

Zvýšení účinnosti rekuperace na tramvajové trati

Vlastislav Elstner

Katedra elektroenergetiky a ekologie, Západočeská univerzita v Plzni

Improvement of recuperation efficiency on tram-line

Abstract

Methods and facilities which can be used for storage inertia mass energy of electric traction vehicle. If recuperated energy can't be absorbed immediately in other vehicle, that energy must be aborbed or accumulated. Storage equipment is profitable located nearly the place, where vehicles change speed. There're not problems with power dissipation of traction mains and special-purpose vehicle. Electrical-based storage equipments use super capacitors.

Keywords

University of West Bohemia, electric traction, super capacitor, power accumulators

Úvod

S rostoucí spotřebou a cenou energií rostou i nároky na optimální hospodaření s elektrickou energií v dopravě. To se týká samozřejmě i provozu městských drah, tramvajů, metra a trolejbusů.

Náklady na elektrickou energii představují podstatnou část provozních výdajů. Přešlé průzkumy a zkoušky ukázaly, že vozidlo musí v provozu mařit při brzdění kinetickou energii odpovídající 40% celkové spotřebované energie.

Moderní vozidla elektrické trakce dokáží tuto kinetickou energii při brzdění zpět přeměnit na energii elektrickou a vracet ji v dostatečné kvalitě zpět do trakční sítě. Proces rekuperace energie zpět do trakční sítě má však jednu důležitou podmínku a sice, že bude rekuperovaná energie ihned spotřebovávána v jiném vozidle nebo navrácena zpět do rozvodné energetické sítě. Tato podmínka je často obtížně splnitelná a kinetická energie se musí mařit v brzdových odporících či mechanických brzdách.

Významným zefektivněním provozu elektrické trakce, je tedy doplnit schopnost trakční sítě dostatečně akumulovat rekuperovanou energii v okamžiku, kdy nemůže být spotřebována.

Elektrické akumulátory

Nejsledovanějšími vlastnostmi těchto akumulátorů jsou, schopnost pojmout dostatečně velké množství energie (pro tramvaj alespoň 1 – 3 kWh), dostatečná dynamika při příjmu i výdeji energie (pro tramvaj alespoň 700 kW), vysoká účinnost, hustota energie [Wh/kg] a pro mobilní akumulátory i měrný výkon [kW/kg]. Těmto požadavkům nejlépe vyhovují akumulátory na bázi kondenzátorových baterií, superkondenzátorových baterií a elektrochemických článků.

Srovnání důležitých parametrů elektrických akumulátorů je možné v tabulce 1. Pro úplnou představu nároků na akumulátor uvádím v tabulce 2 běžné parametry pro intervaly rozjezdu a brzdění tramvajů a metra.

Tabulka 1: Parametry elektrických akumulátorů

Parametr	Akumulátor na bázi kondenzátoru	Elektrochemický akumulátor	Akumulátor na bázi superkondenzátorů
Nabíjecí doba	$10^{-3} - 10^{-6}$ s	1 – 5 hod	0,3 – 30 s
Vybíjecí doba	$10^{-3} - 10^{-6}$ s	0,3 – 3 hod	0,3 – 30 s
Měrná energie	0,1 Wh/kg	10 – 100 Wh/kg	1 – 10 Wh/kg
Měrný výkon	100 000 W/kg	1 000 W/kg	10 000 W/kg
Životnost	500 000 a více cyklů	1 000 cyklů	500 000 cyklů
Účinnost nabíjení a vybíjení	95 a více %	70 – 85 %	85 – 98 %

Tabulka 2: Charakteristické parametry vozidel

Typ vozidla	Tramvaj	Metro
Doba rozjezdu [s]	12 - 15	25 - 30
Doba brzdění [s]	10 - 13	20 - 25
Hmotnost [t]	do 70	do 360
Kinetická energie [kWh]	1 – 3	10 - 20

Z tabulky 1 jasně vyplývá nevhodnost klasického kondenzátoru, pro jeho nízkou hustotu energie. Akumulační zařízení na bázi klasického kondenzátoru by bylo velmi rozměrné a pro mobilní použití přímo ve vozidle nepoužitelné.

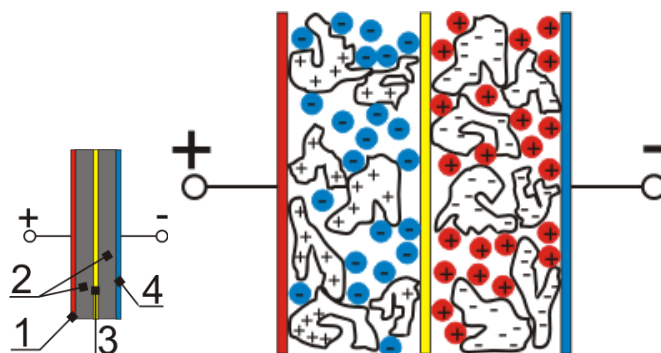
Elektrochemický akumulátor nesplňuje požadavky na dynamiku, délka jeho nabíjecího a vybíjecího cyklu se pohybuje v řádech hodin a ani z hlediska měrného výkonu a účinnosti nabíjení není vhodný pro střednědobý, špičkový cyklus, který požadujeme.

Požadavkům na akumulátor pro trakci svými parametry nejlépe vyhovuje superkondenzátor. Podívejme se na životnost superkondenzátorové baterie hypoteticky umístěné stabilně u tramvajové trati, po které projede denně 270 souprav, což odpovídá frekventované diagonální lince, jako například linka č. 4 v Plzni. Životnost superkondenzátorového akumulátoru vychází na 5 let provozu. Za tuto dobu je zařízení nejen schopno pokrýt úsporami elektrické energie své pořizovací náklady, ale přinést i další užitek, proto soudím, že má rozhodně smysl zabývat se praktickými aplikacemi superkondenzátorových akumulátorů v elektrické trakci a to zejména v případě frekventovaných tramvajových tratí.

Skladba superkondenzátorové buňky

Jedná se o dvouvrstvý elektrochemický kondenzátor, který se podobá spíše klasickému kondenzátoru než elektrochemickému článku. Je založen na elektrostatickém uložení

náboje. Typická dvouvrstvá struktura superkondenzátoru je na obrázku 1. Skládá se z kladné elektrody tvořené hliníkovou fólií 1., vrstvami aktivních elektrod 2., separátorem 3. a zápornou elektrodou 4. také z hliníkové fólie.



Obrázek 1: Struktura článku superkondenzátoru

V nenabitém stavu jsou ionty rovnoměrně rozloženy ve vodivé tekutině, tekutém nebo gelovém elektrolytu, který se nachází mezi elektrodami. Po přiložení napětí na elektrody se začnou záporné ionty pohybovat ke kladné elektrodě a naopak kladné ionty k záporné elektrodě. Na obou elektrodách se tak vytvoří dvojrstvá se zrcadlovým rozložením elektrického náboje. Velikost přiloženého napětí je omezena hodnotou disociačního napětí. Velikost průrazného napětí je velmi nízká, provozní napětí je proto nejčastěji 2,3 V.

Aktivní elektroda na vnitřní straně hliníkových elektrod je tvořena aktivním uhlíkem. Ten se vyznačuje vysokou porézností a tím i velkou plochou povrchu zrn. Lze dosáhnout povrchu elektrod až 200 m²/g při tloušťce dvojrstvy do 10 nm. To představuje kapacitu tisíců F ve velmi malém objemu. Současně také zaručuje velmi nízký odpor přívodních elektrod. Tato vlastnost zaručuje vysokou rychlost nabíjecího a vybíjecího procesu a nízké ohmické ztráty při provozu. Například superkondenzátor s parametry 600 F / 2.3 V má rozměry 4 x 6 x 9 cm a váží pouze 290 g. Jeho měrný výkon (vztahený k objemu i hmotnosti) je tak v porovnání s elektrolytickým kondenzátorem přibližně 100 x vyšší.

Aktivní uhlík je tvořen uhlíkovým aerogelem. Jde o pevný materiál s nízkou hustotou vzniklý nahrazením tekuté složky gelu vzduchem. Dalším používaným materiálem jsou uhlíkové polymery. Materiálem budoucnosti jsou uhlíkové nanotrubičky, jež ještě podstatně zvyšují povrch částic.

Detail polarizace struktury superkondenzátoru je naznačen na obrázku 1 vpravo.

Superkondenzátorová baterie

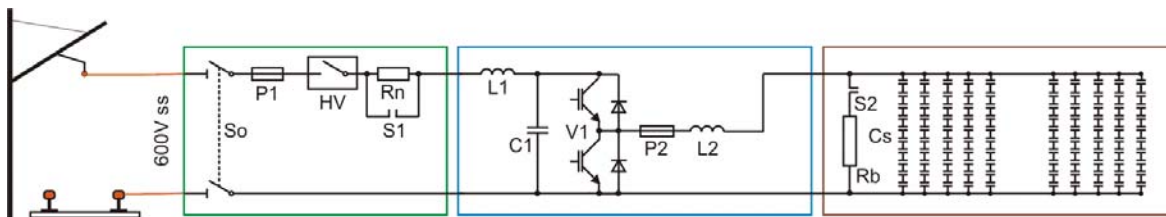
Maximální napětí superkondenzátoru závisí na druhu použitého elektrolytu a pohybuje se v rozmezí 1,2 – 3V. Pro použití superkondenzátoru ve spolupráci s výkonovým měničem napětí a sítí elektrické trakce je nutné mít kondenzátorovou baterii na podstatně vyšší napětí. Tento problém se řeší sériovým spojením superkondenzátorů na úkor jejich kapacity. Protože každý superkondenzátor může mít lehce jinou kapacitu, je nutné pro rovnoměrné rozložení napětí doplnit kondenzátory paralelními rezistory nebo aktivním děličem napětí. Sledovanou vlastností superkondenzátoru je proto velikost vnitřního sériového odporu. Stárnutí superkondenzátoru se projevuje zvyšováním vnitřního sériového odporu a snižováním kapacity.

V praktických provedeních pro elektrickou trakci se používají sérioparalelní zapojení superkondenzátorů na napětí okolo 600 V s kapacitou v rozmezí 60 - 80 F.

Stacionárního superkondenzátorový akumulátoru pro el. trakci

Superkondenzátorový akumulátor samozřejmě nemůže být tvořen pouze samotným superkondenzátorem. Pro využití veškeré energie uložené v superkondenzátoru je nutný vhodný polovodičový měnič, který je schopen pracovat v režimu zvyšování napětí – odčerpávání energie ze superkondenzátoru, i režimu snižovacím pro regulaci nabíjení kondenzátoru. Nabíjecí a vybíjecí výkon kondenzátoru je omezen oteplením superkondenzátorového článku.

Dále uvádím obvodová schémata jednotlivých bloků s popisem – obrázek 2. Celé zařízení lze rozdělit do tří základních bloků. Zeleně označený blok představuje vstupní obvody s elektrickými přístroji. Modře označený blok představuje část měniče s polovodičovými prvky a filtry. A konečně hnědě označený blok představuje vlastní baterii superkondenzátorů s nouzovými el. přístroji.



- | | |
|---|--|
| So – Odpojovač akumulátoru | V1 – Měnič napětí – blok IGBT tranzistorů a diod |
| P1 – Hlavní pojistka silových obvodů | P2 – Ochranná pojistka |
| HV – Hlavní vypínač – stejnosměrný rychlovypínač | L2 – Tlumivka pro zvyšovací chod měniče |
| Rn – Nabíjecí odpor | S2 – Stykač nouzového vybíjení kondenzátorové baterie |
| S1 – Provozní stykač k přemostění Rn | Rb – Vybíjecí odporník pro nouzové vybití |
| L1 – Tlumivka filtru | Cs – Sada superkondenzátorů |
| C1 – Kapacitor filtru | |

Obrázek 2: Zapojení stacionárního akumulátoru pro elektrickou trakci

Z obrázku 2. je patrná jistá analogie s trakčním obvodem samotného vozidla. Tato skutečnost přináší možnost využít stejné elektrické přístroje, zejména hlavní vypínač HV, jako jsou použity na hnacím vozidle. Stejně tak je tomu u měniče, lze požit shodný modul s IGBT tranzistory a zpětnými diodami jaký je použit u trakčního střídače.

Závěr

V současné chvíli se superkondenzátorový akumulátor jeví jako nejvhodnější akumulátor rekuperované energie, technicky nejjednodušší a ekonomicky nejvýhodnější. Z bezpečnostních a důvodů nedostatku prostoru ve vozidle se počítá s umístěním superkondenzátorového akumulátoru stacionárně u tramvajové trati. Umístění na vozidle však nabízí řadu dalších výhod a snížení ztrát o ztráty na vedeních. V prezentaci k článku budou zmíněny konkrétní hodnoty dosažitelných úspor el. energie na skutečné tramvajové lince.

Literatura

[1] Superkapacitory, Antonín Vojáček, <<http://elektronika.cz/>>, 5.10.2006

[2] Výsledky výzkumu pro PmDP za rok 2007

Publikace byla zpracována za podpory projektu MŠMT 1M06059 v rámci programu výzkumná centra.