl sedmé zapíná rychlovarné konvice a v osm hodin zapíná všechny pracovní elektrické stroje. Z pohledu ES jde o obrovskou špičku, jejíž část je možné pokrýt naakumulovanou energií.

Většinu času je ovšem soustava nevyvážená a vznikají jevy jako například přepětí, změny odchylky od síťové frekvence a jiné. Snahou provozovatele sítě je tyto vlivy potlačovat pomocí různých podpůrných prostředků. Jelikož se ovšem jedná o změny velmi dynamické, není vhodné jejich potlačování provádět přímo u velkých elektráren, jako jsou například jaderné či tepelné elektrárny. Ty mají totiž velmi dlouhé doby odezvy a změna jejich výstupních parametrů bývá obtížná a nákladná. Vhodnějším způsobem je regulace pomocí menších zdrojů elektrické energie s vyšší dynamikou řízení a také pomocí již zmíněné akumulace.

1.2. Inteligentní síť

Jak již bylo popsáno v předešlé kapitole, současná topologie ES začíná být nedostačující a bude muset být nalezeno nové řešení. Víze budoucí sítě je vidět na Obr. 2, jedná se o takzvaný „Smart grid“ systém, česky řečeno inteligentní síť. Jejich podstatou je vzájemná komunikace všech objektů a ovládání proměnných veličin v reálném čase, proto budou jedním z nejdůležitějších prvků inteligentních sítí inteligentní čidla. Mezi hlavní znaky takovýchto sítí patří: plná automatizace, plná integrace zákazníků, adaptace a řízení různých způsobů výroby.



Obr. 2 - Topologie inteligentní sítě

Pod pojmem plné automatizace máme na mysli začlenění plně automatizovaného digitálního řídicího a kontrolního systému, který bude schopný zpracovávat obrovské množství dat ze senzorů monitorujících chování sítě v reálném čase. Takovýto systém by měl být schopen plynule řídit soustavu a v případech poruchy problém do maximální míry sám vyřešit a obnovit dodávky do postižené oblasti.

Podstatou plné integrace je vybavení zákazníků inteligentními čidly, která budou schopny odesílat a také přijímat informace v reálném čase. To umožní nejen distributorům lépe regulovat soustavu, ale samotným zákazníkům zlepšit efektivitu využívání elektrické energie.

Třetím znakem je zapojení a řízení různých druhů výroby. Zde se jedná o plnou integraci decentralizovaných zdrojů energie jako větrných elektráren, malých vodních nebo fotovoltaických elektráren na střeších rodinných domů.

Výsledkem je tedy síť, která je řízená pomocí jednoho systému, který komunikuje nejen s velkými elektrárnami, ale i se samotnými zákazníky, kteří se mohou chovat v různých dobách jako odběratelé nebo dodavatelé. Právě v inteligentních sítích se předpokládá, že samotný zákazník může v určitých chvílích poskytovat (prodávat) energii z OZE, avšak energii plně regulovanou, která nezpůsobuje zbytečné výkyvy. Ovšem jelikož můžou OZE vyrábět energii, která se díky počasí velmi dynamicky mění, nebyla by ani inteligentní síť schopná plně řídit toky energie a pokud ano, tak velmi neefektivně. Pro zvýšení efektivity je tak potřeba, aby se na straně zákazníka objevil akumulací systém, který bude snadno regulovatelný pomocí inteligentních senzorů a jehož výkon bude stabilní. Toto je pouze nutná podmínka pro OZE, avšak akumulace v těchto sítích nebude zastoupena jen jakožto malý systém pro

domácnost. Stejně jako v dnešních sítích budou i v budoucnu využívány velké systémy jakožto přečerpávací elektrárny, ale také velké bateriové systémy pro velmi rychlou regulaci.

Ani při dnešních možnostech počítačů si nelze představit jeden systém řídicí celou republiku. Nejen, že by musel zpracovávat Terabajty dat v reálném čase, ale při jeho poruše by mohlo dojít k úplnému blackoutu. Pravděpodobnějším řízením bude tedy řízení v rámci mikrosítí, které budou nadřazenému systému pouze předávat aktuální stav.

Mikrosíť je skupina propojených zařízení a distribuovaných zdrojů energie s definovanými elektrickými hranicemi, které se chovají jako jeden regulovatelný subjekt, který je schopen pracovat v režimu připojení k síti i v ostrovním provozu. Ostrovní provoz je tedy speciální mikrosíť, která nemá spojení s ES. Při ostrovních režimech je energie získávána právě z OZE, takže fungování bez akumulace je skoro nemožné.

2. Technologie akumulčních systémů

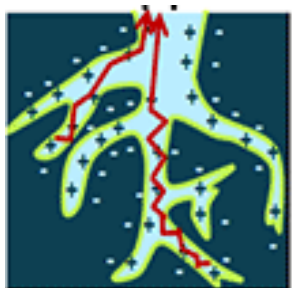
Za posledních více jak sto let byla vymyšlena spousta nejrůznějších možností skladování elektrické energie. V následujících kapitolách budou základně popsány technologie potenciálně využitelné pro ES, přičemž dle principu ukládání energie můžeme systémy rozdělit na metody ukládání pomocí elektrické, elektrochemické, mechanické, chemické a tepelné energie.

2.1. Elektrické systémy

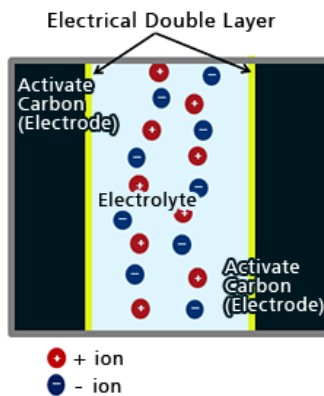
Ukládání čisté elektrické energie je velmi náročné, a to především kvůli velkým ztrátám v dlouhodobém hledisku. Pro běžné použití v elektronice se jedná například o kondenzátory, avšak pro využití pro velké výkony a delší časové úseky je prakticky nepoužitelná. Jediné technologie, které mají potenciál, jsou super-kondenzátory a supravodivý magnetický akumulční systém.

2.1.1. Super-kondenzátory (DLC)

Super-kondenzátory, anglicky formálně „Double-layer capacitors (DLC)“, jsou principiálně známi přes 50 let. Na rozdíl od klasických keramických či elektrolytických kondenzátorů, super-kondenzátory mají místo dielektrika elektrolytický roztok (obvykle hydroxid draselný nebo kyselinu sírovou). Ten je umístěn mezi dvě elektrody se speciální pórovitou strukturou vyrobenou z uhlíku (Obr. 3). Díky tomuto uspořádání vznikají dva kondenzátory (mezi každou elektrodou a elektrolytem) pomyslně zapojené do série (Obr. 4). Princip uložení energie je stejný jako u klasických kondenzátorů, avšak hlavní rozdíl je v efektivní využitelné ploše. Ta dosahuje díky kapalným elektrolytům a porézním elektrodám hodnot až stovek m^2g^{-1} . Výsledkem je možnost velmi rychlého nabíjení a vybíjení s více jak milionem cyklů.



Obr. 3 - Vnitřní struktura uhlíkové elektrody



Obr. 4 - Princip DLC

Díky absenci pohyblivých částí nevyžaduje téměř žádnou údržbu, zvládá práci ve velkém pásmu teplot a vlhkostních podmínkách. Samotná technologie stále vykazuje známky velkého potenciálu pro budoucí výzkum a použití.

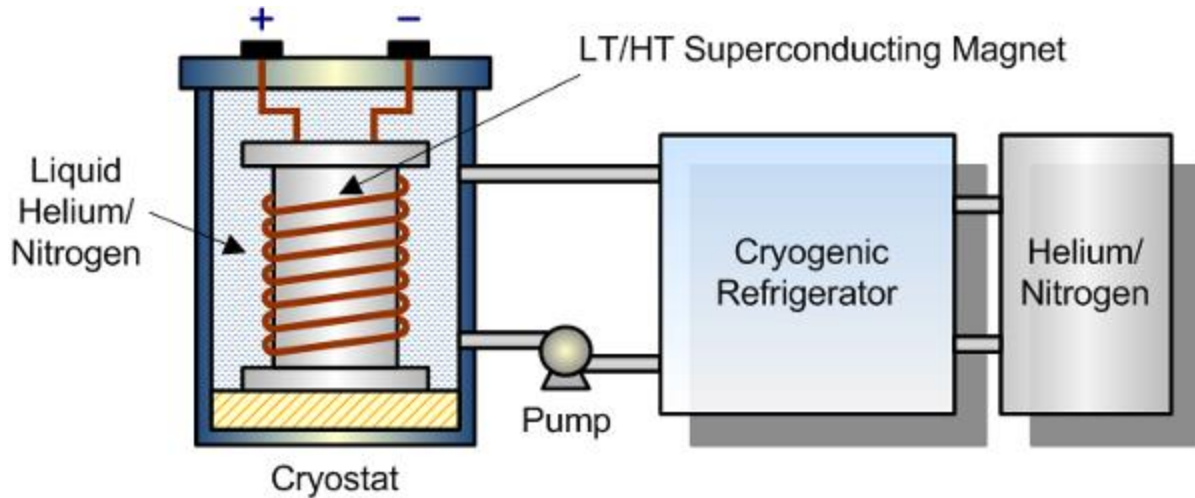
Tabulka 1 – Vlastnosti super-kondenzátor

Kapacita na článek [kWh]	Doba odezvy	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Vybíjecí doba	Efektivita [%]	Počet cyklů	Životnost [rok]
-	< sekundy	1 – 15	10 - 20	sekundy	85 - 98	10 ⁴ - 10 ⁵	4 - 12

2.1.2. Supravodivý magnetický akumulční systém (SMES)

Systém, anglicky „*Superconducting magnetic energy storage (SMES)*“, je založen na ukládání energie do supravodivých cívek. Metoda využívá skutečnosti, že proud v supravodivé cívce proudí i po odpojení od zdroje napětí, protože supravodič má zanedbatelný odpor. Energie je uložena v magnetickém poli vytvořeném prouděním stejnosměrného proudu v supravodivých cívkách, které jsou udržovány pod kritickými supravodivými teplotami. Jakmile je tedy systém plně nabit, lze jej odpojit od napájení a energii skladovat teoreticky nekonečně dlouho, prakticky je třeba udržovat systém v pracovních nízkých teplotách. Při objevení supravodivosti byla potřeba teploty kolem 4 K. Za posledních sto let dokázal výzkum posunout hranici až k 100 K pro vysokoteplotní supravodiče. I přes tento pokrok se tyto technologie stále neobejdou bez výkonných chladičích systémů. Výhodou jsou velmi rychlé odezvy v řádech milisekund a vysoký výstupní výkon. Nejvíce se hodí jako pohotovostní zdroj pro aplikace, při kterých je třeba překlenout dobu mezi přerušením dodávky energie a obnovením dodávky například z přečerpávací elektrárny. Na trhu se nevyskytuje velký počet systémů

pro běžné komerční využití. Ve velkých výzkumných centrech lze najít SMES ve velikostech okolo 10 MW.



Obr. 5 - Schéma supravodivého magnetického akumulčního systému

Tabulka 2 - Vlastnost supravodivého magnetického úložiště

Kapacita na článek [kWh]	Doba odezvy	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Vybíjecí doba	Efektivita [%]	Počet cyklů	Životnost [rok]
-	< sekundy	-	6	sekundy	75-85	-	-

2.2. Elektrochemické systémy

Energie se zde ukládá do formy chemické energie. Do této kategorie zahrnujeme všechny typy baterií. Ty lze rozdělit na primární a sekundární. Primární se objevily jako první a jedná se o baterie, jejichž funkce neumožňuje opětovné nabití. Jsou tedy po vybití určeny k ekologické likvidaci a nadále se jimi nebudeme v rámci práce zabývat. Sekundárním typem jsou baterie s možností cyklického nabíjení a vybíjení, které nazýváme akumulátory. Ty dělíme na standardní akumulátory a speciální typ zvaný anglicky „Flow battery“, o kterých více v odstavci 2.3.

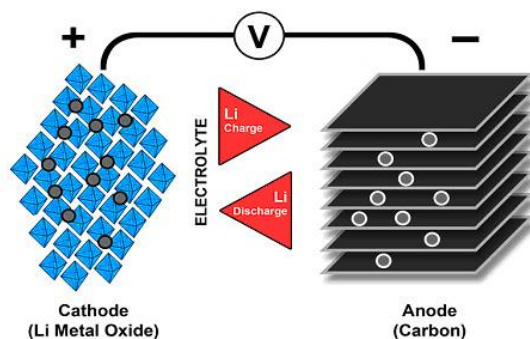
2.2.1. Standardní akumulátory

V běžném životě se setkáváme právě s akumulátory, kde k jejich nabíjení a vybíjení dochází mezi dvěma elektrodami v elektrolytu. Typickým příkladem je Li-ion akumulátor, který najdeme v každém mobilu či notebooku. Vlastnosti jsou mimo jiné dány velikostí článku. Velkých kapacit, kterých je

potřeba v akumulačních systémech pro ES, je dosahováno skládáním jednotlivých článků do bloků a bloků do výsledných stanic.

2.2.2. Li-ion akumulátory (Li-ion)

Jedná se aktuálně o nejdominantnější typ akumulátorů nacházejících se ve velké škále přenosných zařízení především díky vysoké hustotě energie, lehkosti a vysoké účinnosti. Lithium-ion baterie, podobně jako technologie na bázi olova či niklu, používají ke své funkci katodu (kladná elektroda),



Obr. 6 – Princip funkce Li- ion

anodu (záporná elektroda) a elektrolyt. Katoda je oxid vhodného kovu a anoda je vytvořena z porézního uhlíku. Lithium se zde nevyskytuje ve formě pevné části, ale jako ionty v elektrolytu, které při vybíjení putují od anody ke katodě a při nabíjení opačným směrem (Obr. 6).

Li-ion akumulátor je pojem, který zahrnuje všechny druhy akumulátorů na bázi lithia. Těchto druhů je celá řada a liší se především materiálem katody. Mezi nejpoužívanější se řadí Li-kobalt, Li-mangan, Li-fosfát a NMC, což je jedna z nejnovějších technologií skládajících se z Lithia-niklu-manganu-kobaltu.

Jedním z problémů je bezpečnost. Většina kovových elektrod je teplotně nestálých a při dlouhodobém používání se začíná vlivem teplot rozkládat. Tyto látky mohou časem reagovat s Lithiem a způsobovat zhoršení parametrů, v určitých případech dochází k úplnému zničení baterie a při některých extrémních případech může baterie i explodovat. Proto jsou tyto baterie většinou doplněny o bezpečnostní monitorovací prvky, které zhodnocují vstupní a výstupní veličiny.

Tabulka 3 - Vlastnosti Li-ion akumulátorů

Kapacita na článek [MWh]	Doba odezvy	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Vybíjecí doba	Efektivita [%]	Počet cyklů	Životnost [rok]
až 0,4	< sekundy	60 - 220	200 - 500	85 - 98	75-90	500 - 10 000	5 - 15

2.2.3. Nikl-kadmiové akumulátory (NiCd)

Typ baterie NiCd je znám již sto let. Akumulátor obsahuje Nikl hydroxid jako katodu, Kadmium hydroxid jako anodu a alkalický elektrolyt. Obvykle mají kovová pouzdra s pojistným samo těsnícím ventilem. Mají velmi malé hodnoty samovybíjení a poskytují stabilní parametry v širokém teplotním pásmu sahajícím až k teplotám okolo -40 °C. Problémem NiCd technologie je toxicita kadmia, což vzhledem k ekologickému hledisku klade velké požadavky na výrobu a recyklaci. Použití se téměř výhradně realizuje ve stacionárním provedení.

NiMH (Nikl-metal hydrid) akumulátory byli vyvinuty jako náhrada právě za NiCd baterie. Mají veškeré výhody původní technologie, až na jednu výjimku, kterou je zhruba deseti násobně menší kapacita. Jejich výkonová hustota vztažená na váhu je mezi bateriovými systémy jedna z nejlepších. Nacházejí využití v oblastech jako NiCd, ale i v elektromobilitě, kde jsou ovšem postupně vytlačovány Li-ion bateriemi přesto, že jsou bezpečnější než Li-ion.

Tabulka 4 - Vlastnosti akumulátorů na bázi niklu

Typ	Kapacita na článek [kWh]	Doba odezvy	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Vybíjecí doba	Efektivita [%]	Počet cyklů	Životnost [rok]
NiCd	až 1,56	< sekundy	30 - 45	80 - 110	hodiny	60 - 80	500 - 3000	3 - 20
NiMH	až 0,14	< sekundy	40 - 80	80 - 200	hodiny	60 - 75	600 - 1200	3 - 10

2.2.4. Olověné akumulátory (Pb)

Jedná se o první typ akumulátorů, který byl vynalezen. Akumulátor tvoří dvě olověné elektrody, ponořené do zředěné kyseliny sírové. Při nabíjení se tvoří kyselina sírová (H₂SO₄), elektrolyt houstne a na katodě se usazuje oxid olovičitý (PbO₂). Při vybíjení je proces přesně opačný, kyselina sírová se

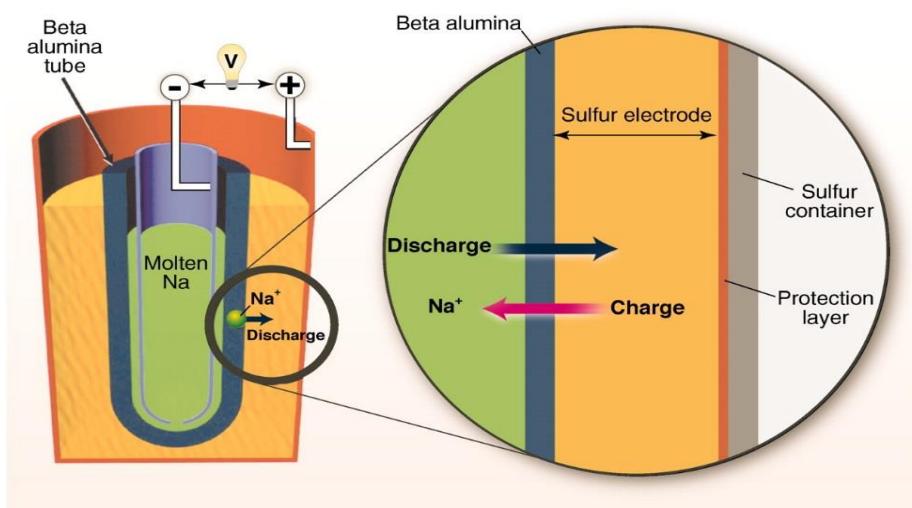
mění na síran olovnatý (PbSO_4) a čistou vodu. Ačkoliv má jednu z nejnižších poměrů energie ku hmotnosti a energie ku objemu, mohou poskytovat vysoké rázové proudy, čehož se například hojně využívá v automobilech, kdy startér potřebuje velký proud pro nastartování motor, ale po zbytek času pracuje alternátor a akumulátor je jen nabíjen.

Tabulka 5 - Olověných akumulátorů

Kapacita na článek [kWh]	Doba odezvy	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Vybíjecí doba	Efektivita [%]	Počet cyklů	Životnost [rok]
až 8	< sekundy	30-45	50 - 80	hodiny	75-90	250-1800	3 - 15

2.2.5. Sodíkovo-sírový (Na-S)

Sodíkovo-sírové akumulátory se skládají z roztaveného sodíku na katodě a roztavené síry na anodě (Obr. 7). Tyto elektrody jsou odděleny pomocí pevné beta hlinité keramiky, která působí jako elektrolyt. Provozní teplota baterie musí být mezi 300 °C až 350 °C, aby elektrody neztratili kapalnou formu. Při nabíjení či vybíjení je generováno teplo které stačí na udržení provozní teploty, avšak je-li baterie v nečinném stavu, je třeba dodávat tuto energii externě. Proto se se systémy konstruují jako velké kontejnery s desítkami baterií u sebe. Tím se zabrání zbytečným ztrátám tepla a zároveň se ušetří izolační materiál. V Japonsku jsou využívány především pro dlouhodobou dodávku energie, jelikož dokáží dodávat energii v rádech hodin a při každodenním používání vystačí teplo reakcí k vlastnímu provozu bez nutnosti dodatečného ohřevu akumulátoru.



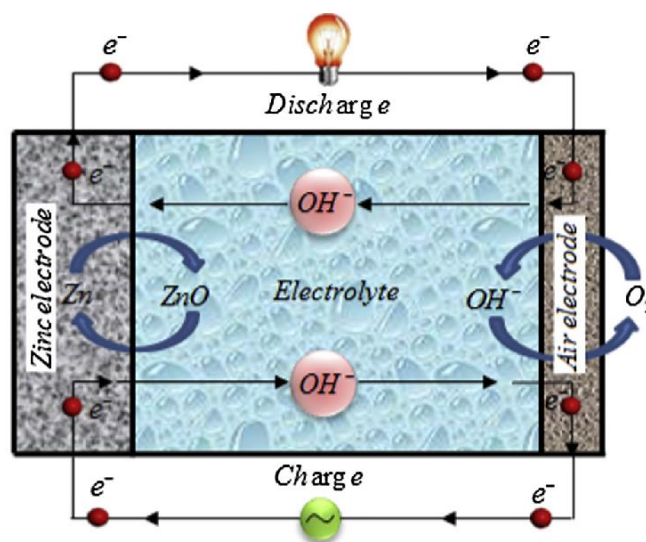
Obr. 7 - Řez sodíkovo-sírovým akumulátorem

Tabulka 6 - Vlastnosti Na-S akumulátorů

Kapacita na článek [MWh]	Doba odezvy	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Vybíjecí doba	Efektivita [%]	Počet cyklů	Životnost [rok]
až 0,4	< sekundy	100 - 250	150 - 300	hodiny	70 - 85	2500 - 4500	10 - 15

2.2.6. Metal-vzduchové akumulátory (Metal-air)

U tohoto elektrochemického typu baterie je anoda vyrobená z čistého kovu, katoda je připojena k nevyčerpatelnému přívodu vzduchu a mezi elektrodami je vhodný elektrolyt. Kvůli této podmínce se k chemické reakci využívají výhradně prvky běžně se vyskytující ve vzduchu. Mezi různými variacemi kov-vzduch by se nejlépe využila chemická reakce mezi Lithiem a vzduchem. Praktické použití Lithia znemožňuje bezpečnost, jelikož Lithium je značně hořlavé.



Obr. 8 - Princip funkce Zinek-vzduchové baterie

V praxi se využívá nejčastěji baterií se zinkem, které mají určité podobnostní znaky jako palivové baterie. Jejich výhodou je snadná kontrola reakce pomocí přívodního vzduchu, zinek zde slouží jako palivo ve formě elektrolytické pasty, která může být snadno nahraditelná. Ve výsledku se jedná o použití malého množství materiálu s velké měrnou energií, avšak tato technologie zatím nenašla širší uplatnění na trhu, zřejmě i díky nízké efektivitě 40-50 %. Pilotní projekt vznikl v USA v Arizoně, kde byl systém se zinkem použit pro ukládání energie z větrných a fotovoltaických elektráren od roku 2010 do roku 2013.

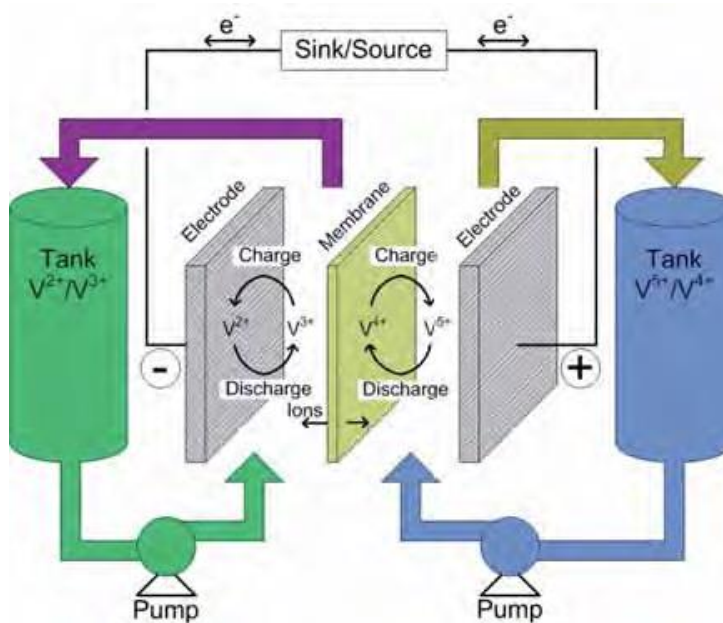
Tabulka 7 - Vlastnosti Zn-air

Kapacita na článek [MWh]	Doba odezvy	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Vybíjecí doba	Efektivita [%]	Počet cyklů	Životnost [rok]
až 0,1	< sekundy	130 - 200	130 -200	hodiny	50 - 70	-	-

2.2.7. (Redox) Flow battery (RFB)

Druhé typy akumulátorů jsou založené na principu uložení elektrické energie v látkách rozpustných v tekutině (elektrolyty). Tyto látky tvoří jednotlivé elektrody a jsou od sebe navzájem oddělené pomocí membrány. Tato technologie je podobná technologii palivového článku, jelikož zde probíhají dva chemické jevy, a to redukce a oxidace. Elektrolyty jsou většinou skladovány ve velkých zásobovacích tancích a samotná chemická reakce probíhá pouze v malém množství v rámci samotné baterie, kde je přímo převáděná reakce na elektrickou energii a naopak. Výkon je určený velikostí a návrhem baterie a celková kapacita závisí na velikosti tanků. Tyto technologie jsou používány, až na výjimky, jako stacionární. Jejich obecnou výhodou je možnost výměny elektrolytické látky za látku nabitou a okamžité získání elektřiny (například provoz dvou paralelních nádrží, kdy jedna je již nabitá).

Za dobu své existence bylo otestováno mnoho kombinací elektrolytů, avšak ne všechny byly vhodné nebo poskytovaly alespoň uspokojivou účinnost. Mezi používané kombinace se řadí Vanadové (VRB) a Zinek-Bromové baterie (ZnRB). Princip funkce bude demonstrován právě na VRB baterii. Ta využívá



Obr. 9 - Princip funkce VRB

V^{2+}/V^{3+} jako oxidační činidlo a V^{4+}/V^{5+} v mírném roztoku kyseliny sírové, jako redukční činidlo. Látky jsou navzájem odděleny membránou, v rámci které probíhá výměna iontů (Obr. 9)

Výhodou této technologie je využití stejných iontů stejného kovu na obou stranách. Pomocí membrány nelze zcela zabránit výměně iontů a v důsledku tohoto jevu vznikají ztráty. Avšak u VRFB nevznikají žádné další jevy jako u RFB používající elektrolyty různých prvků. U těch totiž dochází kvůli této výměně membránou k vzájemnému znečištění látek v důsledku čehož degradují a ztrácí kapacitu. Běžné pracovní teploty jsou od 10-40 °C.

Tabulka 8 - Vlastnosti vybraných Flow baterii

Typ	Kapacita na článek [kWh]	Doba odezvy	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Vybíjecí doba	Efektivita [%]	Počet cyklů	Životnost [rok]
VRB	-	sekundy	15 - 50	20 - 70	hodiny	60 - 75	> 10 000	5 - 20
ZnRB	-	sekundy	65- 75	60 -70	hodiny	68 -75	1000 - 3000	5 -10

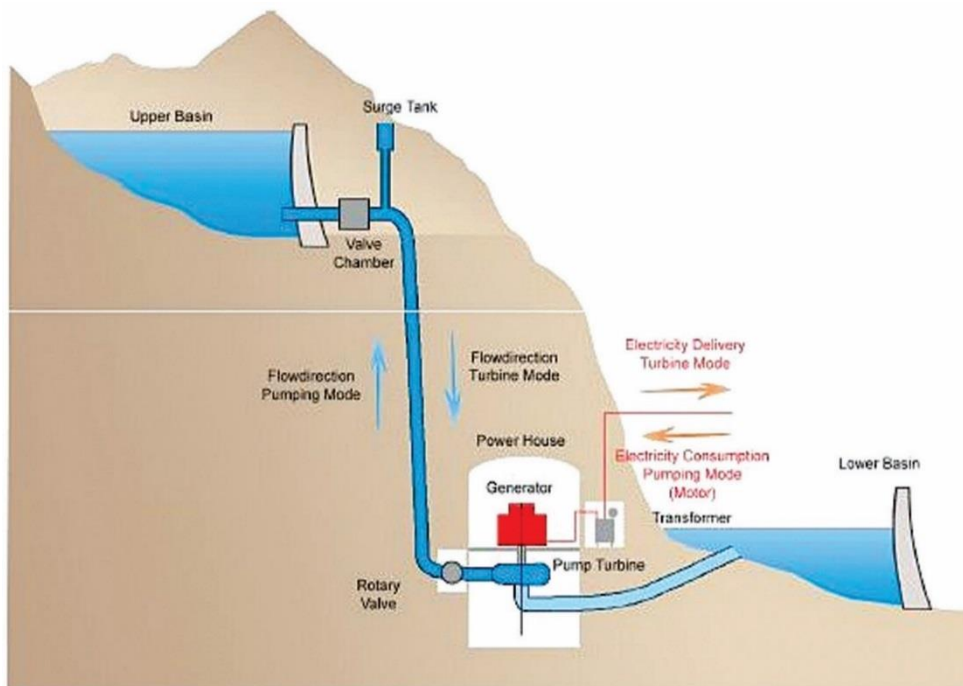
2.3. Mechanické systémy

Dá se považovat za nejjednodušší a nejlépe představitelné systémy. Elektrická energie se zde přeměňuje do kinetické nebo potenciální energie, nejčastěji pomocí motoru nebo pumpy a pro zpětný zisk energie se využívá generátorů.

2.3.1. Přecherpávací vodní elektrárna (PVE)

Jedná se o nejrozšířenější akumulární technologii pro ES na světě. Princip PVE využívá pro svou práci vodní turbínu doplněnou o generátor a dvě nádrže o různých geologických výškách (Obr. 10). V dnešních dobách je snaha vyrábět a modernizovat staré elektrárny tak, aby byly osazeny moderními turbínami, které jsou schopny pracovat i jako pumpy s generátory v motorickém chodu. Toto řešení umožňuje vynechání samostatného pohonu pro čerpání, což snižuje celkovou cenu projektů.

V období nedostatku energie voda z horní nádrže dopadá na lopatky turbíny a tím ji roztáčí. V době přebytku energie, kdy je proud levnější, pumpuje elektrárna vodu ze spodní nádrže do horní nádrže. Jedná se tedy o proces nabíjení. U horní nádrže bývá umístěna vyrovnávací věž, která kompenzuje tlaky. Významnou výhodou je velká možnost cyklického opakování a vysoká stabilita.



Obr. 10 - Princip funkce přečerpávací vodní elektrárny

Tabulka 9 - Vlastnosti přečerpávacích vodních elektráren

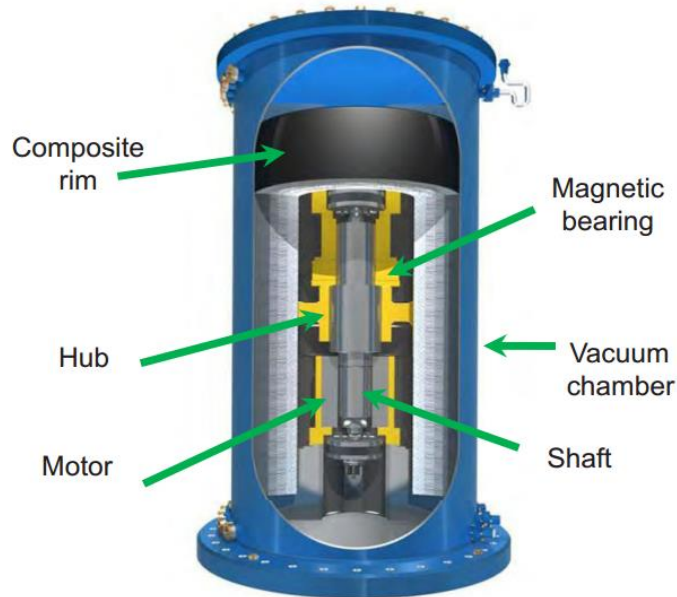
Kapacita na článek [kWh]	Doba odezvy	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Vybíjecí doba	Efektivita [%]	Počet cyklů	Životnost [rok]
-	minuty	0,2 - 2	0,2 - 2	hodiny	70 - 80	> 15 000	> 25

2.3.2. Setrvačnick (FESS)

Systém FESS (*Flywheel energy storage system*) přeměňuje energii elektrickou na kinetickou. Kinetická energie může být chápána jako „energie pohybu“, která je zde uložena v momentu rotujícího tělesa, zkráceně rotoru, který je uložen na ložiskách, na kterých téměř nevzniká tření. U moderních systémů je rotor nahrazen masivním cylindrem, jenž je k připevněn na hřídel generátoru a stabilizován pomocí speciálních magnetických ložisek (Obr.11)

Dojde-li k výpadku energie, setrvačnost umožní rotoru pokračovat v rotaci a výsledná kinetická energie se přemění na elektrickou. Rychlosti rotace se pohybují až do 80 000 RPS. Výhodou je minimální údržba, rychlá odezva a obrovský počet cyklů, který u moderních systémů dosahuje až 175 000 a malý dopad na životní prostředí. Při výběru máme dvě základní možnosti. První možností je využití ocelového provedení, které je levnější, těžší a větší. Druhou možností je provedení v karbonu,

který je dražší, lehčí a pevnější, čímž je možno zařízení zmenšit při dosažení vyšších rotačních možností.



Obr. 11 - Náhled do boxu FESS

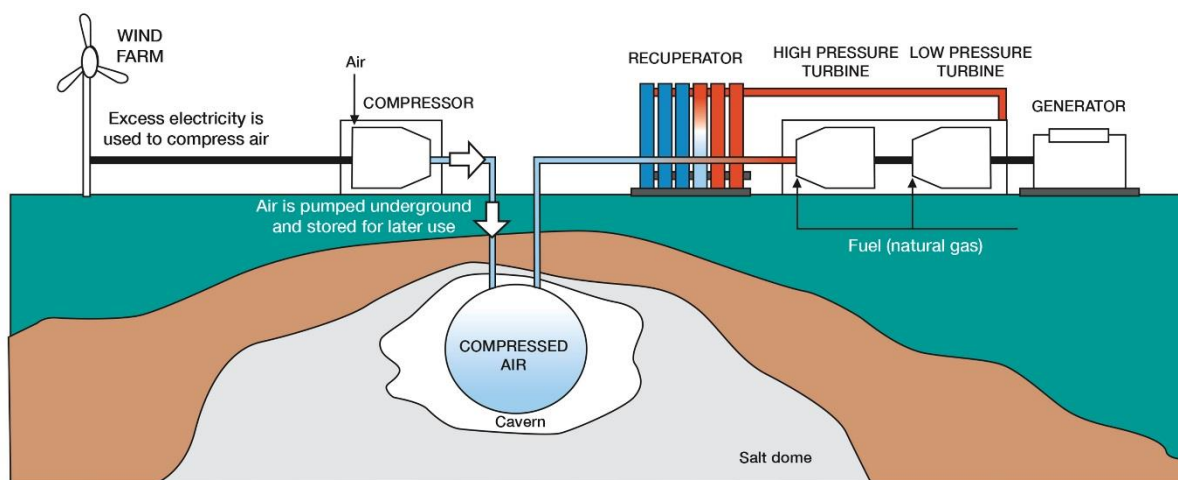
Tabulka 10 - Vlastnosti FESS

Kapacita na článek [kWh]	Doba odezvy	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Vybíjecí doba	Efektivita [%]	Počet cyklů	Životnost [rok]
1 - 100	< sekundy	5 - 30	20 - 80	sekundy	80 - 90	10 ⁴ - 10 ⁷	15 - 20

2.3.3. Skladování energie stlačeným vzduchem (CAES)

Uskladnění vybrané energie pomocí stlačeného vzduchu je známa od 19. století. Systém ukládající elektrickou energii do stlačeného vzduchu je znám pod zkratkou CAES (*Compressed air energy storage*). V dobách přebytku je pomocí kompresoru vzduch stlačen na hodnotu 50-70 Bar a uložen do nádrží nebo jeskyní., kde může být uskladněn i několik měsíců. Je-li energie potřeba, je stlačený vzduch smíchán se zemním plynem a spálen v paroplynné turbíně (stejný postup jako u paroplynné elektrárny). Při stlačování se vzduch ohřívá, avšak jeho skladovací teploty nesmí být vyšší než 40 °C, je tedy potřeba přebytečné teplo odvádět do okolí. Při následném využití vzduchu se vlivem snižování tlaku vzduch ochlazuje, musí být tedy přehříván pomocí zemního plynu na potřebnou pracovní teplotu. I přesto je

díky vzduchu pro výrobu stejného výkonu potřeba jen zhruba 1/3 zemního plynu než u normálních paroplynných elektráren. Efektivita tohoto postupu je zhruba 43-55 %, ovšem záleží, zda je zbylé teplo za turbínou použito pro předehřev vzduchu před turbínou. Jedná se o nejstarší typ CAES, takzvaný „Diabatic“ CAES (Obr. 12). Novějším typem je „Adiabatic“ systém (A-CAES), který využívá teplo vznikající kompresí pro předehřívání vzduchu před turbínou, čímž zvedne účinnost na 70 %, bohužel tento systém předpokládá běh kompresoru zároveň s turbínou.



Obr. 12 - Princip funkce Diabatic metody systému CAES

Do budoucna se počítá se systémem pokročilého Adiabatického systému (AA-CAES), který se oprostí od závislosti na teple z běžícího kompresoru, namísto toho bude teplo z kompresoru skladováno v tepelných tancích, což umožní vysokou efektivitu i v dobách, kdy vzduch není kompresorem pumpován do skladovacích nádrží. Druhou budoucí technologií může být Isotermický CAES, který má za cíl teplo vznikající kompresí odvádět pomocí kapiček vstříkované vody přímo do speciálního kompresoru, tuto vodu skladovat a následně ji vstříkovat v podobě mlhy do turbíny. Díky oběma principům bychom se byli schopni zbavit využívání zemního plynu, což nejen zvýší účinnost, ale velmi sníží celkové náklady.

Tabulka 11 - Vlastnosti CAES

Kapacita na článek [kWh]	Doba odezvy	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Vybíjecí doba	Efektivita [%]	Počet cyklů	Životnost [rok]
-	minuty	-	2-6	hodiny	40 - 75	> 10 000	> 25

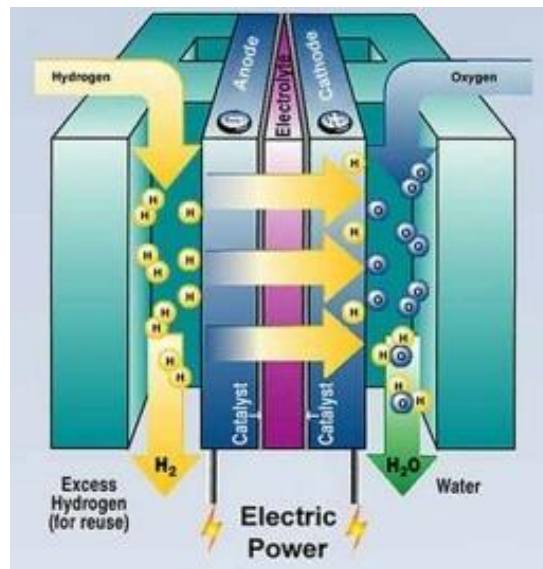
2.4. Chemické systémy

Zabývat se budeme jen vodíkem (H_2) a syntetickým přírodním plynem (SNG). Obě technologie využívají elektřinu pro výrobu vodíku formou elektrolýzy. Oproti bateriovým systémům nebo přečerpávacím elektrárnám mají stále velmi malou účinnost, avšak jakožto jediné technologie mají předpoklad pro skladování TWh energie po velmi dlouhá časová období.

2.4.1. Vodík (H_2)

Běžný systém je složen z elektrolyzátoru, skladovacího tanku na vodík a palivového článku. Elektrolyzátor je zařízení, které za pomoci elektřiny a tepla rozkládá vodu na vodík a kyslík. Vodík je následně ukládán v tankách, kde může být i roky. Pro výrobu elektřiny je vodík pumpován do palivového článku, na jehož druhý vstup je přiveden kyslík (Obr.13), a výstupem jsou vodní páry.

Z ekonomického hlediska se nevyplatí skladovat kyslík, potřebný kyslík pro reakci je tak získáván



Obr. 13 – Princip funkce palivového článku

ze vzduchu (po průchodu sadou čistících filtrů). Jsou různé způsoby skladování vodíku, například skladování stlačeného plynu, kapalného vodíky při nízkých teplotách, nebo pomocí metal hydrogenu.

Tabulka 12 - Vlastnosti H_2

Kapacita na článek [kWh]	Doba odezvy	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Vybíjecí doba	Efektivita [%]	Počet cyklů	Životnost [rok]
-	min	33 330	130 -200	dny	34 - 44	10 ³ - 10 ⁴	10 - 30

2.4.2. Syntetický zemní plyn (SNG)

Syntéza metanu je druhou používanou metodou uskladnění energie. Po výrobě vodíku je třeba ještě jednoho kroku k výrobě SNG. Tím je vhodně řízená reakce mezi vodíkem a oxidem uhličitým, kde výsledkem je methan a voda. Methan může být následně skladován podobně jako vodík, avšak oproti vodíku má SNG výhodu, že může být v nouzi přepravován plynovým potrubím napříč Evropou a přeměněn na elektřinu v plynových elektrárnách.

Tabulka 13 - Vlastnosti SNG

Kapacita na článek [kWh]	Doba odezvy	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Vybíjecí doba	Efektivita [%]	Počet cyklů	Životnost [rok]
-	min	10 000	600 (200 bar)	dny	30 - 38	10 ³ - 10 ⁴	10 - 30

2.5. Tepelné systémy

Tepelné systémy umožňují ukládání dostupného tepla pro budoucí použití pro výrobu elektrické energie, nebo třeba ohřev vody. Rozdělit je můžeme na tři základní kategorie: akumulaci v roztavených solích, akumulace tepelným oběhem a akumulace zkapalněným vzduchem.

Systém akumulace v roztavených solích je typický příklad akumulace slunečního tepla, které je poté přeměněno na elektrickou energii. Sluneční paprsky jsou směřovány velkou soustavou zrcadel na vrcholek solární věže, kde jsou ohřívány soli a ukládány do zásobníků. Akumulované teplo je následně využíváno k výrobě páry, která roztáčí turbínu s generátorem.

Akumulace tepelným oběhem využívá principu tepelného čerpadla. Systém má dva zásobníky, z čehož jeden se ohřívá více. V případě výroby dojde k reverzaci tepelného oběhu a vzniklá mechanická energie je využita pro pohon elektrického generátoru.

Technologie využívá elektrickou energii k ochlazení vzduchu a následně ho skladuje v kapalné formě v tlakových nádobách. Kyslík tak zmenší svůj objem zhruba 700krát. Při potřebě elektrické energie dojde k jeho vyčerpání a ohřátí na okolní teplotu a následného využití pro pohon plynové turbíny.

3. Služby akumulčních systémů

Akumulační systém instalujeme pro zlepšení vybraných parametrů objektu, ať se jedná o dům, továrnu nebo elektrizační soustavu. V té přináší akumulace řadu výhod spojených se zvýšením spolehlivosti sítě i zlepšením její ekonomické stránky. Důležitým faktorem je snížení celkových produkovaných emisí klasickými výrobními zdroji. Zdroje na uhlí, nebo zemní plyn musejí svým vyráběným výkonem dynamicky reagovat na změny poptávky po elektrické energii, takže téměř nikdy nepracují v optimálním výrobním režimu, což snižuje jejich účinnost, zvyšuje náklady a emise a zároveň není jejich reakce na změny dostatečně pružná. Tato nižší dynamika začíná být stále více patrná, především díky velkému rozvoji větrných a fotovoltaických elektráren, jejichž výroba je závislá na počasí a v důsledku velmi kolísavá. Pro kompenzaci těchto vlivů je využití akumulčních systémů nevhodnější. V následující sekci budou zmíněny služby, které mohou obecně akumulční systémy poskytovat.

3.1. Pokrývání výkonových špiček

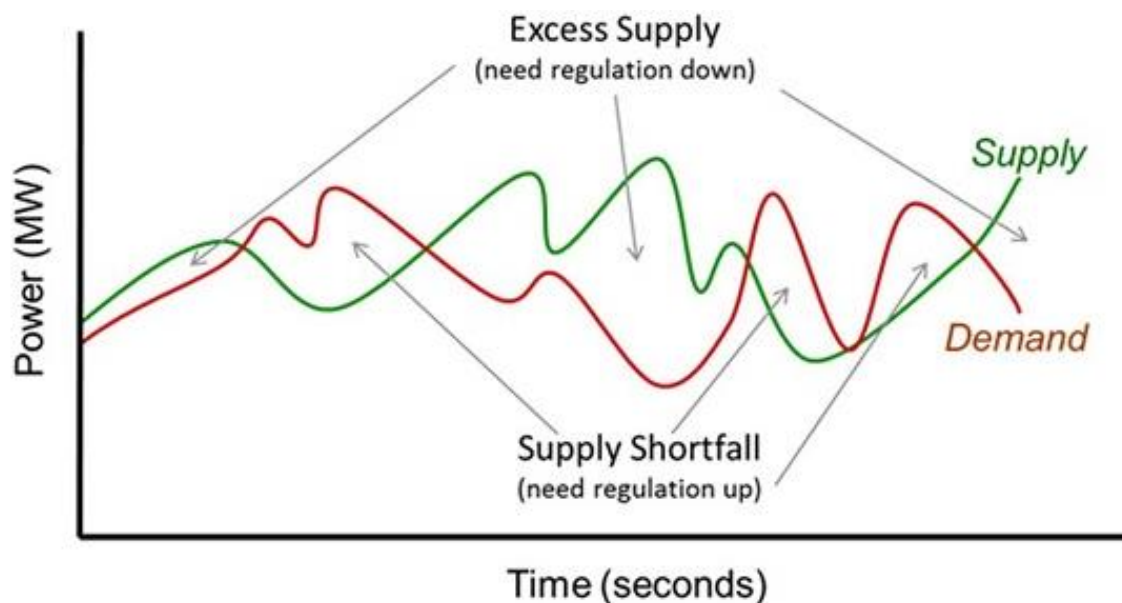
K pokrývání špičkových odběrů vznikajících během dne se typicky využívá zdrojů s vysokou dynamikou řízení, tedy zdroje schopné rychle zvýšit nebo snížit dodávaný výkon, případně rychle naběhnout z vypnutého stavu a také být rychle odstaveny. Energie získaná z těchto zdrojů bývá v důsledku dražší než z klasických zdrojů a podle toho jsou i spínány. Nejčastějšími zdroji jsou vodní elektrárny, plyné a paroplyné. Určitou omezenou možností je potom snižování odběru uživatele pomocí HDO.

Nejhojněji se vyskytujícím akumulčním řešením pro pokrývání výkonových špiček jsou přečerpávací vodní elektrárny. Do budoucna lze očekávat zapojení dalších druhů akumulace do ES vykonávajících tuto podpurnou službu. Celá řada systémů vykazuje větší flexibilitu a rychlejší odezvy než výrobní zdroje využívané pro tuto službu a také než PVE. Akumulační systémy stavěné pouze za tímto účelem ovšem mohou v současnosti představovat horší investici než stavba klasického zdroje pro tuto podporu.

3.2. Regulace frekvence

Pro naši elektrizační soustavu je frekvence sítě 50 Hz. Odchylky od této frekvence znamenají nevyrovnanost činných výkonů v ES a větší odchylka od stanovené hranice může způsobit kolaps. Maximální dovolená odchylka od smluvené frekvence je $\pm 0,5$ Hz, ovšem běžný odklon není větší než 0,2 Hz. Aby byla frekvence co nejstabilnější, tedy odchylka co nejmenší, je nutno udržovat bilanci činných výkonů vyrovnanou. To je díky nestálé výrobě FVE a VE stále obtížnější (Obr. 14). Většina akumulčních systémů je pro udržování této bilance velmi vhodnou kvůli schopnosti rychle a často

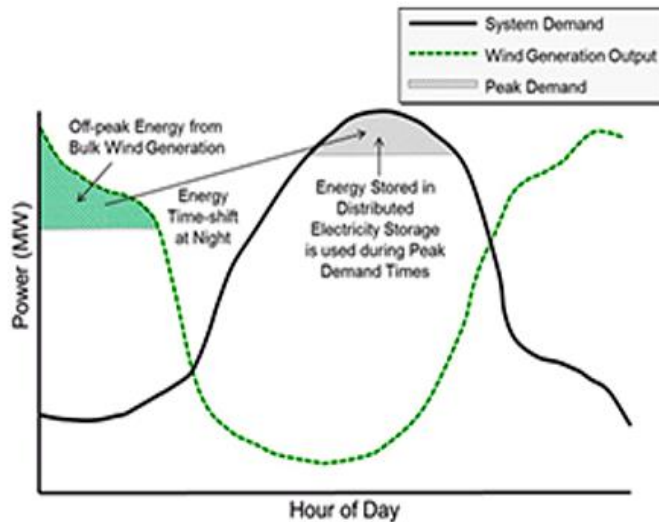
měnit dodávku nebo odběr činného výkonu. Podstatná část technologií vykazuje výrazně rychlejší schopnost této regulace než dnes používané zdroje pro regulaci frekvence. Možnost regulace frekvence především pomocí akumulačních zdrojů by vyžadovala zapojení velkého množství systémů, proto nelze předpokládat vyřazení aktuálních zdrojů pro regulaci frekvence, ale spíše doplnění těchto zdrojů. Protože se příspěvky těchto zdrojů sčítají, je možné postavit řadu menších systémů, nebo rezervovat pouze určitou část energie větších akumulačních systémů pro regulaci frekvence.



Obr. 14 – Příklad rozdílu výroby a poptávky s OZE ve výrobním mixu

3.3. Distribuovaná akumulace u větrných farem

Větrné farmy můžeme najít jak na vrcholcích rozlehlých pohoří, tak především v přímořských oblastech a přímo na moři, kde je silný vítr. Fotovoltaické farmy mají oproti těm větrným určitou výhodu v době generace, která je pevně svázaná se sluncem, tedy generací ve dne, kdy je zatížení největší. Naopak větrné farmy generují většinu svého denního výkonu v noci, kdy není zatížení tak velké. Proto se zde uplatňují velké akumulační systémy v jednotkách MWh, schopné přebytečnou část vyráběné energie uschovat, čímž není nutno větrné elektrárny omezovat. Rozdělíme-li tento velký systém do menších bloků umístěných blíže konečnému uživateli, bude přenos energie v denních hodinách probíhat na kratší vzdálenosti, čímž dojde k odlehčení části sítě, snížení ztrát a odložení její nutnosti o posílení.



Obr. 15 -Princip distribuované akumulace u větrných farem

3.4. Podpora ES

Na rozdíl od velkých systémů typu PVE je možno celou řadu systémů realizovat jako menší jednotky umístěné distribuovaným způsobem, tedy na nižších napěťových hladinách v blízkosti odběrů. Tím dojde ke snížení namáhání a ztrát sítě, a to především v období špiček, díky čemuž se zlepší ekonomika provozování těchto sítí a zároveň dojde k prodloužení živostnosti některých komponent v důsledku menšího přenášeného výkonu oproti špičce bez akumulace. Obecně tedy dojde k přerozdelení velikosti výkonových toků v prospěch sítě a celkovému oddálení nutnosti inovace přenosových a distribučních sítí kvůli stále narůstajícím energetickým nárokům společnosti především v období špiček.

3.5. Rampová kontrola

Žádný řízený zdroj v síti nesmí měnit svou výstupní hodnotu skokově, nýbrž má povolenou jen určitou rychlost změny vyráběné energie za čas (rampu). Dodržování rychlosti rampy zajišťuje, že je provozovatel sítě schopen řídit změny v generování (částečně i zatížení) sítě a tím udržovat správnou frekvenci. Problém nastává u FVE a VE elektráren a jejich dynamických změn. Pokud se jedná o menší zdroje velikosti domácích instalací, je změna pozorovatelná, přesto nikterak zásadní. Pokud by k podobným změnám docházelo na FVE a VE s výkony v MW, mohlo by dojít ke kolapsu sítě. Na akumulacním systému je tedy nastavena hodnota rampy, po které se může daný zdroj pohybovat a akumulacní systém následně vstřebává energii, která by přesáhla rychlost změny a stejně tak dodává energii, pokud výroba poklesla tak, aby i pokles probíhal definovaným způsobem.

3.6. Integrace malých decentralizovaných zdrojů

Za posledních deset let došlo k výraznému zvýšení výroby elektrické energie pomocí fotovoltaických článků. V roce 2006 byl instalovaný výkon FVE v naší síti zhruba 0,4 MWp. Dnes přesahuje tento výkon hodnotu 2 GWp, přičemž podstatná část těchto elektráren jsou decentralizované zdroje na střechách domů, kancelářských a továrních budov a podobně. Do budoucna se očekává udržení tohoto trendu a jeho celková podpora, to sebou ovšem nese jistá úskalí v podobě rychlé změny výkonových toků, velmi špatné předvídatelnosti, dopadu na napěťovou úroveň nebo například dopadu na kvalitu elektrické energie. Celou řadu těchto problémů může řešit akumulací systém umístěný přímo (vhodné pro větší) nebo poblíž (vhodné pro skupinu menších) FVE. Při vhodném výběru akumulací systému a správném dimenzování může systém velmi výrazně potlačit negativní dopady fotovoltaických zdrojů a zároveň umožnit snadnější řízení soustavy.

3.7. Kvalita elektrické energie

Některé typy akumulací systémů mohou přispívat ke zlepšování lokální kvality energie, především potom technologie ukládající svou energii v DC formě, tedy technologie využívající DC/AC měniče. Jejich vhodným řízením, případně dalšími doplňujícími prvky, lze pak redukovat negativní kvalitativní parametry jako např. vyšší harmonické, kolísání napětí, flicker, eventuálně nesymetrie. Pokud je systém navíc vybaven moderními čtyřkvadrantovými DC/AC měniči, přidává se možnost regulace napěťové úrovně v předepsaných mezích. Tyto systémy jsou schopny nejen vstřebávat a dodávat činný výkon, ale také jalový výkon, a to s rychlou odezvou na změny. Toho se využívá k řízení napěťové hladiny v okolí systému a k celkovému udržování induktivního charakteru jalového výkonu. Ten se v nižších soustavách stále častěji mění na kapacitní kvůli moderní domácí elektronice, která má na často na vstupu kondenzátor a určitou část této problematiky nesou i nezátížená vedení menších fotovoltaických elektráren.

3.8. UPS a Black-start

Akumulací systémy nabízející možnost UPS a Black-startu musejí mít hned několik společných znaků. Musejí být schopné dodávat elektrickou energii předepsané kvality a zvládnout určitou frekvenční regulaci za předpokladu napájení AC sítě. Při režimu nepřetržitého napájení (UPS) je především důležitá doba reakce v milisekundách, aby nedošlo k havárii sítě. Následná doba dodávky záleží na odběru a dimenzování systému. Minimální doba dodávky v režimu UPS by měla být taková, aby mohlo dojít k bezpečnému vypnutí a odstavení všech klíčových prvků v síti. Při dostatku energie v čase kratším, než je čas dimenzovaný se tak můžeme plně vyhnout výpadku dané části sítě. Pro režim

Black-startu je důležitá především velikost systému, například po kolapsu sítě při použití k napájení vlastní spotřeby velkého elektrárenského zdroje, kdy je nutno zdroj zásobovat mezi dobou startu a dobou soběstačnosti, kdy dojde k výrobě energie pokrývající vlastní spotřebu.

3.9. Elektromobilita

Pravděpodobně nedílnou součástí budoucnosti budou určité druhy elektromobilů a s tímto odvětvím plně počítá i koncept inteligentních sítí. Tyto elektromobily budou dobíjené z distribuční sítě pomocí dobíjecích stanic. To povede celkově k větším požadavkům na zásobování elektrickou energií. Lze očekávat, že převážná část elektromobilů bude nabíjena v období večerních a nočních hodin, ale část elektromobilů bude pravděpodobně nabíjena i přes den. Období nabíjení v nočních hodinách nepředstavuje některak velké riziko, jelikož je síť zpravidla nezatížená. Problémem mohou být hodiny denní a večerní, kdy dojde k nárůstu špičkového výkonu a síť bude přetěžována. Ekonomické řešení této špičky bude spočívat v různých tarifech pro spotřebitele. Z technického hlediska může také pomoci inteligentní řízení těchto stanic, avšak obě řešení částečně spoléhají na „solidaritu“ spotřebitelů. Pro komplexní řešení je třeba využít akumulčních systémů, které budou nabíjeny v době nižší celkové spotřeby v ES, a tedy i nižšího zatížení sítí, což umožní rovnoměrnější zatížení sítí i výrobních zdrojů bez nutnosti jejich příliš vysokého dimenzování a přetěžování ES. Zároveň toto řešení podporuje i integraci malých lokálních zdrojů v podobě FVE, které jak již bylo zmíněno odlehčí ES. V důsledku se tedy nemusí jednat ani tak o větší elektrárny, jako o malé FVE na střechách obytných domů, kde bude každý objekt vybaven akumulční jednotkou. Tímto směrem jsou také odvíjeny návrhy DC mikro sítí, jakýchsi energetických společenství domů, kde je každý dům osazen FVE s vlastním akumulčním systémem a DC/AC měničem připojeným samotně k ES, avšak strana DC je pro toto uskupení objektů společná a slouží primárně k napájení stejnosměrných spotřebičů a dobíjení akumulátorů elektromobilů a elektrokol.

4. Porovnání

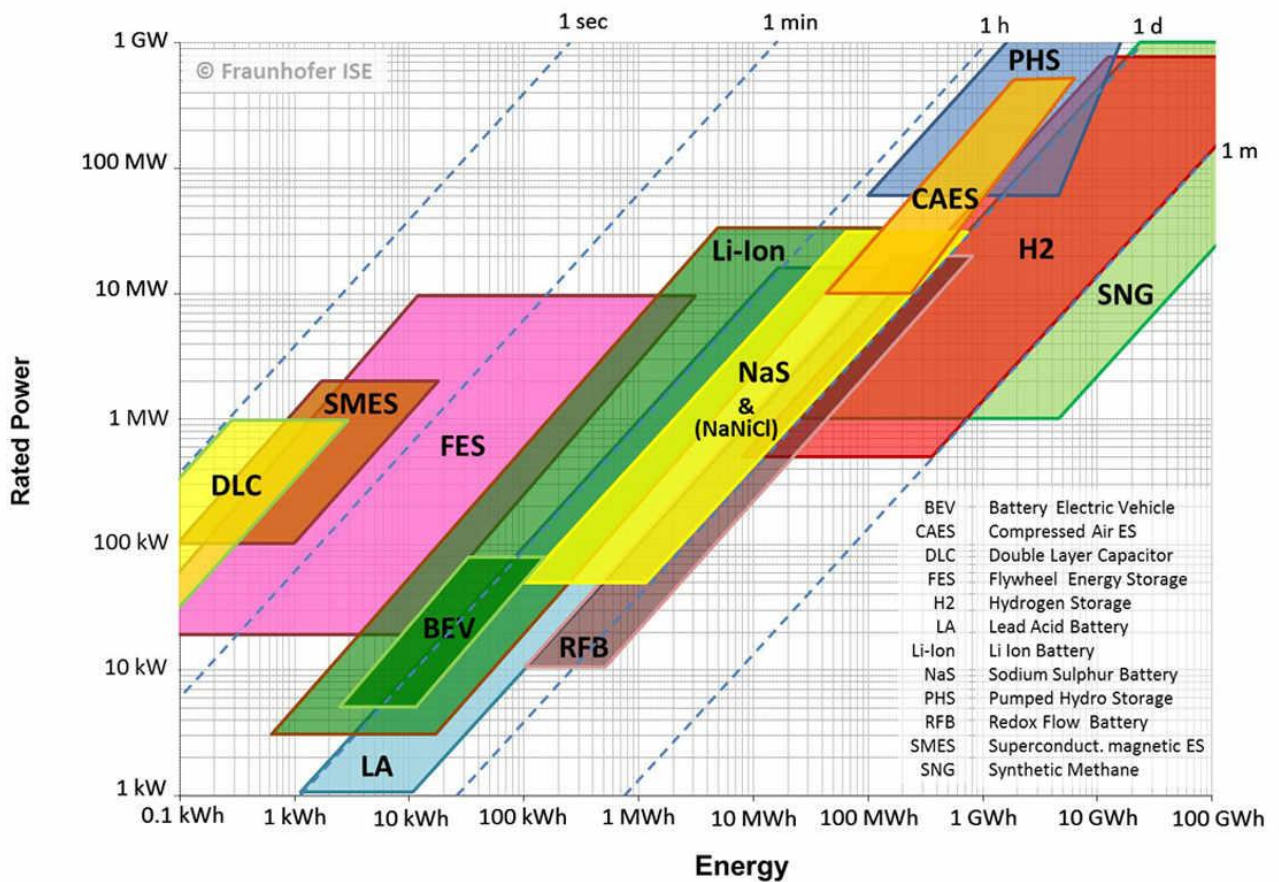
V následující kapitole si nejdříve za pomoci tabulky a grafů porovnáme technologie rozebírané v druhé kapitole a následně probereme několik možností jejich využití. Dané problémy byly nastíněny v předešlé kapitole, nyní se pokusíme vybrat potencionálně výhodné druhy akumulčních systémů pro hladiny nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí ve spojení s těmito stavy.

Tabulka 14, kterou naleznete na další straně, je souhrnem všech tabulek z předešlé kapitoly s vyznačením druhu přeměny elektrické energie při akumulaci.

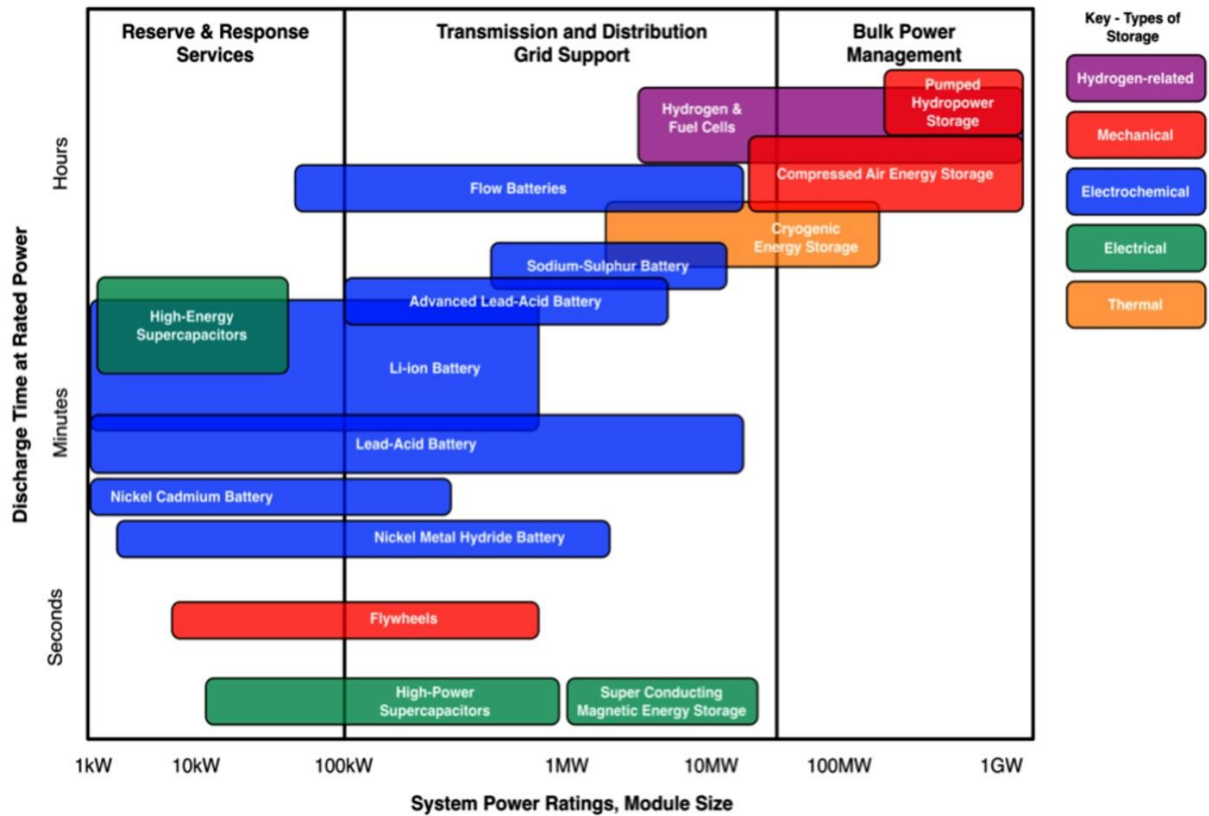
Tabulka 14 – Porovnání akumulčních systémů

	Typ	Kapacita na článek [kWh]	Doba odezvy	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Vybíjecí doba	Efektivita [%]	Počet cyklů	Životnost [rok]
Elektrické	DLC	-	< sekundy	1 - 15	10 - 20	sekundy	85 - 98	10 ⁴ - 10 ⁵	4 - 12
	SMES	-	< sekundy	-	6	sekundy	75 - 85	-	-
Elektrochemické	Li-ion	až 0,4	< sekundy	60 - 220	200 - 500	hodiny	75 - 90	500 - 10 000	5 - 15
	NiCd	až 1,56	< sekundy	30 - 45	80 - 110	hodiny	60 - 80	500 - 3000	3 - 20
	NiMH	až 0,14	< sekundy	40 - 80	80 - 200	hodiny	60 - 75	600 - 1200	3 - 10
	Olověný	až 8	< sekundy	30-45	50 - 80	hodiny	75-90	250-1800	3 - 15
	Na-S	až 0,4	< sekundy	100 - 250	150 - 300	hodiny	70 - 85	2500 - 4500	10 - 15
	Zn-air	až 0,1	< sekundy	130 - 200	130 -200	hodiny	50 - 70	-	-
	VRB	-	sekundy	15 - 50	20 - 70	hodiny	60 - 75	> 10 000	5 - 20
	ZnRB	-	sekundy	65- 75	60 -70	hodiny	68 -75	1000 - 3000	5 -10
Mechanické	PVE	-	minuty	0,2 - 2	0,2 - 2	hodiny	70 - 80	> 15 000	> 25
	FESS	1 - 100	< sekundy	5 - 30	20 - 80	sekundy	80 - 90	10 ⁴ - 10 ⁷	15 - 20
	CAES	-	minuty	-	2-6	hodiny	40 - 75	> 10 000	> 25
Chemické	H2	-	minuty	33 330	130 -200	dny	34 - 44	10 ³ - 10 ⁴	10 - 30
	SNG	-	minuty	10 000	600 (200 bar)	dny	30 - 38	10 ³ - 10 ⁴	10 - 30
	Tepelný	až 0,1	sekundy	130 - 200	1800 (200 bar)	hodiny	50 - 70	-	-

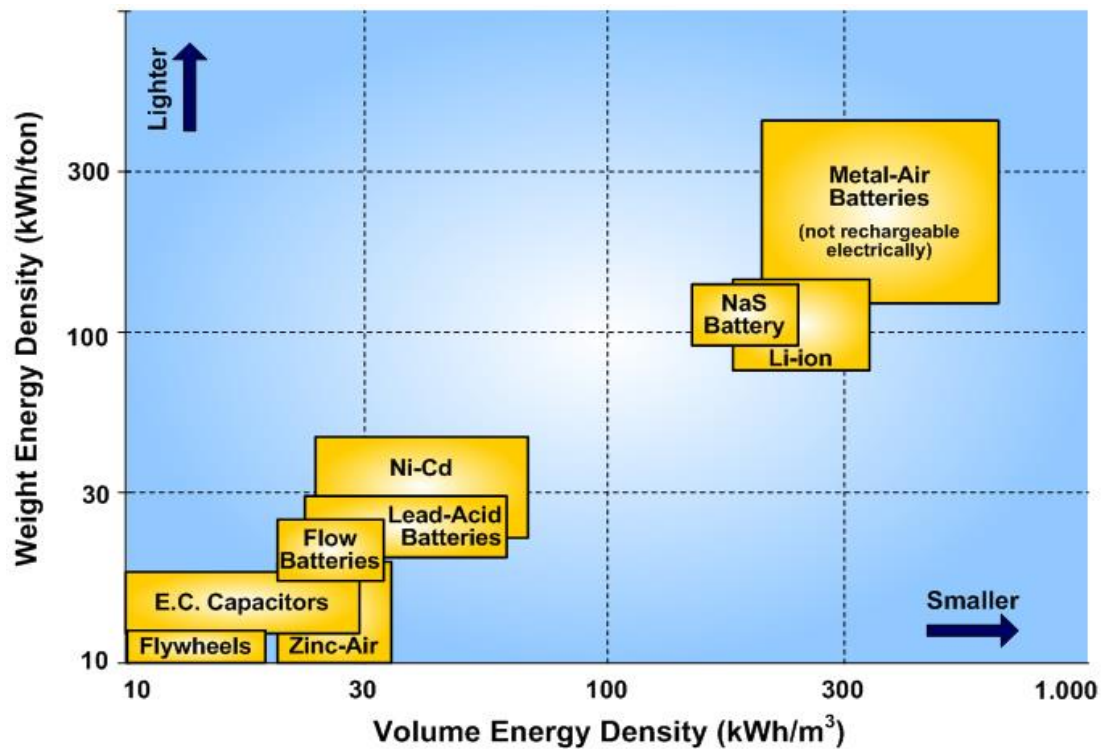
Porovnat hodnoty v jednom sloupci je z tabulky poměrně jednoduché udělat. Avšak porovnání dvou či tří parametrů najednou již může být složitější, proto je vhodné podívat se na grafické porovnání. Na obrázku č.16 vidíme, jak velké systémy se běžně používají v závislosti na výstupním výkonu a době, po kterou má být tento výkon poskytován. Obrázek č. 17 teoreticky rozděluje technologie podle typu využití. Na obrázku č. 18 je porovnávána měrná energie (osa x) na hustotě energie (osa y). Toto porovnání přímo poukazuje na minimální velikost a hmotnost systému, tedy pokud neuvážíme celou skladovací konstrukci a ostatní stavební a bezpečnostní prvky. Dalším z vybraných porovnání (Obr.19) je životnost na efektivitě, kde je počítáno s počáteční degradací systému 20 % celkových počtů cyklů. Posledním grafickým porovnáním je fáze vývoje technologie akumulčních systémů (Obr. 20).



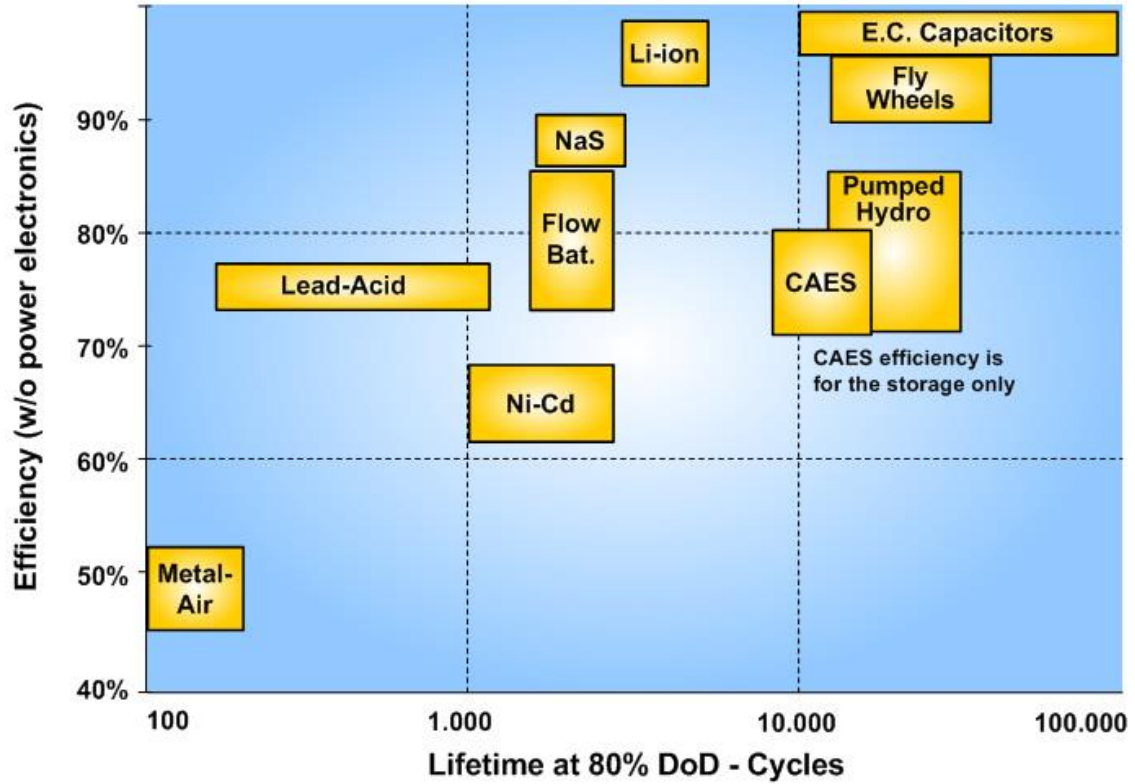
Obr. 16 - Porovnání systémů na výkon



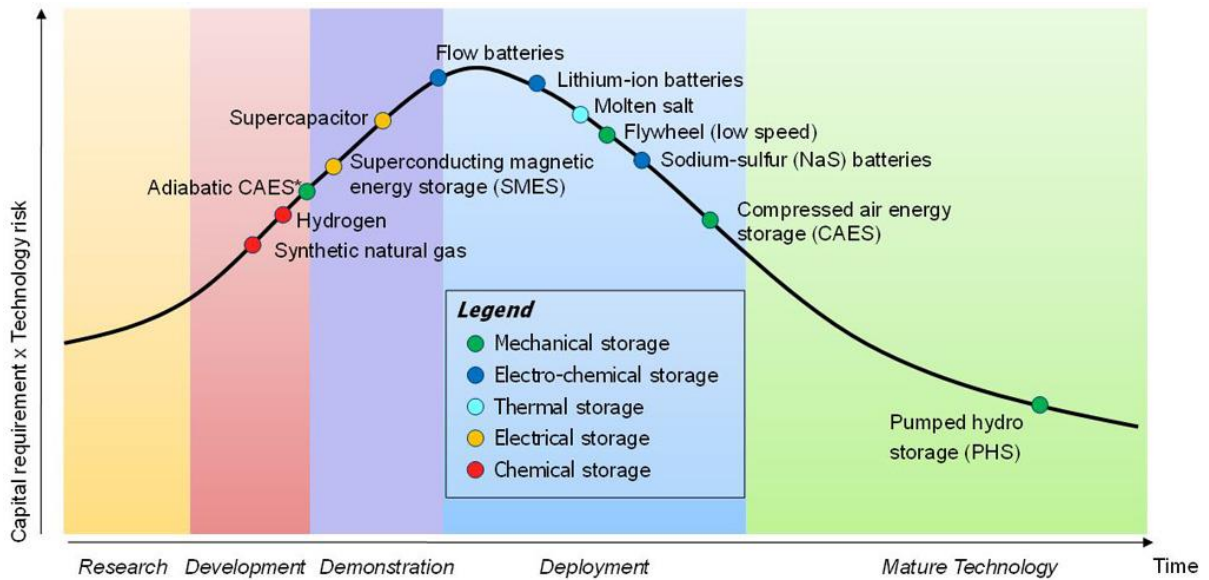
Obr. 17 - Porovnání systémů na výkon za čas



Obr. 18 - Porovnání velikosti a hmotnosti na kWh



Obr. 19 - Porovnání životnosti systému na efektivitě



Obr. 20 - Fáze technologického vývoje akumulčních technologií

4.1. Akumulační systémy v nízkonapět'ové distribuční síti

V distribuční síti nízkého napětí dochází k výrazným změnám, a to především vlivem malých decentralizovaných FVE. Ty jsou často stavěny jako střešní nástavby a řada z nich dodává celý vyrobený výkon přímo do sítě. Tento výkon bývá i v malém časovém měřítku velmi nestálý a jeho prudké změny ovlivňují kvalitu elektrické energie v přilehlém okolí. Při větších instalacích může často vyráběný výkon překročit aktuální odběrovou hodnotu přilehlé lokální sítě, v důsledku čehož následně dochází k dodávkám výkonu do nadřazené sítě. Určitým problémem je také měnící se charakter odběrů v těchto sítích, kdy odběry v podobě domů stále častěji vykazují kapacitní charakter odběru jalového výkonu způsobeného kondenzátory na vstupech moderní elektroniky. Příspěvek k této situaci mají i některé malé FVE, a to, pokud nejsou kompenzované, protože samotné fotovoltaické články vykazují mírně kapacitní charakter. Problémy tohoto druhu je možno řešit umístěním vhodného akumulacího systému, který bude řešit vzniklé ať výkonové nebo napět'ové problémové situace.

4.1.1. Integrace malých decentralizovaných zdrojů

Jak již bylo řečeno ve třetí kapitole, základní přístupy jsou dva. Prvním je instalace akumulacího systému přímo u FVE, což je v současné době vhodné pro větší elektrárny. Většina majitelů malých FVE, kteří dodávají výkon přímo do sítě, žádné akumulacího zařízení pro současnou ekonomickou nevýhodnost neinstaluje. V budoucnu by mohla ekonomickou výhodnost zajistit elektromobilita a tarify s ní spojené. Ty by pravděpodobně tlačily zákazníky k nenabíjení automobilů v době špičky, což by mohlo některé majitele FVE (jak fyzické, tak především právnické) přimět instalovat akumulacího systém, z kterého by nabíjeli elektromobil i v dobách špiček z akumulované energie. Přínos pro majitele by byl zároveň přínosem pro ES, jelikož by nedocházelo k navyšování výkonových špiček vlivem tohoto nabíjení a zároveň by akumulacího systém stabilizoval dodávané výkony do ES. Systém vyhovující těmto parametrům by nemusel být velký. Příkladem pro toto řešení je například systém Powerwall od firmy Tesla, který obsahuje všechny potřebné ovládací prvky a pokud chce zákazník větší kapacitu, než je kapacita jednoho boxu, tak tyto boxy snadno navzájem propojí a boxy obstarají veškeré nastavení automaticky.

Pro dnešní podmínky nelze na akumulaci u uživatele spoléhat, zbývá tedy druhý přístup, kterým je instalace akumulacího systému poblíž těchto zdrojů. Takovýto systém by měl být vhodně umístěn a umožňovat určitou možnost jeho budoucího zvětšení. Od velikosti systému se také odvíjí možnost použitelné technologie. Na obrázku č.17 se v tomto případě budeme pohybovat okolo hodnot 100 kW. Systémy protínající tuto čáru jsou využitelné pro integraci malých rozptýlených zdrojů v určité oblasti a zároveň mohou v této oblasti zlepšovat kvalitu elektrické energie.

4.1.2. Kvalita elektrické energie

Velká řada akumulčních systémů je schopna zlepšovat kvalitu elektrické energie v přilehlé nn síti, zejména pokud jsou vybaveny čtyřkvadrantovými měniči. Pro tyto účely budeme uvažovat některé akumulční systémy z první třetiny obrázku č.17.

Celosvětově používané řešení jsou modulární systémy z Li-ion moduly. Příkladem bude modulární akumulátorový systém od firmy Saft se svým Seanergy systémem. Jednotlivé malé Li-ion akumulátory jsou zde poskládány do větších modulů (Obr. 21) a tyto moduly jsou následně pospojovány pomocí modulárních skříní (Obr. 22) Výhodou těchto systémů je variabilita takového to uspořádání, jelikož skříně nevyžaduje plné naplnění. Je tedy možno skříně osadit pouze polovinou modulů a pokud vznikne v budoucnu potřeba zvětšit systém, tak se zbylé volné sloty zaplní. Samozřejmě pokud takovýto rozvoj



Obr. 21 - Modul Li-ion modulárního systému



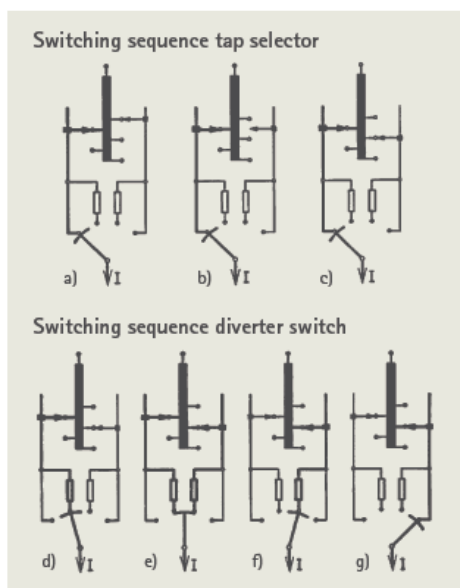
Obr. 22 - Skříň modulů

očekáváme musíme také dopředu správně navrhnout příslušný měnič a transformátor. Příkladem může být projekt v americkém San Diegu, kde jsou postaveny tři malé Li-ion systémy o velikosti jednoho 25 kW. Tento systém byl instalován v roce 2012, kdy došlo zároveň ke stavbě několika dalších větších systémů v okolních městech kolem San Diega.

Druhým vybraným systémem je Setrvačnick, jehož princip byl popsán v druhé kapitole. Jedná se o jediný neakumulátorový systém využívající se pro tuto službu, proto není ani hojně zastoupen. Jedním z projektů využívajících Setrvačnick je Smart ZAE ve Francii. Ten se zabývá výzkumem mikrosítí, který obsahuje velké množství decentralizovaných FVE s celkovým výkonem 170 kWp a 15 kW ve větrných

elektrárnách. Systém FESS je zde složený z 10 kW jednotek, které celkově tvoří 100 kW. Systém je do výzkumu zapojen od roku 2012.

Pomocným řešením v otázkách především kvality napětí může být také využití OLTC („On-Load Tap-Changer“) a NOTC („No-Load Tap-Changer“) transformátorů na napájecích bodech soustavy. Ty jsou schopny měnit svůj převod přepínáním mezi segmenty cívek, tedy vyřazováním nebo přidáváním závitů na straně vyššího napětí. Tento regulační rozsah je zpravidla regulačním rozsahem sítě, tedy $\pm 10\%$. Rozdíl mezi OLTC a NOTC je, jak je patrné z názvu, že OLTC může měnit převod za chodu bez nutnosti přerušit provoz. Principiální funkce OLTC je na obrázku č. 23.

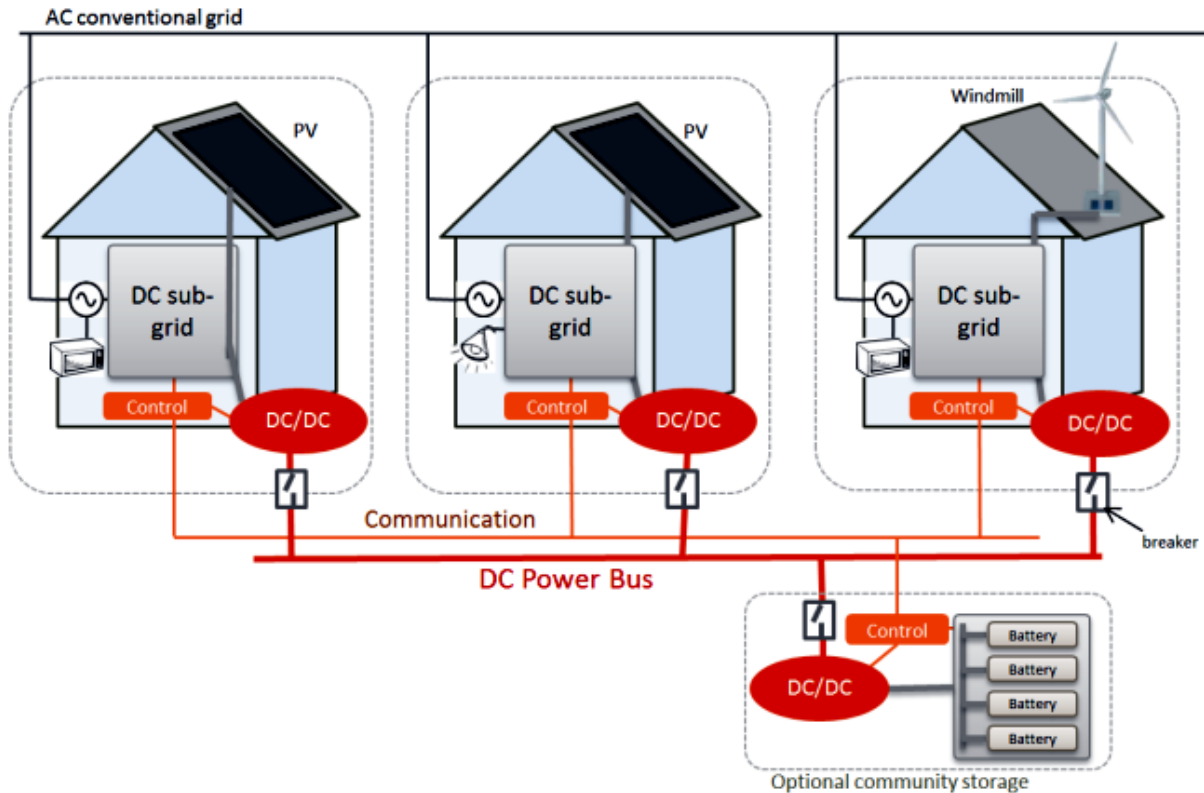


Obr. 23 - Přepínací sekvence OLTC

4.1.3. DC mikrosítě a elektromobilita

Koncept DC mikrosítě (Obr. 24) je společné sdílení vyrobené energie napříč mikrosítí. Výchozím bodem je předpoklad rozvíjející se elektroniky, která má na vstupu usměrňovač, funguje tedy na DC. Fotovoltaické panely umístěné na střechách domů vyrábějí také DC výkon a akumulátorové systémy fungují také na DC. Pokud bychom tedy nechtěli energii do sítě dodávat, ale část energie pro vlastní použití vyrobit FVE na střeše, je zbytečné tuto energii přeměnit na AC a následně na vstupu elektroniky zpět na DC. V tomto procesu vznikají zbytečné ztráty v měničích. Bylo by tedy výhodnější tuto energii využívat přímo bez zbytečných měničů. Pokud by byla navíc energie sdílená napříč malou komunitou, a doplněna o větší akumulátorový systém, došlo by k zvýšení celkové efektivity systému. Zároveň tento koncept podporuje elektromobilitu, jelikož bude možné elektromobil nabíjet přímo DC napětím, což bude efektivnější. Z pohledu ES můžeme elektromobil vnímat jako nestacionární akumulátorový

system, což zavádí určitou možnost v případě nouze tuto energii z aktuálně připojených elektromobilů využít. Tento koncept najdeme pod označením V2G neboli „vehicle-to-grid“.



Obr. 24 - Model DC mikrosítě s akumulátorovým systémem

4.2. Akumulace na straně vysokého a velmi vysokého napětí

V předešlé kapitole jsme rozebrali možnosti zlepšení parametrů pomocí akumulace v nízkonapěťové síti pro zlepšení kvality elektrické energie a integraci rozptýlených zdrojů. Prvním řešením byla akumulace na straně odběratele, která pro něj v současné době neposkytuje zásadní výhody, druhým řešením byla akumulace poblíž rozptýlených zdrojů. Tato možnost již reálná je, ovšem překážkou může být ekonomické hledisko pořízení menšího systému, který může být v současné době kvůli ceně stavěn spíše do pozice individuálnějšího řešení. Vhodnějším řešením jsou tedy větší systémy na napěťových hladinách vn a vvn, které zvládnou kompenzovat větší oblasti a jsou levnější na výstavbu.

4.2.1. Pokrývání výkonových špiček

Jedná se klasické využití akumulačních systémů. Energie se do těchto systémů uloží v době přebytku a v dobách špiček se následně využívá k napájení přilehlé oblasti, čímž dojde ke snížení namáhání ES. Doba odezvy těchto systémů postačí v minutách, zásadnější je ovšem kapacita systému. Z toho důvodu si v této pasáži probereme ty největší systémy v poslední třetině obrázku č.17, avšak vykonávat tuto

možnost mají všechny systémy s dobou vybíjení v hodinách a více. Zároveň se následující systémy výborně hodí pro velké větrné farmy.

Klasickým řešením je přečerpávací vodní elektrárna. PVE je nejhojněji se vyskytující řešení po celém světě a dosahuje největších instalovaných výkonů. V České republice máme tři: Dlouhé stráně (650 MW), Dalešice (112 MW) a Štěchovice (45 MW). V zahraničí najdeme celou řadu PVE přesahující instalovaným výkonem jednotky GW. Na téma těchto elektráren již byla napsána spousta prací, proto toto řešení nebudeme dále rozebírat.

Dalším velkým systémem je CAES, který měl svůj pilotní projekt v Německu (321 MW, Obr. 25) a USA (110 MW). Na obrázku jsou vidět dvě skladovací jeskyně (Kaverne), z kterých vede potrubí do hlavní budovy s generátorem.



Obr. 25 - Německý CAES "Kraftwerk Huntorf"

Do budoucna byla oznámena stavba systému 330 MW v Anglii a 300 MW v USA. Odhadované doby výdrže jsou okolo 10 hodin. Technologie se nyní potýká s velmi nízkou efektivitou, především pro nutnost přehřívání vyčerpaného vzduchu. Problém je také se skladováním stlačeného vzduchu. Ten je možno skladovat ve vytěžených jeskyních (kapsách) po zemním plynu a po určitých úpravách i po vytěžení ropy. To ovšem značně limituje místa výstavby. Druhým logickým řešením je použití tlakových nádob (tanků), které nutno kvůli bezpečnosti, a především stabilní teplotě umístit pod povrch podobně jako je tomu třeba u nádrží na pohonná paliva u čerpacích stanic. Pokud v budoucnu dojde k vyřešení problému s teplotami uloženého vzduchu, tedy pokud nebude muset být vzduch přehříván před turbínou pomocí zemního plynu, ale toto potřebné teplo bude získáváno efektivněji, stane se toho řešení zajímavým jakožto náhrada na PVE. Prozatím je ovšem technologie pro praktický provoz nevýhodná.

Velké naděje jsou vkládány do SNG a H₂. Současným největším problémem je velmi nízká efektivita, která je nižší než efektivita CAES. Přesto byl v Německu postaven 1 MW systém Power-to-Gas u 140 MW větrné farmy. Vyrobenou energii je možno vracet motorem s vnitřním spalováním a generátorem, nebo ji vstříkovat přímo do místní sítě zemního plynu v závislosti na

provozních potřebách. Systém komprese a ukládání vodíku uchovává energii až do 27 MWh a dramaticky zvyšuje celkovou účinnost větrného. Těmito parametry se zároveň řadí mezi největší systémy tohoto druhu. Přesto dokud nebude tento problém vyřešen, nelze přemýšlet o nasazení této technologie do běžné praxe. Budeme-li ovšem předpokládat, že v budoucnu dojde ke zlepšení například na 70 % účinnost, začnou tyto technologie poskytovat zajímavé výhody. Tou největší je možnost extrémně dlouhé doby skladování těchto paliv a jejich stlačitelnost, což umožní vytváření obrovských rezerv energie. V konceptu inteligentní sítě je také začleněná elektromobilita, tedy do budoucna je počítáno s automobily na čistě elektrickou energii. Alternativou k těmto elektromobilům by mohla být (při oné lepší účinnosti) auta na H₂. V tomto případě by akumulace vodíku získávala velký ekonomický přínos, jelikož by vyrobený vodík nemusel sloužit jen jako akumulační prvek, ale také jako palivo, obdobně pro SNG.

Velkým systémem budoucnosti by také mohl být tepelný systém ukládající zkapalněný kyslík, takzvaný „Cryogenic energy storage“. Technologie využívá k akumulaci ochlazení vzduchu. Životnost technologie je vzhledem k absenci jakékoliv elektrochemické degradace odhadována na doby delší než 30 let bez omezení počtu cyklů nebo hloubky vybití. Zkapalněný kyslík je poté uchováván v tlakových nádržích podobně jako LPG. Při výkonech nad 20 MW roste celková účinnost akumulačního cyklu nad 60 %. Zároveň není vázán na geologické a geografické podmínky na rozdíl od PVE nebo CAES, čímž se také jedná o jedinou plně využitelnou tepelnou technologii pro naši zeměpisnou polohu.

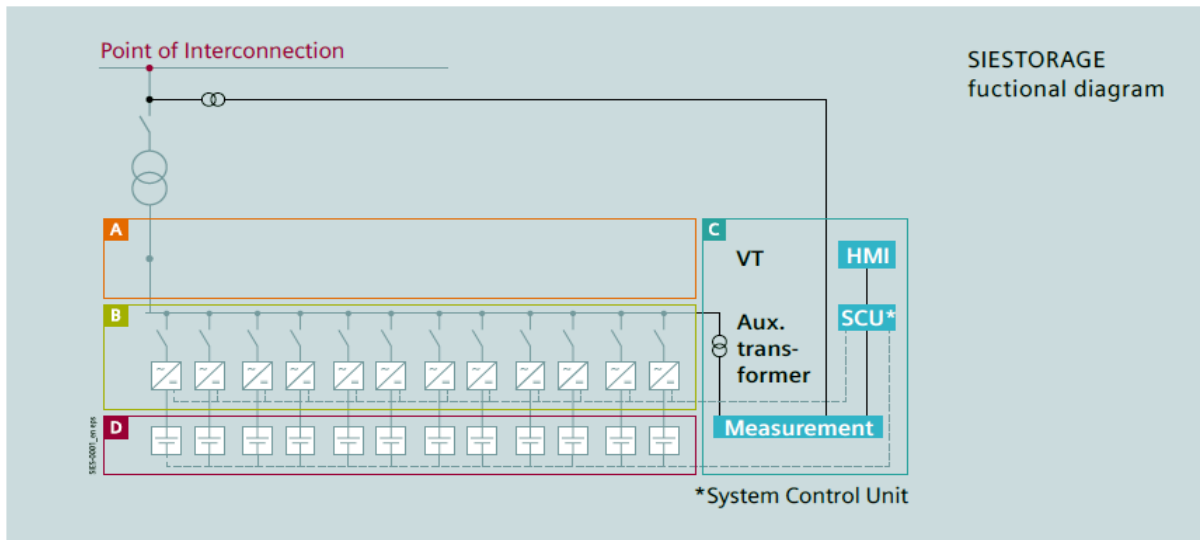
4.2.2. Regulace frekvence

Základní podmínkou pro regulaci frekvence je velká rychlost odezvy, a to kratší než 1 sekundu. Pokud se podíváme do tabulky č.14, zjistíme že těmto podmínkám vyhovují DLC, SMES, akumulátorové systémy a FESS.

Akumulátorové systémy jsou vyráběny velkou škálou světových firem. Zejména jde o Li-ion, Na-S a pokročilé Pb systémy. Technologie založená na niklu se obecně dočkala jen několika málo pilotních projektů. Tím největším byl 27 MW Ni-Cd systém na Aljašce (rok 2003), který byl navržen na 15-ti minutový chod pro překlenutí doby mezi výpadkem a obnovením dodávky nebo startem záložního zdroje. Pro frekvenční regulaci jsou systémy založené na niklu pouze dva, první v Japonsku (300 kW s dobou 15 minut) a druhý v Nizozemsku (3 MW s dobou 5 minut).

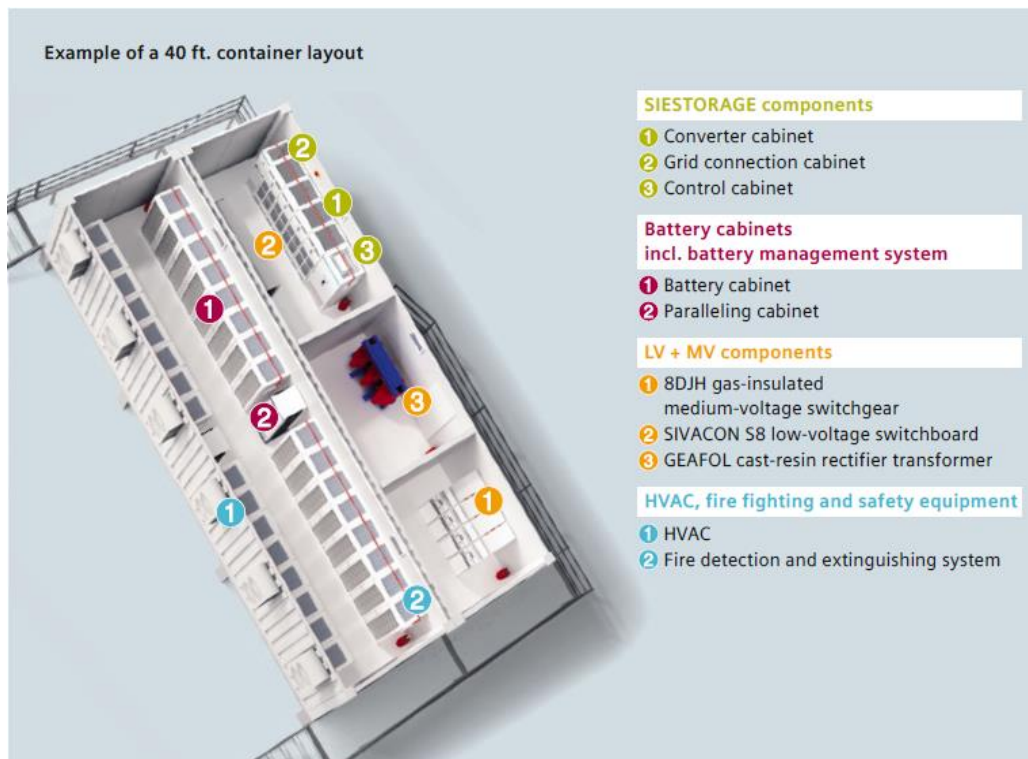
Zmíněnou firmou využívajících Li-ion akumulátory již byl Saft, přesto bychom neměli opomenout ani firmy jako ABB, Eos, AES nebo Siemens. Všechny zmíněné firmy nabízejí velké systémy na podobné konstrukci. Tu si budeme demonstrovat na systému SieStorage od firmy Siemens. Siestorage je modulárním stacionárním akumulátorovým systémem s kapacitami od desítek kW do jednotek MW. Blokové schéma na obrázku č. 26 znázorňuje 4 typy použitých skříní. Blok A slouží pro připojení

systemu a obsahuje odpojovače, pojistky a jiné nezbytné prvky. Blok B obsahuje skříně s měniči, které mají součástky k DC dobíjení akumulátorů i zpětné AC dodávce do sítě a je také vybaven sinusovými



Obr. 26 - Blokové schéma SieStorage

filtry pro minimalizaci obsahu harmonických. Blok C obstarává logiku řízení a komunikace mezi bloky i celými kontejnery, provádí měření na výstupu měničů a na samotné síti. Posledním je blok D, který obsahuje akumulátorové skříně tvořené, stejně jako v případě Seanergy (firma Saft), moduly a skříní



Obr. 27 - Uspořádání SieStorage

tvořící paralelní propojení akumulátorových skříní. Celá tato soustava je rozdělena na dílčí části o dvou kontejnerech, kde jeden kontejner obsahuje pouze akumulátory a druhý kontejner část měření, měničů a odpojovačů (Obr. 27). Celý systém je vybaven bezpečnostními prvky a umožňuje bezpečné odpojení jednotlivých komponent za provozu.

Projektů využívající akumulátory jakéhokoliv Li-ion typu pro regulaci frekvence je více jak stovka s kapacitami od stovek kW do desítek MW. Ty největší systémy mají doby vybíjení okolo 30 minut. Příkladem může být „AES Laurel Mountain“ (Obr. 28) ve Virginii (USA) který má 32 MW a operační čas 15 minut, nebo „Notrees Battery Storage Project – Duke Energy“ v americkém texasu s 36 MW a 40 minutami.



Obr. 28 - AES Laurel mountain

Běžné systémy mají jednotky MW a doby vybíjení v řádech jednotek hodin. Většina systémů byla montována okolo roků 2012-2015 na průměrnou dobu 13 let. Ovšem jen málo z nich je určeno pouze k regulaci frekvence. Většina z nich zastává zároveň funkci pokrývání výkonových špiček a regulaci napětí. Obvyklým nastavením systému je rozdělení celkové kapacity systému na virtuálně oddělené části. Například 30 % výkonu je rezervováno čistě pro potřeby regulace frekvence a zbylá energie je dostupná pro ostatní služby. Ty nemají možnost čerpat z rezervované části, avšak frekvenční regulace primárně probíhá z nerezervované části.

Stejně možnosti funkce jako Li-ion systémy, mohou mít také Pb a Na-S systémy. U olověných systémů je výhoda především finanční, avšak oproti Li-ion je systém stejných parametrů výrazně větší. Technologie Na-S zabere také velký prostor, avšak ne tak velký jako Pb systém. Nevýhodou Na-S je potřeba vysoké provozní teploty. Nemá-li docházet k velkým ztrátám energie je potřeba jejího denního

využívání, není tedy vhodná na dlouhodobější skladování energie. Oproti Li-ion má ovšem jistou výhodu v dostupnosti prvků. Lithia je na zemi jen malé množství, lze tedy předpokládat budoucí nárůst ceny těchto systémů. Sodíku a síry máme oproti Lithiu zásoby obrovské a s dostupností těchto prvků by neměl být v budoucnu problém. Dojde-li tedy v budoucnu ke zlepšení izolačních možností Na-S, pak se stane tato technologie velmi atraktivní. Velký pilotní projekt Na-S systému nalezneme v americkém San Jose v Kalifornii. Zdejší „PG&E Yerba Buena Battery Energy Storage Pilot Project“ má 4 MW s dobou vybíjení 7 hodin. Byl zprovozněn v polovině roku 2013 s operační dobou na 15 let a slouží nejen jako regulátor frekvence, ale také k pokrývání výkonových špiček a k lokálnímu zlepšování kvality elektrické energie.

Neméně důležitou technologií je FESS. Ten se vyznačuje možností velké výstupní hustoty výkonu a nepříliš dlouhou dobou dodávky. Ta se pohybuje okolo 15 minut. Výhodou technologie je přímá fyzikální interakce mezi otáčkami rotoru a stavem výkonu v síti, což činí FESS jedním z nejrychleji reagujících systémů. Tyto vlastnosti jsou ideální pro frekvenční řízení, k čemu se Setrvačnické v sítích nejvíce využívá. Systémy okolo 1MW nalezneme například v Austrálii, Kanadě, Francii a USA. Ty v USA jsou největší a na rozdíl od akumulátorových systémů plní pouze tuto funkci. Na obrázku č. 29 je vidět systém „Beacon Power“ v Pensylvánii s instalovaným výkonem 20 MW a dobou vybíjení 15 minut. Jeho předpokládaná životnost je 20 let, instalován byl 2014. Ovšem jedná se o duplikát svého předchůdce, který stojí v Stephentownu ve státě New York v USA. Ten byl instalován se stejnými parametry o tři roky dříve.

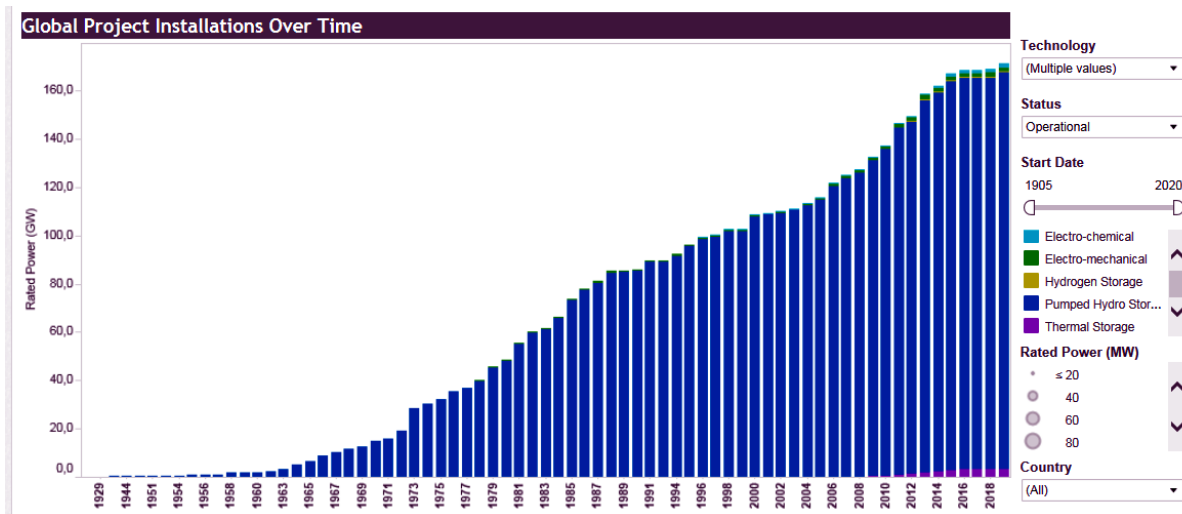


Obr. 29 - FESS "Beacon Power" v Pensylvánii

Mimo ES se setrvačnick často používá ve výzkumných centrech pro tvorbu výbojů nebo například zkoumání fúzní reakce. V českém institutu pro výzkum plazmatické fyziky nacházejícím se na půdě Akademie věd v Praze se nachází 70 MW FESS právě pro účely výzkumu.

4.3. Porovnání celosvětového zastoupení akumulčních systémů

V předešlé části byly rozebrány možnosti akumulčních systémů z hlediska podpory ES. Tyto systémy mohou poskytovat najednou hned několik různých služeb podpory a vyjmenovat všechny kombinace je nemožné. Stejně tak ukázána jen hrstka projektů. Abychom si dokázali představit celkové rozložení instalovaného světového výkonu v akumulčních technologiích, je třeba podívat se na graf na obrázku č. 30, který byl sestaven za pomoci globální databáze akumulčních systémů¹. Ten zobrazuje instalované výkony jednotlivých technologií od roku 1929 do roku 2020, kde jsou systémy, s jejichž spuštěním je počítáno.



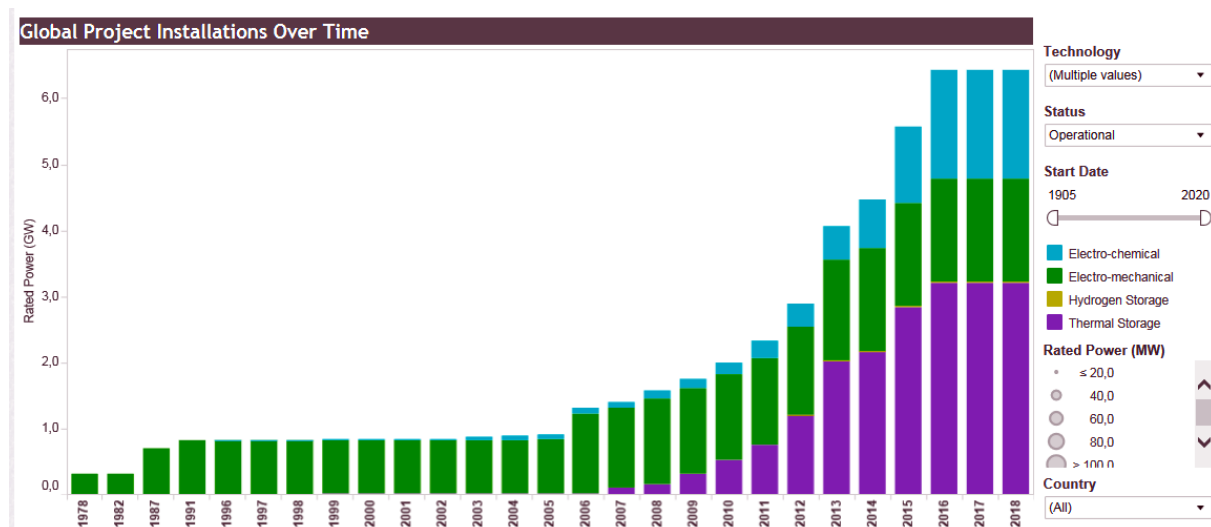
Obr. 30 - Celosvětové rozložení instalovaných výkonů akumulčních systémů

Modrá barva na tomto grafu reprezentuje přečerpávací vodní elektrárny. Od roku 2010 si můžeme povšimnout barev tepelných akumulčních systémů pod PVE a nad PVE směsi ostatních systémů, převážně viditelné zelené barvy akumulátorových systémů.

Odebereme-li z výčtu PVE dostaneme podíl zbylých technologií viz. obrázek č. 31. Zde je vidět především obrovský nárůst akumulátorových a tepelných systémů v tomto desetiletí. U tepelných systémů je celkový instalovaný výkon 3,2 GW, kde zhruba 75 % tohoto výkonu představují systémy akumulace v roztavených solích. Většina těchto systémů je ve Španělsku, Indii a na západě USA.

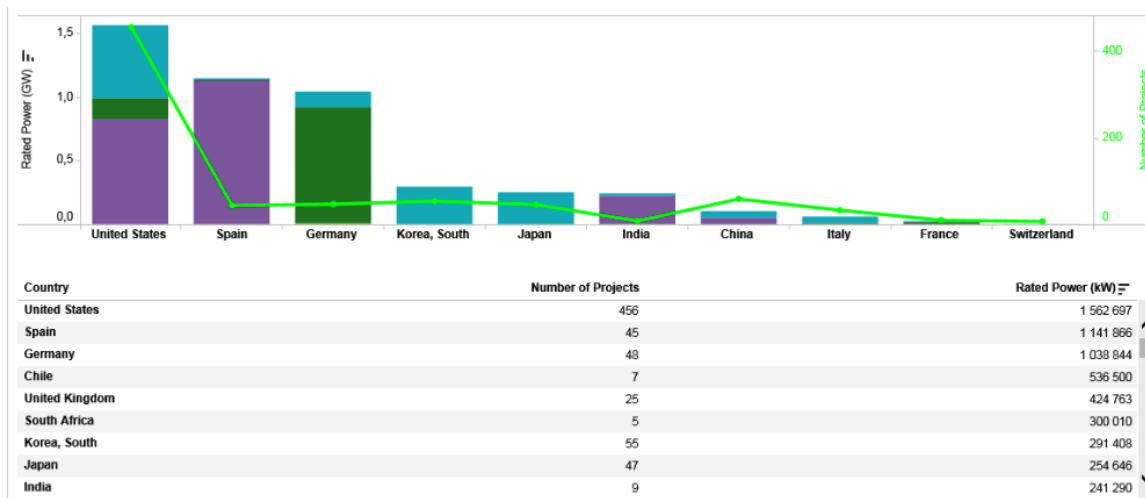
¹ https://www.energystorageexchange.org/projects/data_visualization

U elektro-mechanických systémů je tato hodnota zhruba 1,6 GW, podstatnou část tvoří systémy typu CAES. Celkově je nejvíce projektů situováno v Evropě a celosvětově je potom v provozu zhruba 50 elektro-mechanických systémů.



Obr. 31 - Celosvětové rozložení instalovaných výkonů akumulčních systémů bez PVE

Podobná hodnota instalovaného výkonu, tedy zhruba 1,6 GW připadá na akumulátorové systémy. Ty jsou oproti předešlým rozmístěny rovnoměrněji, především potom v Japonsku, centrální Evropě a západní a severovýchodní části USA. Pokud u elektro-mechanických projektů byla číslovka okolo 50 projektů, u akumulátorových systémů je toto číslo podstatně impozantnější. Těchto systémů je skoro na 700 a to počítáme pouze systémy skutečně v provozu. Důvodem tak velkého počtu je právě variabilita využití těchto systémů, které mohou vykonávat nejrůznější možnosti podpory ES při nejrůznějších velikostech.



Obr. 32 - Porovnání počtu instalací ku instalovanému výkonu

Na obrázku č. 32 je rozložení instalovaného výkonu v top deseti zemích s porovnáním počtu projektů (zelená čára). Barvy odpovídají barevnému rozložení v obrázcích č. 31 a č. 30. Celý graf je opět pro přehlednost uveden bez PVE. Při jejich uvažování by se na první místo v instalovaném výkonu dostala Čína a na druhém místě by bylo Japonsko, obě země s počtem projektů okolo 100. Na třetím místě by byly USA, které stejně jako na našem obrázku silně dominují v počtu zhruba 500 projektů.

5. Závěr

Tato práce se zabývala využitelností akumulčních systémů pro elektrizační soustavu. V té dochází v posledních letech k velkým změnám především v důsledku stále častějšího připojování decentralizovaných obnovitelných zdrojů energie (FVE a VE). Tyto zdroje dodávají do elektrizační soustavy velmi dynamicky se měnící výkony kvůli své závislosti na počasí a následně způsobují zhoršování kvality elektrické energie nebo třeba přetoky výkonů do vyšších napěťových soustav. Zároveň se v soustavě stále zvětšují výkonové špičky. Výsledkem je větší přetěžování klíčových prvků soustavy, čímž se zkracuje jejich životnost a zhoršuje ekonomika celého přenosu energie.

Pro budoucnost se ovšem jeví obnovitelné zdroje energie jako ideální zdroje, jelikož nejsou závislé na pomalu docházejících fosilních palivech. Proto nelze předpokládat jejich nasazování v menším měřítku, ale naopak jejich rozšiřování. Problémy, které tyto zdroje produkují mohou být efektivně řešeny vhodně dimenzovaným a umístěným akumulčním systémem. Ty mohou poskytovat celou řadu podpůrných služeb pro elektrizační soustavu od integrace decentralizovaných zdrojů přes frekvenční regulaci až po pokrývání výkonových špiček.

Druhů těchto akumulčních systémů je mnoho s výkony od jednotek kWh až po GWh pro ty největší. Jejich vybíjecí časy jsou obvykle v hodinách, přesto se najdou technologie schopné dodávky v řádech dnů. Většina systémů je stavěna s minimální dobou provozu 10 let, avšak některé technologie mají odhady až na trojnásobek této doby.

Nejpravděpodobnějším systémem, který bude využíván jsou akumulátorové systémy. Ty se jeví jako nejuniverzálnější a mohou být stavěny do velikostí až desítek MW. Mají velmi rychlé odezvy v desítkách milisekund a díky měničům a vysoké přesnosti mohou zastávat každou podpůrnou funkci systému. Právě díky tomu jsou technologií s nejvíce fungujícími projekty a do budoucna se očekává jejich velký rozmach, především potom technologie Li-ion, u které lze očekávat velké nasazení v elektromobilitě a Na-S pro větší systémy.

Dalším favoritem je SNG a H₂. Pokud dojde ke zlepšení účinnosti jejich výroby a zpětné přeměny, která je především u vodíku nízká díky palivovým článkům, najde tato technologie velké uplatnění například u větrných farem. Obě látky mohou být následně transportovány do výhodnějšího místa užití, nebo sloužit jako palivo pro hybridní elektromobily.

Zajímavým přínosem pro budoucnost by mohla být tepelná technologie zkapalněného vzduchu. Ta na rozdíl od ostatních tepelných technologií není vázána na geologické a geografické podmínky, umožňuje skladování energie v jednotkách GWh a má odezvu v řádech sekund. Díky těmto vlastnostem by mohla být v budoucnu alternativou k přečerpávacím elektrárnám.

Pro regulaci frekvence se ukázala jako přínosná technologie setrvačnicku, která má díky nejkratší době odezvy a možnosti velkého výstupního výkonu ideální předpoklady jako doplňkový systém ke klasickým systémům regulace frekvence. Avšak pro její krátkou dobu vybíjení nelze očekávat průlom v jiných podpůrných službách.

Celkově se tedy akumulace jeví jako ideální řešení nově vznikajících problémů v elektrizační síti a řada systémů bude také nápomocná v budování budoucího konceptu inteligentní sítě a elektromobilismu. Jako nejuniverzálnější se jeví akumulátorové systémy. Pro velké systémy pro pokrývání výkonových špiček tepelný systém zkapalněného vzduchu a pro tento obor i elektromobilitu také SNG. Problémem masivního nasazování je v současné době cena systémů, avšak lze očekávat že technicko-ekonomická situace elektrizační soustavy začne nasazení akumulace v blízké době vyžadovat, čímž dojde i ke snížení celkové ceny systémů. Jako technologie pro elektrizační soustavu neperspektivní se ukázaly super kondenzátory (DLC) a systém SMES.

6. Seznam použité literatury

- [1] CIGRÉ a WORKING GROUP C6.15. *Electric energy storage systems* [online]. Paris: CIGRÉ, 2011 [cit. 2017-05-25]. ISBN 978-285-8731-473.
- [2] WEEDY, B. M. *Electric power systems* [online]. 5th ed. Chichester: John Wiley, 2013 [cit. 2017-05-25]. ISBN 978-0-470-68268-5.
- [3] *CIREC: international conference proceedings* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.cired.net>
- [4] *DOE GLOBAL ENERGY STORAGE DATABASE: Office of Electricity Delivery & Energy Reliability* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://www.energystorageexchange.org>
- [5] *Energy Storage Association* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.energystorage.org>
- [6] *Energy Storage Sense: A postdoc trying to make sense of energy storage* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://energystoragesense.com>
- [7] [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/almacenamiento/almacenamiento.html>
- [8] *International Electrotechnical Commission: Grid integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage*. [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-gridintegrationlargecapacity-LR-en.pdf>
- [9] *IEEE Explore: Digital library* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>
- [10] BREEZE, Paul. *Power Generation Technologies: Second edition* [online]. 2014. [cit. 2017-05-25]. ISBN 978-0-08-098330-1.
- [11] *Technology Roadmap: Energy storage*. International Energy Agency [online]. France, 2014 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyStorage.pdf>

7. Seznam obrázků

Obr. 1 - Schéma klasické elektrizační soustavy	- 4 -
Obr. 2 - Topologie inteligentní sítě.....	- 6 -
Obr. 3 - Vnitřní struktura uhlíkové elektrody	- 8 -
Obr. 4 - Princip DLC	- 8 -
Obr. 5 - Schéma supravodivého magnetického akumulárního systému	- 9 -
Obr. 6 – Princip funkce Li- ion.....	- 10 -
Obr. 7 - Řez sodíkovo-sírovým akumulátorem.....	- 12 -
Obr. 8 - Princip funkce Zinek-vzduchové baterie.....	- 13 -
Obr. 9 - Princip funkce VRB	- 14 -
Obr. 10 - Princip funkce přečerpávací vodní elektrárny	- 16 -
Obr. 11 - Náhled do boxu FESS	- 17 -
Obr. 12 - Princip funkce Diabatic metody systému CAES.....	- 18 -
Obr. 13 – Princip funkce palivového článku.....	- 19 -
Obr. 14 – Příklad rozdílu výroby a poptávky s OZE ve výrobním mixu.....	- 22 -
Obr. 15 -Princip distribuované akumulace u větrných farem	- 23 -
Obr. 16 - Porovnání systémů na výkon.....	- 27 -
Obr. 17 - Porovnání systémů na výkon za čas	- 28 -
Obr. 18 - Porovnání velikosti a hmotnosti na kWh.....	- 28 -
Obr. 19 - Porovnání živostnosti systému na efektivitě	- 29 -
Obr. 20 - Fáze technologického vývoje akumulárních technologií	- 29 -
Obr. 21 - Modul Li-ion modulárního systému	- 31 -
Obr. 22 - Skříň modulů	- 31 -
Obr. 23 - Přepínací sekvence OLTC.....	- 32 -
Obr. 24 - Model DC mikrosítě s akumulátorovým systémem	- 33 -
Obr. 25 - Německý CAES "Kraftwerk Huntorf"	- 34 -
Obr. 26 - Blokové schéma SieStorage	- 36 -
Obr. 27 - Uspořádání SieStorage	- 36 -
Obr. 28 - AES Laurel mountain	- 37 -
Obr. 29 - FESS "Beacon Power" v Pensylvánii.....	- 38 -
Obr. 30 - Celosvětové rozložení instalovaných výkonů akumulárních systémů	- 39 -
Obr. 31 - Celosvětové rozložení instalovaných výkonů akumulárních systémů bez PVE.....	- 40 -
Obr. 32 - Porovnání počtu instalací ku instalovanému výkonu	- 40 -

8. Seznam použitých zkratk

<u>Zkratka</u>	<u>Název</u>
CAES	- Systém ukládání energie ve stlačeném vzduchu
DLC	- Super-kondenzátor
FESS	- Setrvačnický
FVE	- Fotovoltaická elektrárna
H ₂	- Vodíkový akumulací systém
Li-ion	- Lithium-ion akumulátor
Metal-air	- Akumulátor kov-vzduch
Na-S	- Sodíkovo-sírový akumulátor
NiCd	- Nikl-kadmiový akumulátor
OZE	- Obnovitelný zdroj energie
Pb	- Olověný akumulátor
PVE	- Přečerpávací vodní elektrárna
RBF	- Redoxní akumulátor
SMES	- Supravodivý magnetický akumulací systém
SNG	- Syntetický zemní plyn
VE	- Větrná elektrárna

9. Seznam tabulek

Tabulka 1 – Vlastnosti super-kondenzátor	- 8 -
Tabulka 2 - Vlastnost supravodivého magnetického úložiště	- 9 -
Tabulka 3 - Vlastnosti Li-ion akumulátorů	- 11 -
Tabulka 4 - Vlastnosti akumulátorů na bázi niklu.....	- 11 -
Tabulka 5 - Olověných akumulátorů	- 12 -
Tabulka 6 - Vlastnosti Na-S akumulátorů	- 13 -
Tabulka 7 - Vlastnosti Zn-air	- 14 -
Tabulka 8 - Vlastnosti vybraných Flow baterií	- 15 -
Tabulka 9 - Vlastnosti přečerpávacích vodních elektráren.....	- 16 -
Tabulka 10 - Vlastnosti FESS	- 17 -
Tabulka 11 - Vlastnosti CAES	- 18 -
Tabulka 12 - Vlastnosti H ₂	- 19 -
Tabulka 13 - Vlastnosti SNG	- 20 -
Tabulka 14 – Porovnání akumulací systémů	- 26 -