

## Superkondenzátory - Technologicky vyspelé zásobníky energie

Bugár Martin · Elektrotechnika

30.05.2011



V predloženej práci je analyzovaný súčasný stav rozvoja superkondenzátorov ako súčasť vývoja zásobníkov energie pre automobilový vývoj a iné aplikácie. V prvej časti článku sú popísané vlastnosti a princíp činnosti superkondenzátorov. Ďalej práca sa zameriava na efektivitu využívania energie superkondenzátora. V závere sa zhodnocuje životnosť supekondenzátorov a možnosti aplikácie týchto členov ako zdroja energie pre aplikáciu vo vozidlách a elektromobiloch.

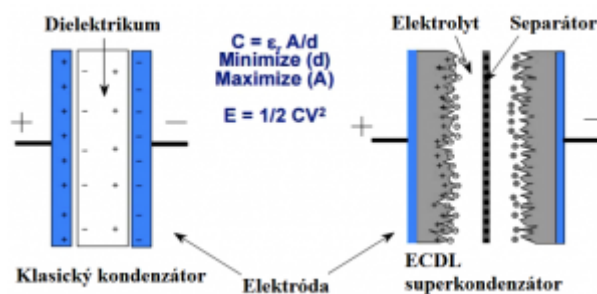
Akumulácia elektrickej energie je jedným z doteraz nedoriešených technických problémov súčasnej doby, kedy stále rastúce nároky na jej spotrebu sú spojené s veľmi rýchlym nárastom jej ceny. V neposlednom rade je to aj otázka jej, "ekologickej" výroby, na ktorú sú vyvíjané tlaky z hľadiska produkovaných emisií. Naskytá sa teda otázka zníženia jej spotreby ako na strane maloodberateľov, tak na strane veľkoodberateľov. K tomu vedie niekoľko riešení ako je konštrukcia nových technológií s podstatne menšou energetickou náročnosťou a v druhom prípade vydanú energiu pri rozbehu opäť s určitou účinnosťou získať späť. K tomu je potrebný energetický akumulátor.

Existujú rôzne metódy pre akumuláciu energie, cez energiu elektrického, respektíve magnetického poľa alebo elektrochemickou metódou, kde táto tradičná metóda vychádza z elektrochemickej premeny - akumulátorov. Problémom tohto spôsobu ukladania je malá objemová a hmotnostná energetická hustota a dlhá doba chemického procesu, ktorá bráni okamžitému poňatiu pomerne veľkého množstva energie. Aj napriek tomu, že došlo v poslednej dobe k výraznému zlepšeniu týchto parametrov (Ni-MH, Li-Ion, Li-Pol akumulátory), stále je tu nevyriešený problém odovzdanie veľkej energie v krátkom intervale a nízka účinnosť energetickej premeny. Existujú aj ďalšie metódy na ukladanie, ktorá ju napríklad uloží vo forme kinetickej energie (zotrvačník).

Tieto metódy už používali pred II. svetovou vojnou Švajčiarske železnice. U týchto metód dochádza k uloženiu cez potrebnú premenu energie z jednej formy do druhej, kde zohráva dôležitú úlohu účinnosť premeny. Z tohto hľadiska splniť požiadavku vysokej energetickej kapacity a vysokej účinnosti spĺňa len nový prvok, ktorý bol vyvinutý vďaka novým dostupným technológiám - superkondenzátorom.

## Princíp funkcie

Superkondenzátor - superkapacitor predstavuje v princípe elektrolytický kondenzátor vyrobený špeciálnou technológiou, ktorá umožňuje dosiahnutie obrovskej kapacity rádovo až do stoviek alebo tisícok faradov. Táto technológia je založená na elektrochemickej dvojvrstve, preto sa superkondenzátory označujú aj skratkou EDLC (Electrochemic Double Layer Capacitor). Energia je v superkondenzátore uložená elektrostaticky, rovnako ako u klasického kondenzátora. Funkciu superkondenzátora možno vysledovať z obr. 1. Po privedení vonkajšieho napätia dochádza k presunu kladných iónov v elektrolyte smerom k zápornej elektróde a k presunom záporných iónov ku kladnej elektróde.



Obr. 1 Štruktúra bežného kondenzátora (vľavo) a superkondenzátora (vpravo) [9]

Jednu z najdôležitejších komponentov superkondenzátorov predstavuje vrstva aktívneho uhlíka, ktorá je nanosená na vnútornú stranu hliníkových elektród, ktoré sú tvorené hliníkovou fóliou. Aktívny uhlík vo forme prášku je tvorený veľmi malými časticami, ktoré v celom objeme vytvárajú veľmi pórovitý povrch, ktorého plocha je obrovská. Výrobcovia uvádzajú hodnotu až 2000 m<sup>2</sup> na jeden gram prášku. Aktívny uhlík je tvorený uhlíkovým aerogélom. Ide o pevný materiál s nízkou hustotou vzniknutý nahradením tekutej zložky gélu vzduchom. Ďalším používaným materiálom sú uhlíkové polyméry. Materiálom budúcnosti sú uhlíkové nanotrúbice, ktoré ešte podstatne zvyšujú povrch častíc. Elektródy kondenzátora sú oddelené separátorom (polypropylénová fólia) a sú obklopené elektrolytom, ktorý je tekutý alebo vo forme gélu.

Hrúbka dielektrika (el. dvojvrstvé) je veľmi malá, rádovo 10<sup>-10</sup> m. Práve vďaka kombinácii obrovskej plochy a veľmi tenkej dvojvrstvy sa dosahuje veľkej schopnosti viazať náboj a teda vysokej kapacity superkondenzátora pri malom sériovom odpore. Určitou nevýhodou, vzhľadom k vlastnostiam elektrolytu a možnému prerazu elektrickej dvojvrstvy, je nízke prevádzkové napätie, ktorého hodnota sa pohybuje v rozmedzí 2,3 - 2,7 V, v prípade veľmi používaného organického elektrolytu. Pre väčšie napätie je potrebné radiť superkondenzátor do série, čo však vyžaduje použitie ochranných balančných obvodov.

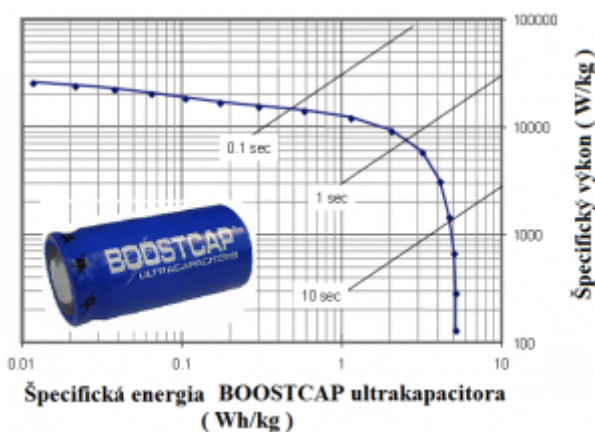
Superkondenzátor možno vďaka svojim vlastnostiam zaradiť medzi akumulátor a bežný elektrolytický kondenzátor. V porovnaní so štandardným elektrolytickým kondenzátorom dosahuje vysokej energetickej hustoty (jednotky Wh / kg) a v porovnaní s akumulátormi má vyššiu výkonovú hustotu (jednotky až desiatky kW / kg), ale stále ešte niekoľkokrát nižšiu energetickú hustotu. V Tab. 1 je uvedené porovnanie vybraných vlastností vybraných zásobníkov elektrickej energie.

Tab. 1 Porovnanie vlastností oloveného akumulátora, superkondenzátora a

elektrolytického kondenzátora [9]

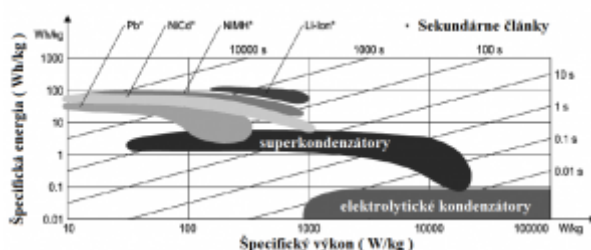
	Olovený akumulátor	Superkondenzátor	Elektrolytický kondenzátor
nabíjacia doba	1 až 6 h	0,3 až 30 s	$10^{-3}$ až $10^{-6}$ s
vybíjacia doba	0,3 až 3 h	0,3 až 30 s	$10^{-3}$ až $10^{-6}$ s
energetická hustota [Wh/kg]	10 až 100	1 až 10	< 0,1
výkonová hustota [W/kg]	< 1 000	< 10 000	< 100 000
počet cyklov	1 000	> 500 000	> 500 000
účinnosť	0,7 až 0,85	0,85 až 0,98	> 0,95

Vďaka tomu, že superkondenzátor ukladá energiu na základe elektrostatického princípu, je schopný túto energiu uložiť aj vydať podstatne rýchlejšie ako akumulátor, v ktorom prebieha elektrochemická premena. Tiež vnútorný odpor superkondenzátora je menší než vnútorný odpor akumulátora.



Obr. 2 Závislosť vydania špecifického výkonu superkondenzátora pri danej špecifickej energii počas časových intervalov [9]

Vzhľadom k týmto vlastnostiam je superkondenzátor vhodný pre krátkodobé uloženie elektrickej energie. Týchto ponúkaných vlastností je možné aplikačne využiť práve v oblasti energetiky dopravy, kde dochádza k prenosu energie medzi vozidlom a vedením a v určitom okamihu eventuálne k jej mareniu (elektrodynamické brzdenie). Moderné vozidlá elektrickej trakcie dokážu kinetickú energiu pri brzdení premeniť späť na energiu elektrickú a vracajú ju v dostatočnej kvalite späť do trakčnej siete.



Obr. 3 Porovnanie rôznych zdrojov elektrickej energie s ohľadom na mernú energiu a výkon [8]

Proces rekuperácie energie späť do trakčnej siete má však v prípade vozidiel jednosmerného systému jednu dôležitú podmienku a síce, že bude rekuperovaná energia ihneď spotrebovávaná v inom vozidle alebo u trakcie so striedavým napätím vrátená späť do rozvodnej energetickej siete. Táto podmienka je často ťažko splnitelná a kinetická energia sa musí mariť v brzdových odporoch či mechanických brzdách. Tu sa teda ponúka myšlienka akumulácie rekuperovanej energie v čase, keď nemôže byť spotrebovaná a na tento účel je práve veľmi vhodný superkondenzátor.

Ďalšie uplatnenie nachádza tento moderný akumulačný prvok v oblasti osobných i nákladných cestných vozidiel, kde mohutný rozvoj automobilovej techniky používajúci na pohon spaľovacie motory prináša vážne problémy s exhalátmi najmä vo veľkých mestských aglomeráciách. V neposlednom rade je nutné sa zamyslieť aj nad problematikou využívania palív, ktorá sa pre spaľovacie motory používajú z neobnoviteľných zdrojov. Táto situácia si vyžaduje podniknúť výraznejšie kroky v oblasti uplatnenia elektromobilov, ktoré už nachádzali uplatnenie pred viac ako sto rokmi. A už vtedy sa ukázalo, že najväčším problémom brániace masovému použitiu bude akumulácia energie. Klasické akumulátorové systémy, aj keď v poslednej dobe doznali veľkého zlepšenia svojich parametrov, nespĺňajú požiadavky na ne kladené.

Už aj tu sú kladené vysoké nároky na akumulačné prvky z hľadiska dynamiky príjmu a výdaja energie a klasický akumulátor sa javí ako nedostatočne účinný, vplyvom pomalej chemickej premeny elektrickej energie na chemickú a naopak. A tu nachádza superkondenzátor ďalšiu možnosť využitia.

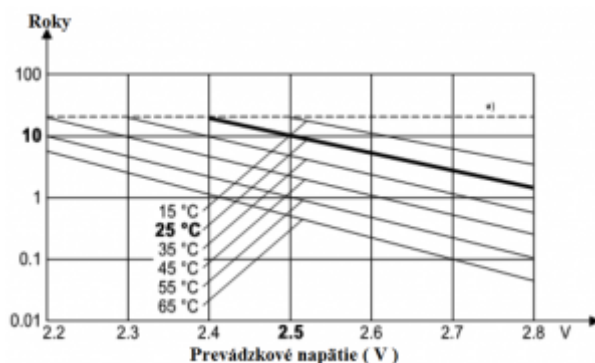
Hybridný pohon je dnes aplikovaný ako na cestných vozidlách, tak môže prichádzať aj úvahy u vozidiel nezávislej trakcie s elektrickým prenosom výkonu. Avšak túto cestu cez hybridné pohony možno do budúcnosti považovať za dočasnú, pretože vedie k značnej zložitosti celého pohonu vzhľadom k jeho vyššej hmotnosti a menšej účinnosti a v neposlednom rade k novej vyššej poruchovosti. Hlavné svetové výrobcovia automobilovej techniky z uvedených dôvodov venujú preto maximálne úsilie oblasti pohonných systémov s alternatívnymi zdrojmi s priamym elektrickým pohonom a tento vývoj smeruje k palivovým článkom.

### **Efektivita superkondenzátorov a jeho životnosť**

Efektivita s akou dochádza k ukladaniu energie do superkondenzátora a efektivita jej znovu využívania závisia podstatnou mierou na účinnosti prenosu výkonu medzi bodom odberu / zdrojom nadbytočnej energie a superkondenzátorom. Predovšetkým sa jedná o účinnosť zvyšovacieho / znižovacieho meniča napätia, ktorý je zvyčajne prítomný a ku ktorému je pripojený superkondenzátor. Ďalej sú to ohmické straty v prenose elektrickej energie. Účinnosť samotného superkondenzátora je veľmi vysoká (až 98%).

Životnosť superkondenzátora je v porovnaní s akumulátormi ďaleko vyššia. Výrobcovia uvádzajú až 1 milión nabíjacích / vybíjacích cyklov, pričom aj po dosiahnutí tohto limitu je superkondenzátor stále schopný funkcie, avšak so zhoršenými vlastnosťami (znížená kapacita, zvýšený vnútorný ekvivalentný sériový odpor - ESR). Vplyvom cyklického nabíjania a vybíjania sa znižuje kapacita a zvyšuje sa ESR.

Koniec životnosti je definovaný pre pokles nominálnej kapacity o 20% alebo zvýšenie ESR o 100%. Ďalším faktorom, ktorý ovplyvňuje kapacitu a ESR superkondenzátora, je teplota a prevádzkové napätie. Udávaná životnosť (až 10 rokov) platí pre teplotu superkondenzátora 25 ° C, každým ďalším zvýšením teploty o 10 ° C sa životnosť znižuje na polovicu! Napr. pri trvalej prevádzke s teplotou 65 ° C je životnosť necelý 1 rok! Taktiež pri prevádzke na napätí vyššom než menovitom dochádza k rapídному zníženiu kapacity a teda životnosti.



Obr. 4 Životnosť superkondenzátora v závislosti na prevádzkovom napätí [9]

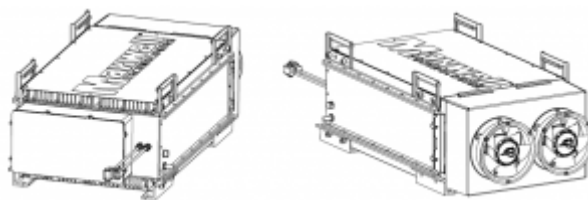
Pri návrhu systému je nutné tieto faktory brať do úvahy, pretože budú podstatnou mierou ovplyvňovať výslednú kapacitu superkondenzátora. Veľkým kladom je nezávislosť aktuálnej hodnoty kapacity na teplote, čo je nesporná výhoda oproti akumulátorom, ktoré trpia výrazným poklesom kapacity pri nízkych teplotách. Vnútorňý odpor (ESR) sa so znižujúcou teplotou zvyšuje, čo je dané zníženou schopnosťou pohybu iónov v elektrolyte.

V praxi je nutné jednotlivé superkondenzátory sério-paralelne spájať do takzvaných kondenzátorových batérií z dôvodu veľmi nízkeho napätia jedného superkondenzátora (cca 2,5 V). Vďaka toleranciam vo výrobe majú kondenzátory rovnakého typu rôzne parametre (C, ESR, samovybíjací prúd). Ich sériové spojenie tak prináša problém nerovnakého rozloženia napätia na jednotlivých elementoch. Riešením je použitie pasívnych alebo aktívnych balančných obvodov. Pasívne riešenie spočíva v trvalom pripojení odporu paralelne ku svorkám superkondenzátora. Veľkosť tohto odporu závisí na zvodovom prúde kondenzátora a na požadovanej rýchlosti vyrovnania napätia (táto doba sa môže pohybovať v rádoch hodín alebo dní).

Tento spôsob sa používa v aplikáciách s nízkou dynamikou výmeny elektrickej energie, napríklad u záložných zdrojov. Nevýhodou tohto riešenia sú zvýšené straty a znížená účinnosť. Druhou možnosťou je použitie aktívneho balančného obvodu, ktorý podľa aktuálnej situácie vyrovnáva napätie na jednom alebo medzi dvoma susednými prvkami (jedná sa o komparátor s presnou referenciou, ktorý v prípade nutnosti pripína vybíjací odpor na svorky kondenzátora). Toto riešenie je nutné použiť v aplikáciách, kde dochádza k rýchlemu striedaniu nabíjajúcich a vybíjajúcich cyklov, napríklad pohon vozidla.

Svetoví výrobcovia superkondenzátorov (napr. Siemens, Maxwell, Epcos) ponúkajú rôzne typy superkondenzátorových batérií (modulov). Ako príklad uveďme napríklad modul od firmy Epcos s kapacitou 220 F / 56 V (odpovedá "kapacite" 3,3 Ah). Tento modul je zložený z 24 superkondenzátorov 5000 F / 2,5 V s aktívnym vyrovnávaním

napätia. Celková hmotnosť modulu je 30 kg, merná výkonová hustota je 1,6 kW / kg, merná energetická hustota 3 Wh / kg, vnútorný odpor 8 m $\Omega$ .

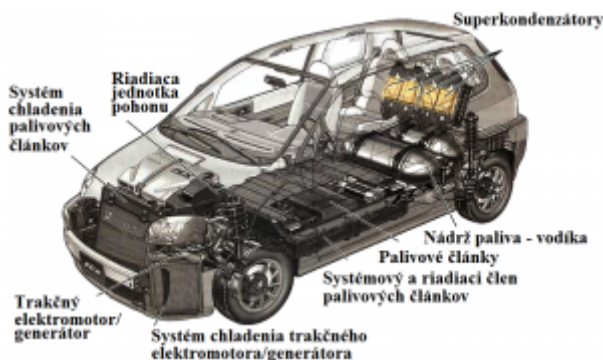


Obr.5 Superkondenzátor Maxwell [9]

## Využitie superkondenzátora ako zdroja energie pre elektromobil

Dnešné možnosti konštrukcie kondenzátorov nám umožňujú aplikovať poznatky pre konštrukciu superkondenzátorov a tým implementovať zariadenia do elektromobilov pre správnu funkciu počas pohybu elektromobilu. Klasický kondenzátor ako bolo spomenuté má rádovo stovky mikrofaradov a u superkondenzátorov kapacita dosahuje tisíc faradov, pričom hustota energie je desaťkrát až stokrát vyššia než u olovených akumulátorov. Počet nabíjacích cyklov sa počíta v stotísícoch až miliónoch. Superkondenzátory majú výrazne obmedzené množstvo ampérhodín ktoré dokážu poskytnúť elektromobilu, oproti tradičným akumulátorom, ktoré dokážu trvalejšie dodávať požadované množstvo ampérhodín.

Superkondenzátory a články superkondenzátorov do celkov sú vhodné pre jazdnú dynamiku, pre pokrytie špičkového výkonu pri prudkej akcelerácii elektromobilu , v ťažkom teréne alebo stúpaní, kedy bežný zdroj energie ako je akumulátor alebo palivový článok nestačí. Výhodou je aj ukladanie elektrickej energie generovanej pri brzdení a tak zlepšiť celkovú energetickú bilanciu elektromobilu.



Obr.6 Elektrická hnacia sústava osobného vozidla s využitím superkondenzátorov [10]

## Záver

Superkondenzátory sú v súčasnej dobe na takej technologicky vyspelej úrovni , že pre jazdnú dynamiku elektromobilu a v jazdnom cykle je vhodné použiť ich minimálne s jedným alebo viacerými zdrojmi elektrickej energie. Možnosti zlepšenia kapacity supekondenzátorov ponúkajú nanotechnológie. Konkrétne pórovitý uhlík by mohla nahradiť pena zostavená z obrovského množstva nanotrubic .Vďaka tomu bude možno docieľiť takej kapacity, ktorá bude zrovnateľná s najdokonalejšími chemickými akumulátormi a tak použiť superkondenzátory ako jediný vhodný zdroj energie pre energetickú náročnosť elektromobilu počas jazdy.



## Použitá literatúra

1. MINDL, Pavel, ČEŘOVSKÝ, Zdeněk. Hybrid drive with super-capacitor energy storage. FISITA 2004 World Automotive Congress. Barcelona, 23 - 27 May, 2004.
2. RUFER, A., HOTELLIER, D., BARRADE, P. A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks. IEEE Transactions on Power Delivery. Volume 19, Issue 2, April 2004. Page(s): 629 - 636. ISSN 0885-8977.
3. ELSTNER, Vlastislav. Akumulace rekuperované energie v dopravě. In Sborník EPVE Elektrické pohony a výkonová elektronika. Brno : VUT Brno, 2004. s. 43-48. ISBN 80-214-3052-4.
4. A. Kusko and J. DeDad, "Stored energy - Short-term and long-term energy storage methods," IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 13, no. 4, pp. 66- 72, July-Aug. 2007.
5. H. Yoo, S.K. Sul, Y. Park, and J. Jeong, "System integration and power-flow management for a series hybrid electric vehicle using supercapacitors and batteries," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, no. 1, pp. 108-114, Jan./Feb. 2008
6. P. Thounthong, S. Raël and B. Davat, "Analysis of supercapacitor as second source based on fuel cell power generation," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 24, no. 1, pp. 247-255, March 2009
7. J. Bauman and M. Kazerani, "A comparative study of fuel-cell-battery, fuel-cell-ultracapacitor, and fuel-cell-battery-ultracapacitor," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 57, no. 2, pp. 760-769, March 2008.
8. Webové stránky a firemná literatúra firmy EPCOS ([www.epcos.com](http://www.epcos.com)).
9. Webové stránky a firemná literatúra firmy Maxwell ([www.maxwell.com](http://www.maxwell.com)).
10. Webové stránky a firemná literatúra firmy Honda (<http://world.honda.com/FuelCell/FCX/ultracapacitor/>)

---

Spoluautorom článku je Ing. Vladimír Staňák, Katedra mechaniky FEI STU, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

---