

Možnosti akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů

Petr Bača¹

Possibilities of electric power storage from renewable sources

This paper presents an overview of all currently commercially available options of energy storage in the power distribution network. The paper puts forward arguments for energy storage in the distribution network as well as requirements that must be met by the relevant energy storage systems. The paper describes 7 technologies allowing the solution of energy storage problems, including their basic principles and summarizing benefits and drawbacks of individual solutions.

Key words: batteries, flywheels, superkapacitory, SMES, CAES, pumped storage power plant

Úvod

Na počátku 20. století byla běžná distribuce nízkého ss napětí v malých oblastech s vysokou hustotou populace. V těchto distribučních sítích byly často používány akumulátorové systémy jako krátkodobá energetická rezerva a k pokrytí výkonových špiček. Tehdy byly olovené akumulátory jedinou praktickou možností k uchování elektrické energie. Vznik a vývoj přenosových systémů se střídavým napětím umožnil distribuci elektrické energie o vysokém napětí na velké vzdálenosti. Tento vývoj také směřoval k tomu, že již nebylo potřeba souběžného používání akumulátorů. S nárůstem elektrifikovaných oblastí sousedící producenti elektrické energie začali propojovat své rozvodné sítě na společných hranicích - současné distribuční soustavy jsou hustě propojené v mnoha místech, distribuovaný výkon jednotlivých částí je řízený a celkově se jedná o velmi složitý a komplexní systém. Každá jednotka systému také udržuje výkonovou rezervu, která může být v případě potřeby rychle připojena do sítě.

V průběhu většiny dvacátého století spotřebiče připojené do rozvodné soustavy byly analogové, tj. vytvářely sinusoidní proud ze sinusoidního buzení. Typickým příkladem komerčního průmyslového použití jsou pece a motory, které byly přímo napájeny z st. sítě bez dalšího řízení. Tato zařízení měla induktivní charakter s neblahým dopadem na distribuovaný výkon. V tomto období byla stabilita výkonu a spolehlivost systému limitována výkonovou rezervou, napětí na dlouhých trasách bylo regulováno pomocí autotransformátorů a kompenzace jalového výkonu byla prováděna pomocí distribuovaných kondenzátorových baterií a synchronních kompenzátorů.

Od osmdesátých let minulého století bylo uvedeno do provozu mnoho velkých systémů pro akumulaci elektrické energie. Tyto systémy poskytují množství výhod: rychlou rezervu výkonu, pokrytí zvýšených energetických nároků, vyhlazení krátkodobých špiček, stabilizaci napětí/frekvence, kompenzací jalového výkonu. V těchto funkcích je akumulace energie velmi cenná, ale je také drahá. Drtivá většina v současnosti používaných akumulčních systémů je založená na technologii olovených akumulátorů.

Lze shrnout, že v současné době jsou k dispozici následující technologie pro uchování energie:

1. olovené akumulátory (zaplavené, nebo VRLA konstrukce),
2. moderní akumulátory pracující na principu Lithium-Ion, Zinek-Bromid (Zebra akumulátory), Sodík-Síra, průtočné a další,
3. nízko- a vysoko- rychlostní elektromechanické setrvačníky,
4. supravodivý magnetický systém akumulace energie (SMES),
5. superkapacitory,
6. přečerpávací vodní elektrárny,
7. akumulace energie založená na stlačeném vzduchu (CAES).

Poslední dva jmenované systémy se od ostatních liší možností použití v případech, kdy je požadována dodávka velkého množství energie po relativně dlouhou dobu (řádově hodin). Nevýhodou je naopak náběhový čas, za který jsou tyto systémy schopny dodávat energii do sítě, který se počítá na desítky sekund až minut. Nejsou tedy vhodné pro aplikace, které mají zlepšovat kvalitu sítě a snižovat množství jalového výkonu. Tyto dva systémy mají také speciální topologické požadavky, u přečerpávacích elektráren musí být

¹ doc. Ing. Petr Bača, Ph.D., Ústav elektrotechnologie, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká Republika, tel.: +420 541 146 188, baca@feec.vutbr.cz
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 20. 12. 2010)

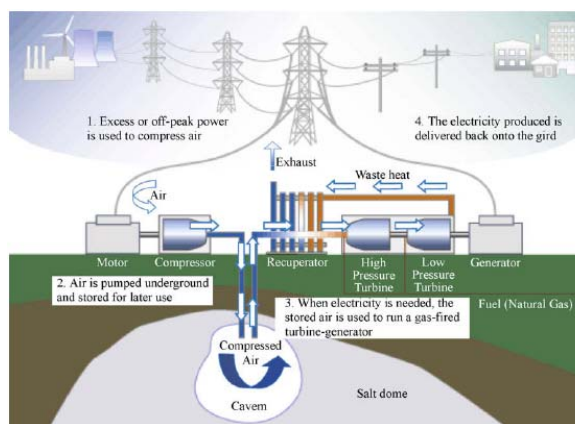
spodní a horní vodní rezervoár, u CAES musí být k dispozici dostatečně velká nepropustná kaverna (vhodné jsou např. solné doly).

Ideální systém na akumulaci energie je takový, který bude dobře splňovat základní atributy:

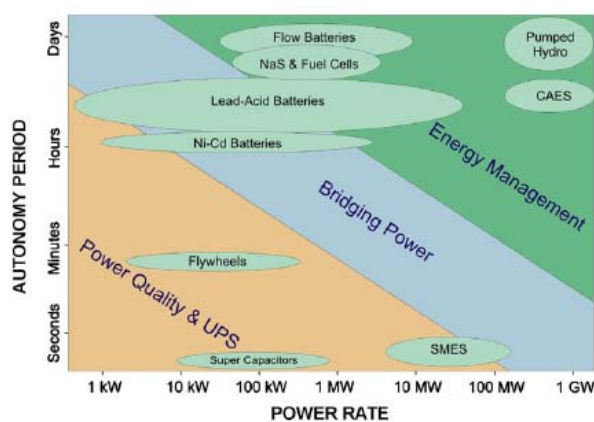
- vysoký výkon (desítky MW),
- vysoká energetická kapacita (desítky MWh),
- rychlá časová odezva (ms),
- možnost kompenzace jalového výkonu,
- vysoká účinnost,
- nízké samovybití,
- možnost samostatného ostrovního provozu,
- nízké pořizovací i provozní náklady,
- neškodící přírodě.

Systémy akumulace energie s olověnými akumulátory mají většinu z výše vyjmenovaných požadavků. Nicméně množství energie dosažitelné z akumulátoru je funkcí vybíjecí rychlosti. Olověné akumulátory, malé SMES a nízkootáčkové setrvačníky jsou technologicky připraveny pro použití v systémech akumulace energie. Mezi těmito možnostmi je nejpropracovanější varianta olověných akumulátorů, které se dodávají v řadě variant pro nejrůznější typy použití. Nízkootáčkové setrvačníky a malé SMES systémy jsou komerčně dostupné. Vysokootáčkové setrvačníky, mega SMES, moderní akumulátory a superkapacitory jsou ve stadiu prototypu, koncepčního modelu nebo funkčního vzorku. Přečerpávací elektrárny jsou samozřejmě zralá technologie, mnoho těchto systémů je v provozu, za příklad slouží Dlouhé Stráně (650MW) v Jeseníkách. Technologie založená na využití stlačeného vzduchu (CAES) je ve velkém měřítku funkční pouze ve dvou provedeních, 290MW systém v Německu (Huntorf) a 110 MW jednotka v USA (Alabama, McIntosh).

Výkonové možnosti a předpokládaná doba použití některých akumulčních systémů jsou schematicky uvedeny na obr. 2. [1]. Z obr. 2 je patrné, že systémy s akumulátory jsou vhodným řešením pro široké spektrum aplikací. Podle výkonových požadavků je SMES také vhodným kandidátem, ale není příliš vhodným pro požadavek dlouhodobého dodávání energie.



Obr. 1. Schematické znázornění systému CAES [2].
Fig. 1. Schematic representation of CAES[2].



Obr. 2. Přehled možností jednotlivých systémů pro akumulaci elektrické energie [1].

Fig. 2. Overview of options for each system for accumulation of electric energy [1].

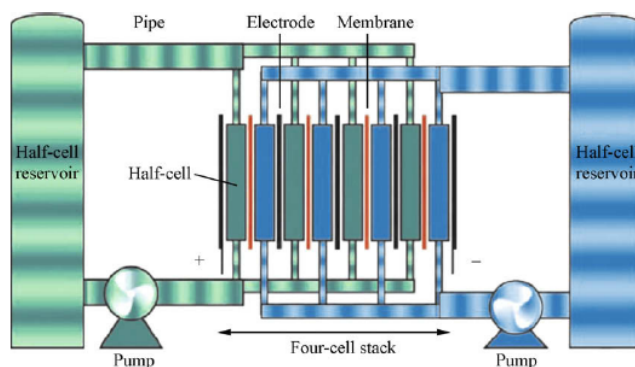
Je třeba ještě poznamenat, že pouze dvě technologie využívají pro ukládání energie přímo elektřiny a to SMES a superkapacitory. Akumulátory ukládají energii v chemické formě; setrvačníky, přečerpávací elektrárny a CAES ukládají energii ve formě mechanické. Ve všech těchto případech je potřeba konverze zpět na elektrickou energii.

Co se perspektivy jednotlivých akumulčních systémů týče je primární využití SMES, setrvačnicků, superkapacitorů především v aplikacích zlepšujících stabilitu systému a snižujících jalový výkon. Akumulátory jsou vhodné pro většinu aplikací a CAES s přečerpávacími elektrárnami jsou vhodné především pro pokrývání každodenních energetických špiček, tj. k pokrytí zvýšených energetických nároků.

Akumulátory

Akumulátory ukládají elektrickou energii v chemické formě do aktivní hmoty elektrochemických článků. Ve většině akumulátorů (Pb, Ni-Mh, Li-Ion) je aktivní hmota součástí elektrod akumulátoru

a kapacita i výkon článku jsou přímo úměrné hmotnosti článku. V dalších elektrochemických systémech, tzv. průtočných akumulátorech, ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{-Br}_2$, $\text{V}^{2+}\text{-V}^{5+}$) je aktivní hmota součástí elektrolytu, který je uložen mimo články a je nuceně vháněn do mezielektrodového prostoru (obr. 3) [2]. V tomto případě je kapacita článku závislá na velikosti externích zásobníků a může být nezávislá na výkonu celého systému.



Obr. 3. Schematické znázornění průtočného akumulátoru [2].
Fig. 3. Schematic presentation of flow battery [2].

Akumulátor dodává ss proud při vybíjení a přijímá ss proud při nabíjení. Tedy je nutná konverze mezi ss a st v obou případech. Mezi všemi technologiemi na akumulaci energie je nejvíce rozšířen systém olověného akumulátoru, protože má velký specifický výkon, akceptovatelnou specifickou energii, relativně nízkou cenu a široké spektrum aplikací. Náběhový čas olověného akumulátoru je typicky kolem 4 ms.

Superkapacitory

Konvenční kondenzátory ukládají energii v podobě elektrického náboje mezi dvěma vodivými elektrodami, které jsou oddělené dielektrickým materiálem. Množství energie takto uložené je dáno:

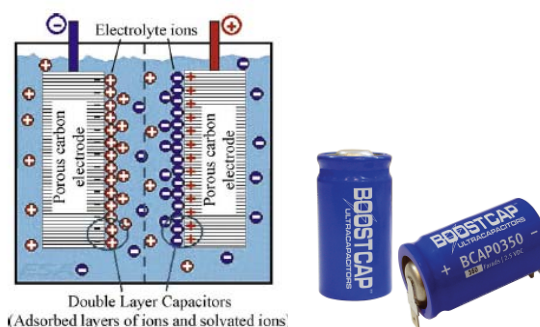
$$W = CV^2/2$$

Kde W je energie v Joulech, C je kapacitance, V je napětí mezi elektrodami. Kapacitance je přímo úměrná ploše elektrod a nepřímo úměrná jejich vzdálenosti:

$$C = KA/d$$

Kde K je dielektrická konstanta materiálu mezi opačně nabitými elektrodami, A je plocha nabitých elektrod a d je vzdálenost mezi nimi.

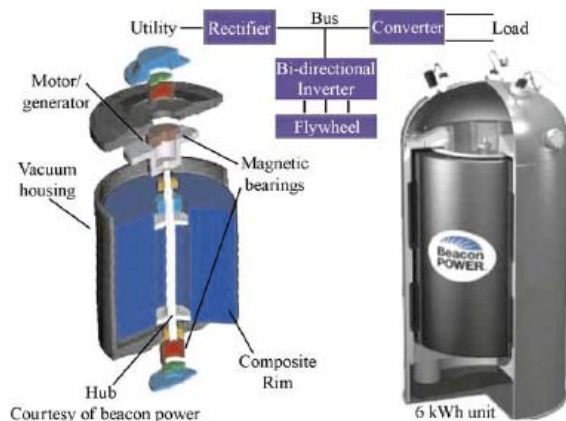
Superkapacitory, na rozdíl od konvenčních kondenzátorů jsou v tomto smyslu více elektrolytické zařízení než elektrostatické. energii ukládají na rozhraní mezi iontově vodivým elektrolytem a elektronově vodivou elektrodou (nejčastěji uhlíkovou), kde se tvoří elektrochemická dvojvrstva. Uhlíkový materiál má velký měrný povrch (více než $2000 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$) a vzdálenost elektrod je řádu několika angstromů. Používané napětí je nízké, typicky 1,5 V pro systémy s vodivými elektrolyty a 3 V pro systémy s nevodivými elektrolyty. Výhodou je jejich specifická energie, která může být tisíckrát vyšší než u konvenčních kondenzátorů, nicméně v porovnání s olověnými akumulátory je specifická energie superkapacitorů relativně nízká (cca 10 Whkg^{-1}). Nicméně nabíjení a vybíjení může probíhat při velmi vysokých rychlostech s teoreticky nekonečnou životností.



Obr. 4. Schematické znázornění superkapacitoru a jeho skutečná podoba [2].
Fig. 4. Schematic presentation of supercapacitor and its real shape [2].

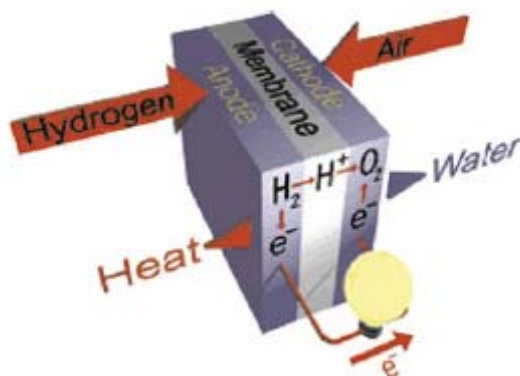
Setrvačníky

Setrvačníky ukládají kinetickou energii do otáčející se hmoty rotoru. Množství energie takto uložené je úměrné hmotě setrvačníku a čtverci jeho úhlové rychlosti. Posledně zmíněná hodnota je limitována pevností v tahu rotorového materiálu. Lehké materiály umožňují vyšší rychlosti než těžké materiály s toutéž pevností v tahu a tudíž mohou uložit více energie na jednotku hmotnosti i jednotku objemu. Vysokootáčkové setrvačníky mají rotory vyrobeny z plastů vyztužených vysocepevnostními vlákny a vydrží rychlosti více než 100 000 otáček za minutu. Nízkooláčkové setrvačníky mají rotory z oceli s rychlostí 10 000 otáček za minutu.



Obr. 5. Schematické znázornění setrvačníku a jeho skutečná podoba [2].
Fig. 5. Schematic representation of the flywheel and its real shape [2].

Setrvačníky mohou poskytnout velmi velký výkon, který je obvykle omezen propojovací výkonovou elektronikou. Největší komerčně používaný setrvačník poskytuje kolem 1,6MW po dobu 10s, nebo 4,5kWh. Jsou často používány v aplikacích zálohovaného napájení (UPS) a protože jejich cena je mnohem nižší než akumulátorů a superkapacitorů, jsou konkurencí akumulátorům v aplikacích s požadavkem vysokých výkonů a nízkých energií. Náběhový čas systému se setrvačником je v řádu desetin ms.



Obr. 6. Schematické znázornění palivového článku vodík - vzduch [4].
Fig. 6. Schematic representation of hydrogen fuel cell - air [4].

Supravodivý magnetický systém akumulace energie (SMES)

SMES systém ukládá energii do magnetického pole, které je produkované proudem tekoucím skrz supravodivou cívku. Když teplota klesne pod kritickou hodnotu ($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$) odpor supravodivé cívky klesne k nule a následně cívka může vést velmi vysoké proudy bez elektrických ztrát. (pozn.: kritická teplota se mění s typem supravodiče, teplota $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ je kritická teplota pro supravodivou cívku používanou v SMES nejčastěji) Jediné ztráty v SMES systému jsou spojeny s chladicím systémem, který je nutný k udržení teploty pod kritickou hodnotou.

Výkon dosažitelný ze SMES systému je limitován pouze omezením výkonové elektroniky. Stejně jako u setrvačnicků, energetická kapacita SMES systému je nízká – několik kWh. Energie z SMES je nezávislá na výkonu. Náběhový čas systému je také funkcí výkonové elektroniky a je pod 4 ms. SMES systémy jsou použitelné všude tam, kde je potřeba rychlé odezvy, vysokých výkonů a nízkých energií, tj. UPS a systémů pro zlepšení kvality přenášeného výkonu.

Vodíkové hospodářství, palivové články

Vyrobenou elektrickou energii lze akumulovat také jinými cestami. Jedním z možných řešení je použití vodíkového hospodářství. Pomocí elektrolýzy lze vytvářet a následně jímat vodík. Ten se poté použije v palivovém článku typu vodík-kyslík (resp. vodík-vzduch) na zpětnou výrobu elektrické energie. Náklady na výrobu a skladování vodíku jsou však vysoké a celková účinnost tohoto systému je se stávajícími technologickými znalostmi nízká – pohybuje se kolem 30-40 % [1]. Ztráty vznikají jednak během výroby vodíku elektrolýzou, jednak během skladování vodíku a jednak během fáze výroby elektrické energie palivovým článkem.

***Poděkování:** Tato práce vznikla v rámci řešení operačního programu EU CVVOZE (CZ.1.05/2.1.00/01.0014)*

Literatura - References

- [1] Kaldellis J.K., Zafirakis D., Kavadias K.: Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical network, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 378–392.
- [2] Chen H., et al.: Progress in electrical energy storage system: A critical review, *Progress in Natural Science* 19 (2009) 291–312.
- [3] Chaparro A.M., et al., *Journal of Power Sources* 144, 2005, 165–169
- [4] DTI REPORT. Review of electrical energy storage technologies and systems and of their potential for the UK. *DG/DTI/00055/00/00, URN NUMBER 04/1876, UK Department of Trade and Industry; 2004, p. 1–34.*