

Jiří Bryhcín – Jaroslav Sadský – Zdeněk Peroutka – Pavel Drábek

Rešerše aktuálních trendů v oblasti rekuperace trakčních vozidel

Rešeršní výzkumná zpráva

Pracovní balíček:

8 – Rekuperace

Rok řešení:

2013



Pracoviště: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Výzkumná zpráva č.: **22190-032-2013**

Rešerše aktuálních trendů v oblasti rekuperace trakčních vozidel

Druh úkolu: **Rešeršní výzkumná zpráva**

Řešitelé: **Ing. Jiří Brychcín, Ing. Jaroslav Sadecký prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D., doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.**

Vedoucí úkolu: **prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**

Počet stran: **21**

Datum vydání: **říjen 2013**

Revize: **1**

Tento příspěvek vznikl s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094, s podporou projektu SGS-2012-071 a s podporou projektu TE01020038.

Anotace

Tato práce se zabývá využitím kinetické energie pro rekuperační procesy trakčních vozidel. Zejména jde o použití superkapacitorů pro rekuperaci energie přímo v trakčních vozidlech a rekuperaci energie do střídavé sítě a stejnosměrné sítě. V této rešerši jsou vyzdvihnuty jak teoretické aktuálně řešené vědecké práce, tak i konkrétní technologie, které využívají společnosti, jako jsou například ABB, Bombardier, Siemens a Škoda transportation.

Seznam symbolů a zkratk

TCR	Thyristor controlled rectifier
SDR	Silicon diode rectifier
RTCR	Reversible thyristor controlled rectifier
ESS	Energy storage system
DC	Direct current
AC	Alternating current

Obsah

1	ÚVOD.....	4
2	POUŽITÍ SUPERKAPACITORŮ PRO REKUPERACI	5
2.1	Rekuperace energie pomocí DC-DC měniče	5
2.2	Systém MITRAC pro akumulaci rekuperované energie	6
2.3	Zařízení pro skladování rekuperované energie.....	8
2.4	Nová topologie měniče pro akumulaci rekuperované energie	9
3	REKUPERACE BRZDNÉ ENERGIE DO STŘÍDAVÉ SÍTĚ.....	11
3.1	Náhrada diodového usměrňovače tyristorovým.....	11
3.2	Vrácení rekuperované energie do sítě pomocí střídače	13
4	REKUPERACE BRZDNÉ ENERGIE DO STEJNOSMĚRNÉ SÍTĚ	15
4.1	Aktivní rekuperační brzdění	15
5	ZÁVĚR.....	17

1 Úvod

S přibývajícím důrazem na efektivnější využívání energií dochází k vývoji systémů, které se snaží využít kinetickou energii vznikající při brzdění. Při rekuperačním brzdění pracuje elektrický stroj v generátorickém režimu a získaná energie může být uchována v akumulacním prvku (akumulátor, superkapacitor), nebo vrácena do sítě. Při intenzivním provozním režimu lze u trakčních vozidel, zejména v městském provozu, rekuperovat až 25% energie. Protože brzdění probíhá v krátkém časovém intervalu s velkým množstvím energie, je možnost ukládání energie omezena.

Nejběžnějšími akumulacími prvky vhodnými pro rekuperaci jsou například

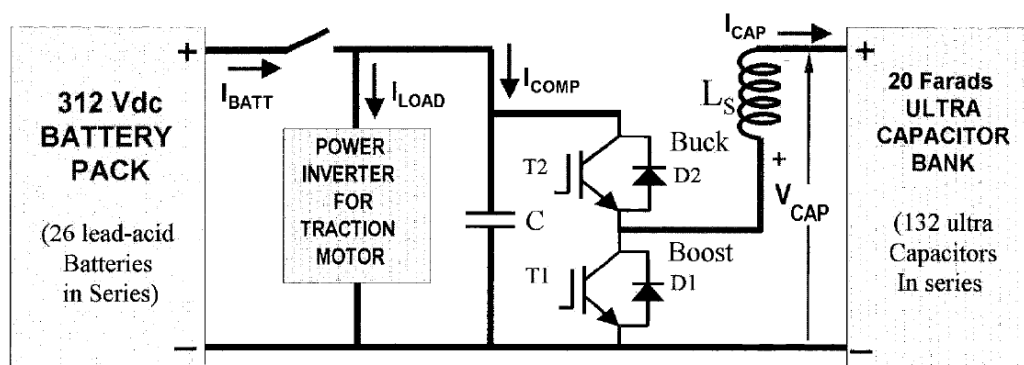
- Olověné akumulátory,
- NiMH baterie,
- Li-Ion baterie,
- Li-Pol baterie,
- Superkondenzátory

V současné době je především zájem o baterie na bázi lithia a superkondenzátory. Použití superkondenzátorů prodlužuje životnost baterie. Důležité vlastnosti energetických akumulátorů jsou měrný výkon [W/kg] a měrná energie [Wh/kg].

2 Použití superkapacitorů pro rekuperaci

2.1 Rekuperace energie pomocí DC-DC měniče

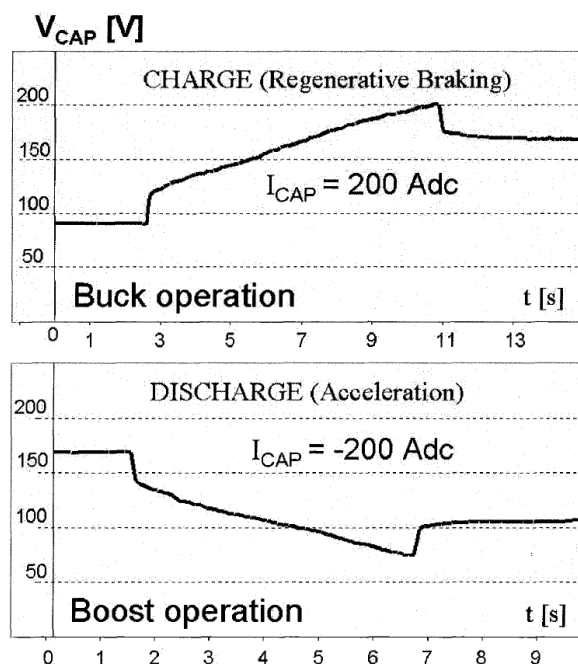
V článku [1] je popsána realizace zařízení pro rekuperaci brzděné energie pomocí ultrakapacitorů. Zařízení využívá DC-DC měnič, který je připojen mezi ultrakapacitor a hlavní baterii. Systém umožňuje vyšší zrychlení a zpomalení vozidla s minimálními ztrátami a minimální degradací hlavní baterie. Množství energie uložené během rekuperace umožňuje dosažení výkonu 40 kW za 20s. Jmenovité hodnoty ultrakapacitoru: jmenovité napětí 300V, jmenovitý proud 200A, kapacita 20F. [1]



Obrázek 1 Schéma zapojení systému s ultrakapacitorem [1]

Na Obrázek 2 Závislost napětí superkondenzátoru na čase při brzdění a zrychlování jsou znázorněny průběhy napětí v závislosti na čase při maximálním proudu $\pm 200\text{A}$. Při nabíjení superkondenzátoru vozidlo brzdilo po dobu 8s a 248kJ bylo generováno pomocí DC-DC měniče, z toho 208kJ bylo uloženo v ultrakapacitoru. To je účinnost 84%.

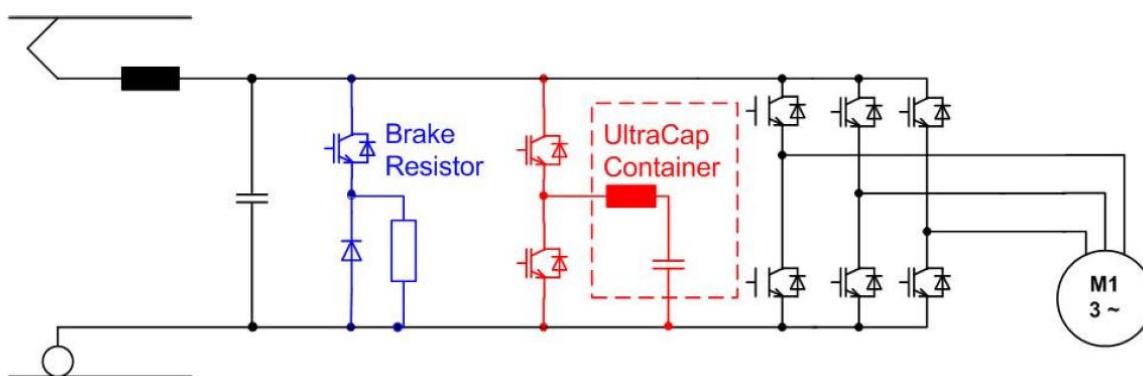
Při vybíjení superkondenzátoru vozidlo zrychlovalo po dobu 5,5s a 219kJ bylo dodáno pomocí DC-DC měniče, z toho 191,5kJ bylo z ultrakapacitoru. To je účinnost 87%.



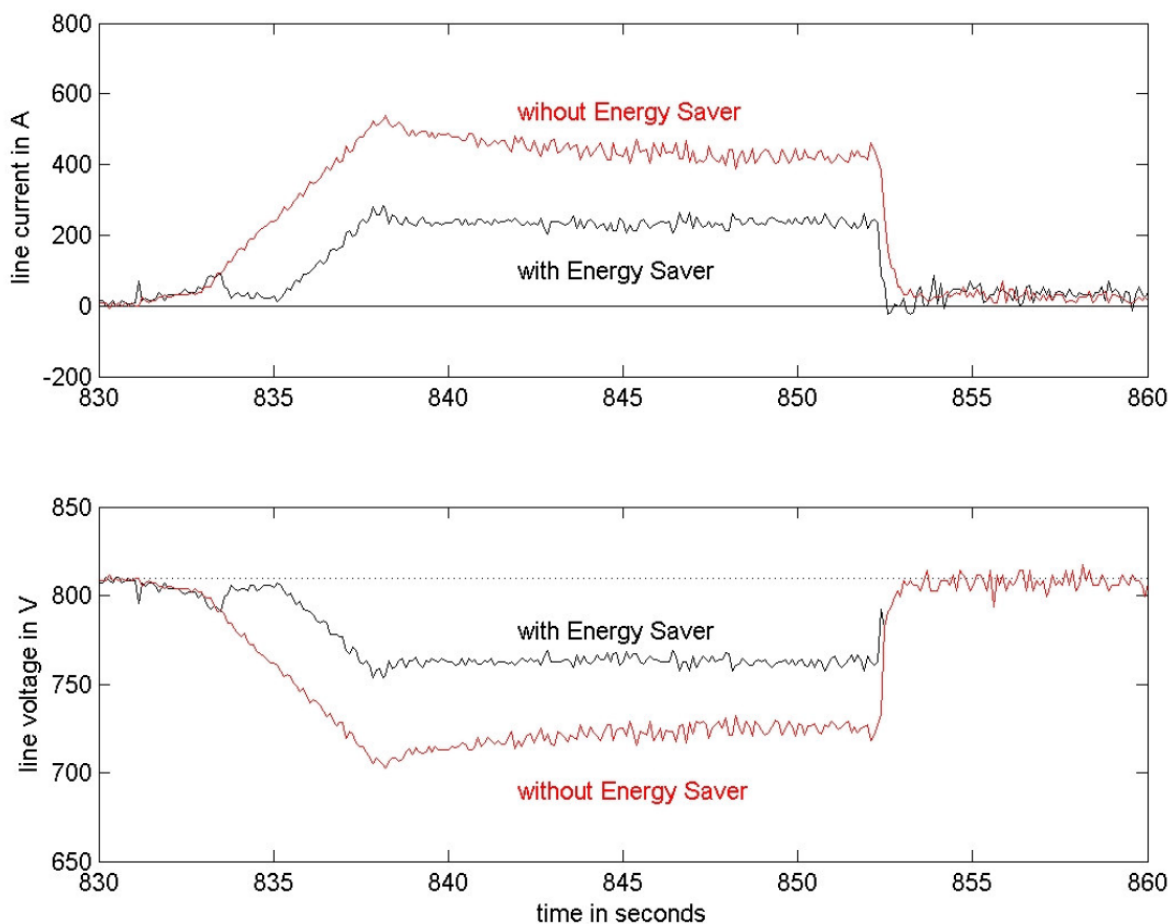
Obrázek 2 Závislost napětí superkondenzátoru na čase při brzdění a zrychlování [1]

2.2 Systém MITRAC pro akumulaci rekuperované energie

Článek [2] se zabývá systémem **MITRAC** od společnosti **Bombardier** pro uchování brzděné energie pomocí superkapacitorů. Naměřená úspora trakční energie je až 30%. Zařízení výrazně snižuje výkonové špičky a umožňuje tak provoz na několik set metrů bez napájení z trolejového vedení. [2]

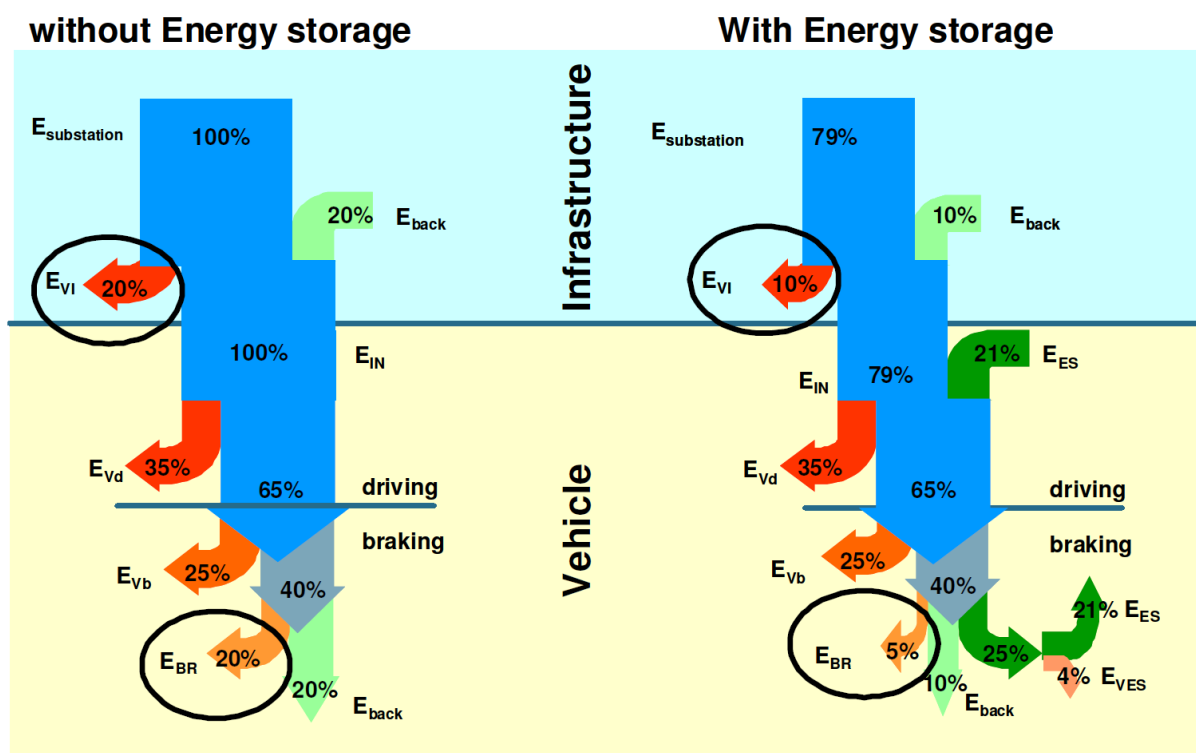


Obrázek 3 Schéma zapojení měniče se systémem MITRAC [2]



Obrázek 4 Průběh napětí a proudu troleje se systémem a bez systému MITRAC [2]

Systém MITRAC snižuje nejen spotřebu energie vozidla, ale také Jouleovy ztráty v troleji, které jsou úměrné druhé mocnině proudu. Z Obrázek 4 je patrné, že systém MITRAC způsobuje snížení vstupního proudu o 50%, což způsobuje i nižší pokles napětí v síti. Ultrakapacitory tedy přispívají ke stabilizaci napětí v síti. Tato výhoda může být využita například k zvýšení vzdáleností mezi napájecími stanicemi pro plánované nové linky na trati, k snížení časových intervalů mezi jednotlivými vozidly a k využití delších vozových souprav na stávajících tratích. [2]



Obrázek 5 Energetická bilance v metru [2]

Systém bez skladování energie přijímá 100% energie z rozvodny, ztráty během brzdění jsou $E_{vb}=25\%$, energie spotřebovaná v brzdovém odporu je $E_{br}=20\%$, energie vrácená do sítě $E_{back}=20\%$.

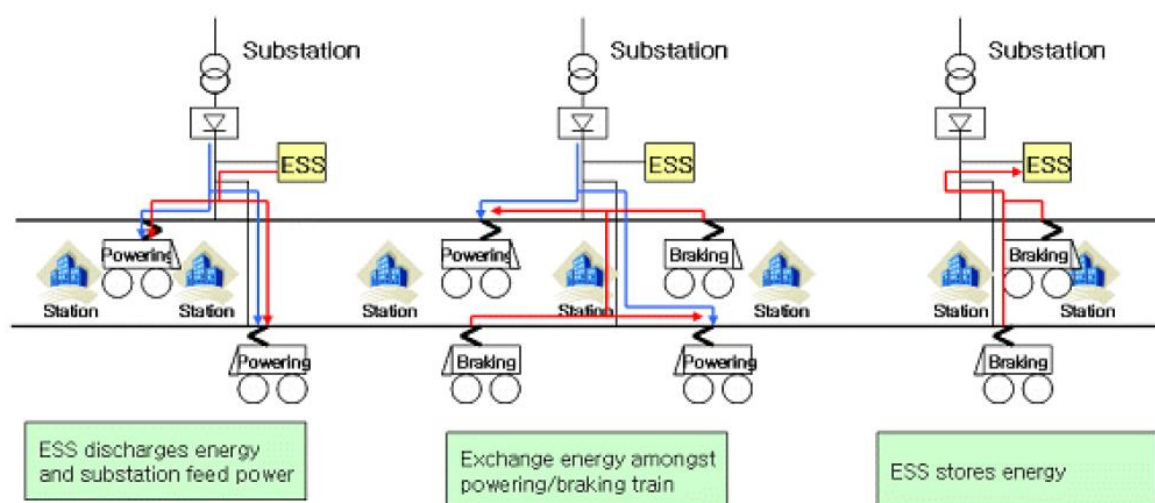
Systém se skladováním energie přijímá pouze 79% energie z rozvodny, protože energie uložená v systému MITRAC je $E_{es}=21\%$. Ztráty během jízdy a brzdění jsou stejné, ale zbývající brzdňá energie 40% se rozdělí mezi energii ztracenou v odporu $E_{br}=5\%$, energii vrácenou do sítě $E_{back}=10\%$ a energii skladovanou 25%, kde 4% jsou ztráty v systému MITRAC. [2]

2.3 Zařízení pro skladování rekuperované energie

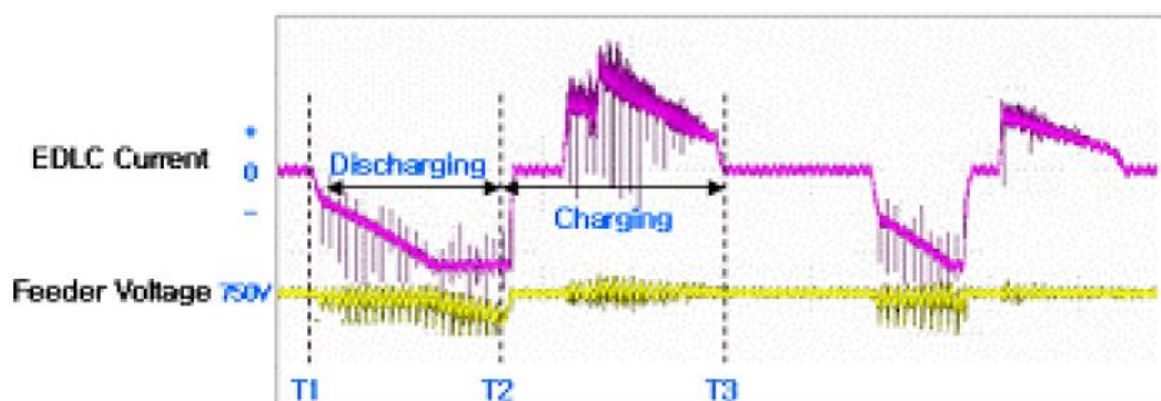
Článek [3] se zabývá vývojem zařízení pro skladování energie (ESS-energy storage system) na bázi superkapacitoru umístěného v rozvodně.

Aby bylo možné využít brzdňou energii vozidla, muselo by být v blízkosti brzdícího vozidla vozidlo zrychlující, které by energii využilo. Tento problém odstraňuje zařízení pro skladování energie, které snižuje spotřebu primární energie, ukládá rekuperovanou energii a stabilizuje napětí troleje. ESS ukládá energii při brzdění a vybíjí ji znovu, když vozidlo zrychluje bez

nutnosti synchronizace s jiným vozidlem, vybíjení a nabíjení probíhá velmi rychle. [3] Tento způsob skladování energie používá společnost **Siemens** v systému **SITRAS SES** [4].



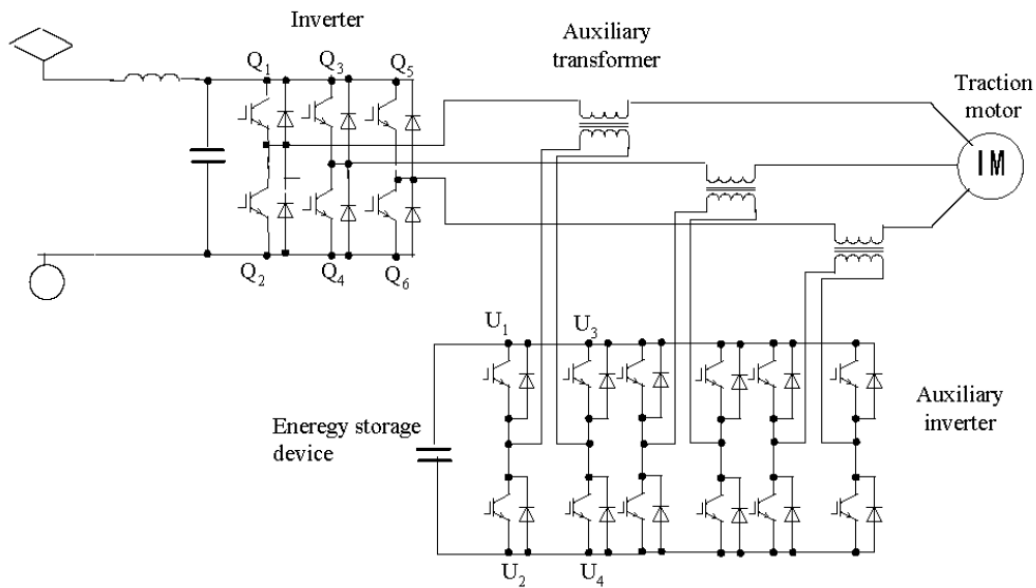
Obrázek 6 Tok energie mezi vozidly a ESS v městském provozu [3]



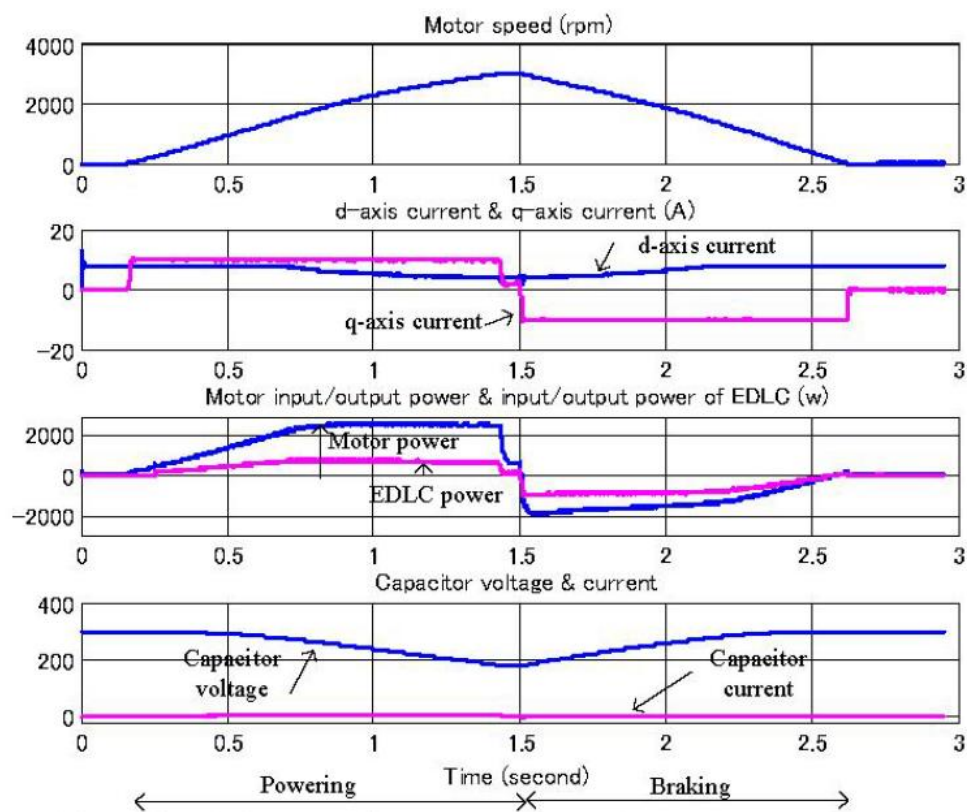
Obrázek 7 Závislost proudu superkapacitorů a napájecího napětí na čase [3]

2.4 Nová topologie měniče pro akumulaci rekuperované energie

V článku [5] je popsána nová topologie skladování energie pomocí superkondenzátorů a vstupně/výstupních transformátorů zapojených v sérii s vinutím trakčního motoru. Transformátory jsou svými výstupy připojeny na střídač/usměrňovač, který slouží jako usměrňovač pro nabíjení superkapacitorů v generátorickém režimu a jako střídač v motorickém režimu, což zvyšuje napětí a výkon motoru. [5]



Obrázek 8 Schéma zapojení ESS se vstupně/výstupními transformátory se sériovým zapojením do vinutí motoru [5]

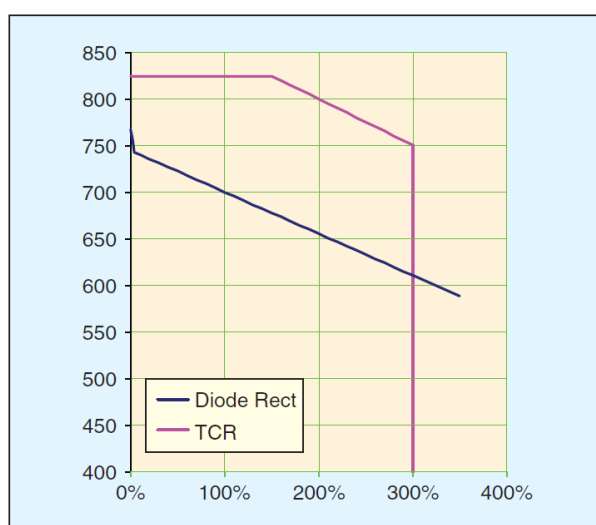


Obrázek 9 simulované průběhy se zvýšením výkonu pomocí superkondenzátorů (EDLC power) [5]

3 Rekuperace brzdné energie do střídavé sítě

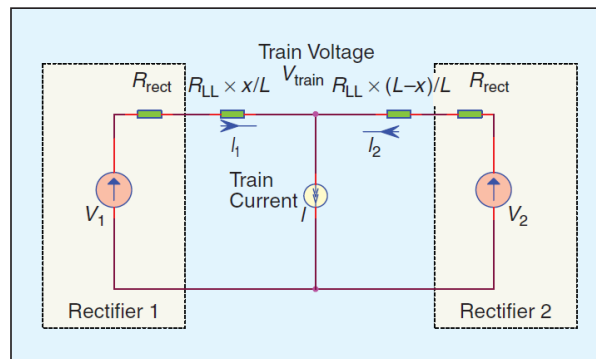
3.1 Náhrada diodového usměrňovače tyristorovým

Článek [6] se zabývá odhadem úspory energie prostřednictvím rekuperace brzdné energie získané nahrazením diodového usměrňovače v rozvodně tyristorovým usměrňovačem. V článku je provedeno porovnání výhod mezi tyristorovými usměrňovači (TCR) a diodovými usměrňovači (SDR). Například lepší závislost napětí na zátěži, které se promítá do úspor energie prostřednictvím zvýšeného stejnosměrného napětí a do úspor získaných sníženým počtem napájecích stanic v důsledku zvýšení vzdáleností mezi stanicemi.



Obrázek 10 Závislost napětí [V] diodového a tyristorového usměrňovače (TCR) na zatížení [6]

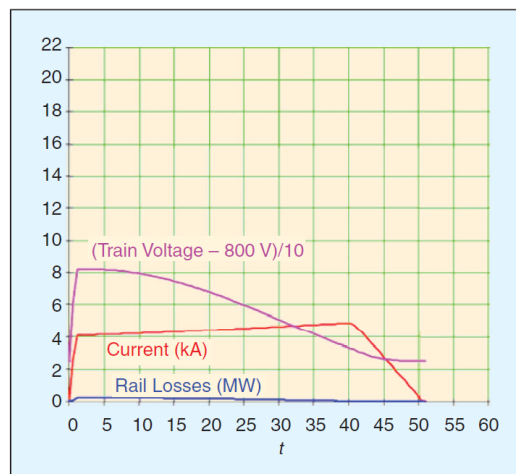
Dodatečné úspory u reverzačních tyristorových usměrňovačů (RTCR) nad diodovými (SDR) jsou prostřednictvím rekuperace energie zpět do střídavé sítě. Přestavbou diodových rozvodů na reverzační tyristorové rozvodny se získá úspora energie a návratnost takové modernizace je 2 až 2,5 roku. Úspora energie s reverzačními usměrňovači může být vyšší než 50%. [6]



Obrázek 11 Náhradní schéma reverzačního tyristorového usměrňovače [6]



Obrázek 12 Průběhy proudu a ztrát diodového usměrňovače (SDR) a (reverzačního) tyristorového usměrňovače (TCR/RTCR) v závislosti na čase při zrychlování [6]



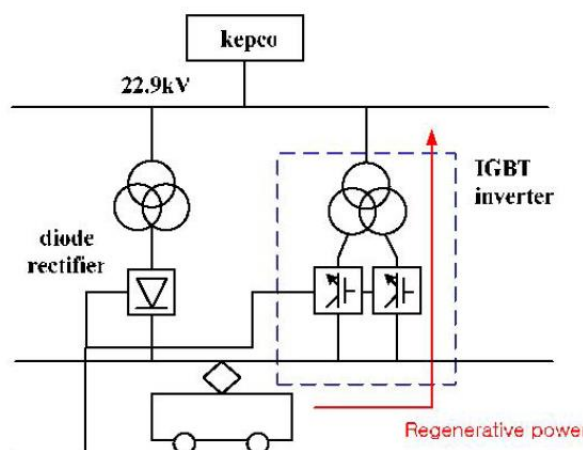
Obrázek 13 Průběhy napětí, proudu a ztrát RTCR usměrňovače při zpomalování [6]

<i>Rectifier Type</i>	<i>RTCR</i>	<i>TCR</i>	<i>SDR</i>
Energy savings (US\$ million/year)	1.2	0.1	0
Capital savings (US\$ million)	2.0	2.4	0
Total savings after six years (US\$ million)	9.1	3.1	0
Total savings after 12 years (US\$ million)	16.2	3.8	0
Total capital (US\$ million)	16.0	15.6	18.0
Total energy (US\$ million/year)	2.759	3.824	3.942
Number of substations	5	5	6
Installed substation cost (US\$ million)	3.20	3.12	3.00
Rectifier cost (US\$)	350,000	270,000	150,000

Obrázek 14 Investiční náklady a ušetřená energie jednotlivých typů usměrňovačů [6]

3.2 Vracení rekuperované energie do sítě pomocí střídače

Článek [7] se zabývá návrhem PWM řízení střídače, který vrací rekuperovanou energii do střídavé sítě. Stejnoseměrná měnična s dvanáctipulsním usměrňovačem má napětí naprázdno 1590V, toto napětí se při rekuperaci zvyšuje. V okamžiku, kdy dosáhne stejnosměrné napětí 1650V, měnič přeměňuje rekuperovanou energii a vrací ji zpět do sítě, tím vyrovnává a stabilizuje stejnosměrné napětí v troleji. [7]

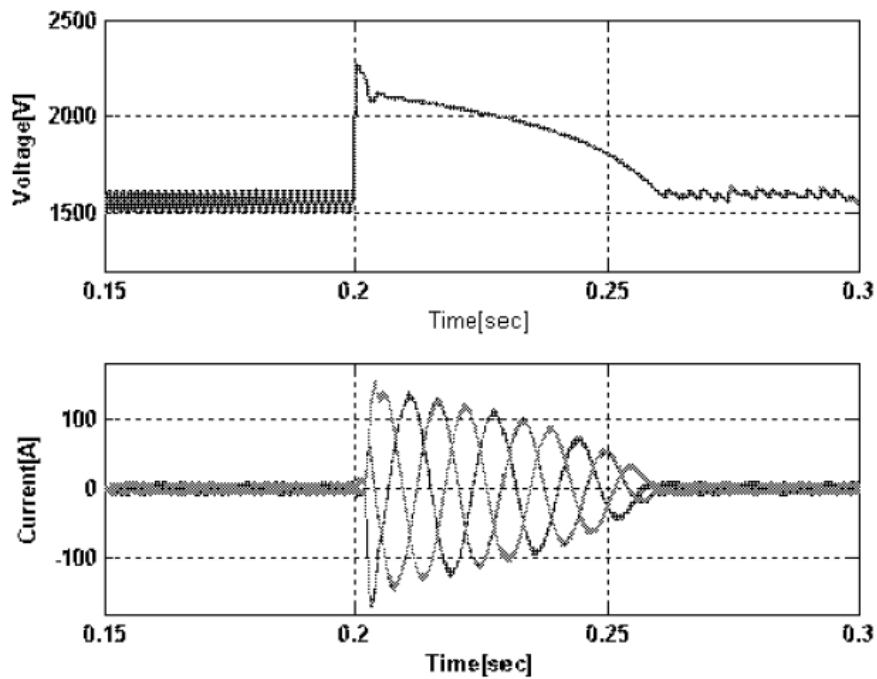


Obrázek 15 Stejnoseměrné napájení s diodovým usměrňovačem a střídačem pro vracení energie do sítě [7]

Toto zařízení neumožňuje řízení power faktoru, to vytváří nekvalitní výkon s velkými harmonickými, proto účinnost není příliš vysoká. Bylo by vhodné doplnit zařízení harmonickým filtrem. Společnost **ABB** používá podobný systém s tyristorovým střídačem [8], tento způsob vracení energie do sítě je velmi úsporný, ve srovnání s jinými systémy (jako je například

superkapacitor, nebo setrvačnick), má kratší dobu návratnosti a nižší provozní náklady.

Příkladem použití je například metro v Sao Paulo v Brazílii. [8]

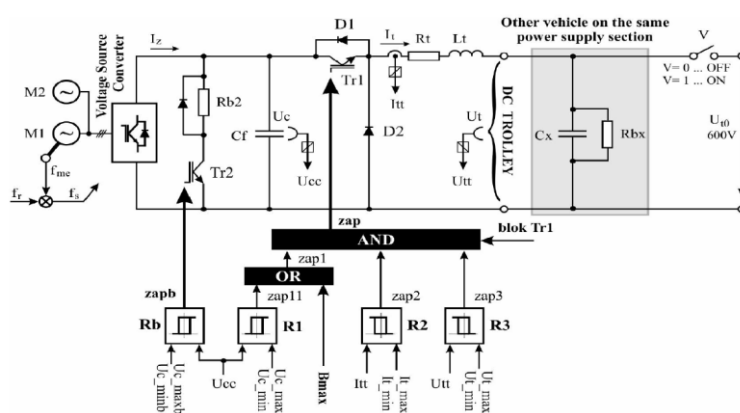


Obrázek 16 Simulované průběhy napětí v troleji a trojfázového proudu vráceného do sítě v závislosti na čase [7]

4 Rekuperace brzděné energie do stejnosměrné sítě

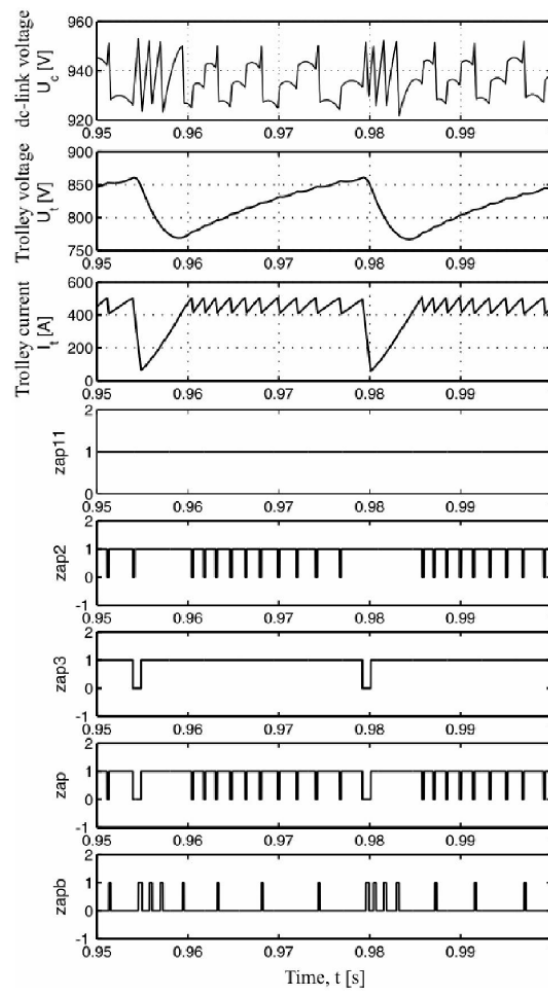
4.1 Aktivní rekuperační brzdění

V článku [9] je popsáno rekuperační brzdění, které je použito na tramvaji Škoda 14T. Jedná se o brzdění, při kterém je tramvaj schopna přenášet rekuperovanou energii, přestože je napětí stejnosměrného meziobvodu vyšší, než je přípustné napětí troleje. Tento případ nastává při brzdění s maximálním momentem při vysokých rychlostech. Strategie řízení umožňuje přenos energie do troleje ve všech provozních režimech a to i v případě brzdění s rostoucím napětím stejnosměrného meziobvodu. [9]



Obrázek 17 Schéma zapojení pro aktivní rekuperační brzdění a způsob řízení [9]

Způsob řízení je znázorněn na Obrázek 17, v konvenčním brzděném režimu je tranzistor T1 trvale zapnutý, ale s diodou D2 tvoří snižovací pulzní měnič. [9]



Obrázek 18 Průběhy napětí meziobvodu, napětí troleje, proudu troleje a zapínacích pulzů v závislosti na čase [9]

5 Závěr

Z popsaných principů získávání energie při rekuperačním brzdění je patrné, že tyto technologie přináší nejen provozní úspory trakčních vozidel, ale také investiční úspory ve výstavbě a rekonstrukci napájecích stanic a sítě jako takové. Právě stabilizace napětí v napájecí síti a stabilizace proudových rázů na trakčním vozidle je největším přínosem, který řeší jak technologie akumulace přímo ve vozidle, tak i technologie rekuperace a uskladnění nespotřebované energie v rozvodných prvcích sítě. V této rešerši jsou popsány technologie, které jsou buď ve fázi teoretického vývoje, nebo jsou aktuálně využívány konkrétními společnostmi jako je např. společnost ABB, Bombardier, Siemens nebo Škoda Transportation.

V současnosti jsou cílovou oblastí výzkumu spíše trakční sítě lokálního charakteru, jelikož rekuperace do veřejné distribuční sítě může vyvolávat určité technické i ekonomické problémy. Z technického pohledu jde především o nastavení ochran proti vyrovnávacím proudům. Po ekonomické stránce se ukazují slabá místa ve způsobu identifikace a zúčtování zpětných odběrů od jednotlivých účastníků veřejné elektrické sítě.

Literatura

- [1] J. Dixon a M. Ortuzar, „Ultracapacitors + DC-DC Converters in Regenerative Braking System,“ v *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE (Volume:17, Issue: 8)*, 2002.
- [2] M. Steiner, M. Klohr a S. Pagiela, „Energy Storage System with UltraCaps on Board of Railway vehicles,“ v *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*, Aalborg, 2007.
- [3] H. Lee, G. Kim a C. Lee, „Development of ESS for regenerative energy of electric vehicle,“ v *WCRR*, 2008.
- [4] Siemens AG, „Siemens rail-electrification,“ 2012. [Online]. Available: http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/rail-electrification/dc-traction-power-supply/Documents/SES_PI_131_76.pdf.
- [5] M. Yano, T. Mizumura a A. Kuramochi, „A Study of Energy Storage Systems for Railway Rolling Stocks Using Transformers Connected in Series to Motor Windings,“ v *Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07*, 2007.
- [6] V. Gelman, „Braking energy recuperation,“ v *Vehicular Technology Magazine, IEEE 4.3*, 2009.
- [7] C. H. Bae, M. S. Han, Y. K. Kim, C. Y. Choi a S. J. Jang, „Simulation Study of Regenerative Inverter for DC Traction Substation,“ v *Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on (Volume:2)*, Nanjing, 2005.
- [8] ABB AG, „"Green" solution for DC traction substations - Thyristor Inverters,“ 2010. [Online]. Available: <http://www.abb.com/industries/ap/db0003db002812/b3f5beb3855ffd82c125779d0052bf8d.aspx>.
- [9] Z. Peroutka, K. Zeman a J. Flajtingr, „Active Regenerative Braking: Braking of Induction Machine Traction Drive with Maximum Torque in High Speeds,“ v *Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International*, Portoroz, 2006.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma zapojení systému s ultrakapacitorem [1]	5
Obrázek 2 Závislost napětí superkondenzátoru na čase při brzdění a zrychlování [1]	6
Obrázek 3 Schéma zapojení měniče se systémem MITRAC [2]	6
Obrázek 4 Průběh napětí a proudu troleje se systémem a bez systému MITRAC [2]	7
Obrázek 5 Energetická bilance v metru [2]	8
Obrázek 6 Tok energie mezi vozidly a ESS v městském provozu [3]	9
Obrázek 7 Závislost proudu superkapacitorů a napájecího napětí na čase [3]	9
Obrázek 8 Schéma zapojení ESS se vstupně/výstupními transformátory se sériovým zapojením do vinutí motoru [5]	10
Obrázek 9 simulované průběhy se zvýšením výkonu pomocí superkondenzátorů (EDLC power) [5]	10
Obrázek 10 Závislost napětí [V] diodového a tyristorového usměrňovače (TCR) na zatížení [6]	11
Obrázek 11 Náhradní schéma reverzačního tyristorového usměrňovače [6]	12
Obrázek 12 Průběhy proudu a ztrát diodového usměrňovače (SDR) a (reverzačního) tyristorového usměrňovače (TCR/RTCR) v závislosti na čase při zrychlování [6]	12
Obrázek 13 Průběhy napětí, proudu a ztrát RTCR usměrňovače při zpomalování [6]	12
Obrázek 14 Investiční náklady a ušetřená energie jednotlivých typů usměrňovačů [6]	13
Obrázek 15 Stejnosměrné napájení s diodovým usměrňovačem a střídačem pro vracení energie do sítě [7]	13
Obrázek 16 Simulované průběhy napětí v troleji a trojfázového proudu vráceného do sítě v závislosti na čase [7]	14
Obrázek 17 Schéma zapojení pro aktivní rekuperační brzdění a způsob řízení [9]	15
Obrázek 18 Průběhy napětí meziobvodu, napětí troleje, proudu troleje a zapínacích pulzů v závislosti na čase [9]	16

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum Jméno / Odd.
1	Všechny	Publikování dokumentu	23.10.2013 JS, JB, ZP, PD / KEV