

TRACTION DRIVE OF AN ELECTRIC VEHICLE USING AN ULTRACAPACITOR

P. Huták*, P. Vorel*

Summary: *This paper describes an usage of ultracapacitors in the system electric drive + traction accumulator. The purpose of the ultracapacitor in this application is to increase the efficiency of the whole drive especially at relatively short current peaks (regenerative braking, acceleration of the electric vehicle from a non-zero initial speed). The connection of the ultracapacitor to the DC intercircuit of the traction inverter by a 2-quadrant inverter is proposed. Using an available control system the absorption of high current peaks caused in the DC link by the traction inverter during acceleration or regenerative braking is enabled. The attention is paid to the energy balance and to the design of the ultracapacitor. An usable control structure is given too.*

1. Úvod

Tento příspěvek je věnován možnostem využití ultrakapacitoru pro zvýšení účinnosti soustavy elektrického pohonu s trakčním akumulátorem při krátkodobých nárazových proudech odebíraných trakčním měničem (rekuperační brzdění, akcelerace vozidla z nenulové počáteční rychlosti). Nezáleží přitom na typu pohonu (stejnoseměrný, asynchronní, synchronní aj.). Konkrétně bude ultrakapacitor provozován na pohonu elektrického skútru s asynchronním třífázovým motorem. Je popsáno propojení ultrakapacitoru se stejnosměrným meziobvodem trakčního měniče (akumulátorem) pomocí dvoukvadrantového měniče. Vhodným způsobem regulace se pak umožní pokrytí prudkých proudových výkyvů obou polarit způsobených vlastním trakčním měničem při rekuperaci či akceleraci vozidla. Pozornost je věnována rozboru energetické bilance a dimenzování ultrakapacitoru. Rovněž je popsána použitelná regulační struktura.

Je známo, že akumulátor není schopen absorbovat brzdovou energii vozidla v případech, že brzdění je náhlé a proud rekuperovaný do akumulátoru je veliký. V takovém případě se velká část brzděné energie neúčinně přemění v teplo na vnitřním odporu akumulátoru a rekuperace naprosto ztrácí význam z hlediska zvýšení dojezdu vozidla. Navíc je akumulátor namáhán

* Ing. Petr Huták, Ph.D, Ing. Pavel Vorel, Ph.D: Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky FEKT VUT Brno, Technická 8, 616 00 Brno; tel.: +420.5 4114 2437, fax: +420.5 4114 2464

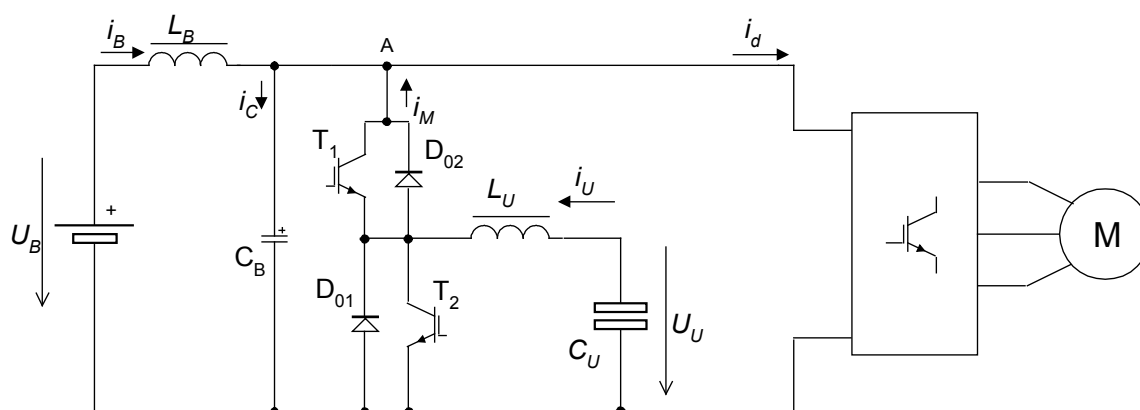
zvýšenou teplotou, což snižuje jeho životnost. V poslední době se jako reálná jeví možnost použití tzv. ultrakapacitorů ke krátkodobé akumulaci energie.

Ultrakapacity jsou schopny, na rozdíl od akumulátorů, absorbovat s vysokou účinností i velké proudové nárazy způsobené rekuperací. Tím by se určitě zvýšil dojezd vozidla, zvláště, jedná-li se o provoz s častým brzděním a akcelerací. Navíc ultrakapacitor je schopen dodávat energii zpět v případě prudké akcelerace a tak klesne velmi výrazně proudové namáhání akumulátoru - se zřejmým prodloužením jeho životnosti.

2. Připojení ultrakapacitoru, energetická rozvaha

Přímé paralelní připojení ultrakapacitoru k akumulátoru je nevýhodné. Paralelní spojení totiž neumožní velkou změnu napětí na ultrakapacitoru, malá změna napětí pak nedovolí pohlcení dostatečně velké energie.

Proto bylo navrženo řešení, které je zachyceno na obr.1. Dvoukvadrantový měnič je schopen předávat bezeztrátově energii oběma směry mezi ultrakapacitorem C_U a stejnosměrným meziobvodem. Pracuje-li horní tranzistor, je energie čerpána z meziobvodu přes tlumivku L_U do ultrakapacitoru. Pracuje-li dolní tranzistor, je energie naopak čerpána z ultrakapacitoru do meziobvodu.



Obr. 1 Využití ultrakapacitoru k rekuperaci energie

Energetická rozvaha vychází z následujících úvah:

Z důvodu dosažení dobré účinnosti přečerpávání energie oběma směry položíme podmínku, aby napětí na U_U ultrakapacitoru nekleslo nikdy pod polovinu napětí akumulátoru

$$U_{U \min} = \frac{U_B}{2} \quad (1)$$

Z funkce měniče plyne, že maximální napětí ultrakapacitoru může mít velikost

$$U_{U \max} = U_B \quad (2)$$

Pak minimálnímu napětí podle rovnice (1) odpovídá energie

$$W_{\min} = \frac{1}{2} C_U U_{U \min}^2 = \frac{1}{8} C_U U_B^2 \quad (3)$$

Maximálnímu napětí bude odpovídat energie

$$W_{\max} = \frac{1}{2} C_U U_{U \max}^2 = \frac{1}{2} C_U U_B^2 \quad (4)$$

Nyní najděme takovou velikost napětí $U_{U \text{stř}}$, při kterém bude energie $W_{\text{stř}}$ ležet právě uprostřed mezi oběma krajními hodnotami W_{\max} , W_{\min} . Při takovém napětí pak bude ultrakapacitor schopen stejné množství energie buď vydat, nebo pohlít. Tedy:

$$W_{\text{stř}} = \frac{W_{\max} + W_{\min}}{2} = \frac{5}{16} C_U U_B^2 \quad (5)$$

Současně musí platit:

$$W_{\text{stř}} = \frac{1}{2} C_U U_{U \text{stř}}^2 \quad (6)$$

Z rovnic (5), (6) plyne

$$U_{U \text{stř}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{5}{2}} U_B = 0,79 U_B \quad (7)$$

Bude-li ultrakapacitor nabit na toto napětí, bude schopen symetricky buď pohlít nebo vydat stejné množství energie ΔW podle rovnice:

$$\Delta W = W_{\max} - W_{\text{stř}} = W_{\text{stř}} - W_{\min} = \frac{3}{16} C_U U_B^2 \quad (8)$$

Pro realistickou hodnotu kapacity použitelné např. pro provoz elektrického autobusu $C_U = 10\text{F}$ a $U_B = 550\text{V}$ vychází $\Delta W = 567\text{kJ}$. Tato energie pokryje např. špičkový výkon 100kW po dobu $5,67\text{s}$ při akceleraci i brzdění. Při vhodném řízení pomocného dvoukvadrantového měniče může být po uvedené dobu proud akumulátoru téměř nulový. To však vyžaduje velmi důmyslný regulační algoritmus.

3. Vlastnosti ultrakapacitorů

Ultrakapacitory jsou elektrochemické dvouvrstvové kapacitory. Podstatou vysoké koncentrace energie je aktivovaný materiál uhlíkových elektrod, který je velmi porézní, takže aktivní plocha je kolem $2000\text{m}^2/\text{g}$. Ultrakapacitor se dále vyznačuje extrémně krátkou vzdáleností mezi elektrodami s kladným a záporným nábojem (řádově několik nanometrů). Kapacita několik tisíc faradů může být realizována ve velmi malém objemu. Jedná se o elektrolytické kapacitory. Nabíjení a vybíjení se uskutečňuje na základě pohybu iontů v elektrolytu. Nejedná se o takové chemické procesy, při kterých nastává rozpouštění a znovu vytváření materiálů elektrod jako u elektrochemických článků. Ultrakapacitory mají na rozdíl od elektrochemických článků mnohem větší životnost (mnoho cyklů „nabití“ a „vybití“) a nepotřebují údržbu. Ultrakapacitory jsou v současné době nabízeny v hodnotě kapacity 5, 10, 100, 120, 600, 1200, 2700 a 3600F při napětí 2,3V. Pro vyšší napětí je nutné ultrakapacitory spojovat do výkonových modulů (bloků).

Ultrakapacitory v současné době nemohou zcela nahradit klasické elektrochemické zdroje energie, ale spolu s nimi mohou překonat některé jejich nevýhody. Ultrakapacitory mohou pracovat paralelně i s jinými zdroji elektrické energie jako jsou sluneční články, palivové články apod. Současné ultrakapacitory nesmí pracovat při vyšší teplotě než 70°C . Běžný rozsah pracovních teplot je $(-30 \text{ až } +70)^\circ\text{C}$.

Ultrakapacitory nejsou nijak zvlášť citlivé na způsoby nabíjení a vybíjení. Neměly by být nabíjeny na větší napětí než jmenovité. V opačném případě klesá životnost a při překročení napětí 2,7V může dojít ke zničení. Ultrakapacitory se vyznačují velmi malým vnitřním odporem. Nabíjecí a vybíjecí proudy by neměly překročit katalogové hodnoty. Při nabíjení a vybíjení ultrakapacitorů není nutné udržovat žádný zvláštní režim. Nabít a vybit je možné na jakoukoliv hodnotu v rámci rozsahu jmenovitých hodnot. Neprojevuje se u nich tzv. paměťový jev. Ultrakapacitory je možné vybit až do nulové hodnoty napětí. Jsou schopné pojmout a vydat velké množství energie v krátkém čase.

4. Regulační algoritmus

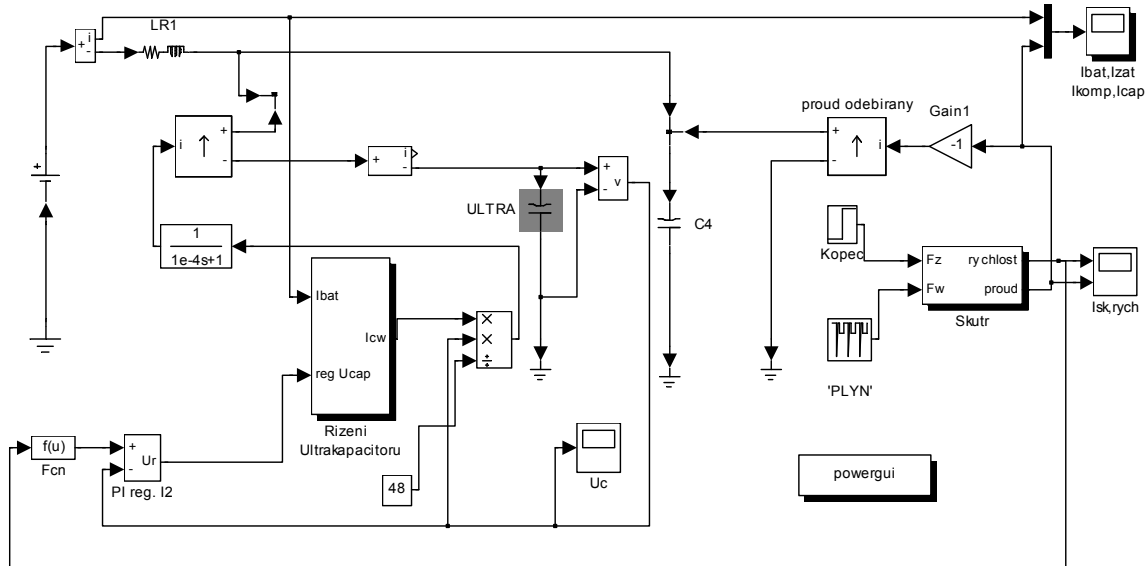
Z funkce pomocného dvoukvadrantového měniče plyne, že při velmi nízkém napětí U_U na ultrakapacitoru by měnič pracoval s velmi malou střídou. Pak by bylo možno dosáhnout určité střední hodnoty I_M pouze za cenu extrémně vysokých špičkových hodnot. Proto byla na začátku uměle stanovena podmínka (1) aby k tomuto jevu nedocházelo.

Regulační obvody musí zabezpečit:

1. Vykrytí špiček proudu odebíraného nebo dodávaného do akumulátoru
2. Udržování napětí ultrakapacitoru na požadované hodnotě.

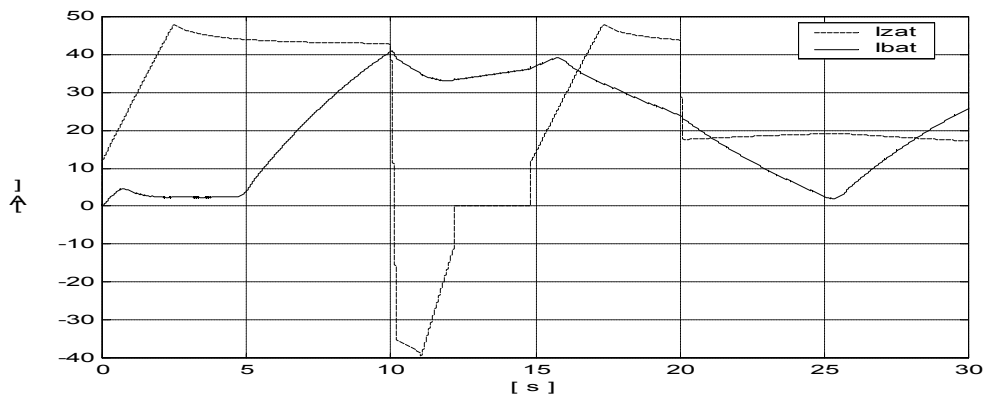
Je zřejmé, že tyto požadavky směřují proti sobě. Prioritní je ovšem požadavek první. Napětí ultrakapacitoru se bude udržovat stabilní pouze „dlouhodobě“. Navržené regulační obvody využívají kaskádní regulační smyčky. Základní je regulační smyčka proudu ultrakapacitoru. Vstupem této smyčky je žádaný proud, který je určen derivačním členem připojeným na snímač proudu akumulátoru. K tomuto proudu se přičítá přes omezovač strmosti výstup regulátoru napětí ultrakapacitoru. Pro vyšší využití kapacity ultrakapacitoru je vhodné jeho napětí udržovat na hodnotě nepřímo úměrné rychlosti vozidla, samozřejmě s uvažováním podmínky (1). Tzn. při stojícím vozidle nabít ultrakapacitor na plné napětí, aby měl dostatek energie pro rozjezd, při maximální rychlosti napětí patřičně snížit, aby ultrakapacitor byl schopen při rekuperačním brzdění pojmout maximální energii.

Vlastní regulace byla zatím ověřena pouze simulací (MATLAB-SIMULINK-Power system blockset) - obr 2. Protože ověření proběhne na elektrickém skútru postaveném na našem ústavu, byla regulace navržena pro tento případ. Napětí akumulátoru je 48 V, použitý ultrakapacitor s kapacitou 20 F.

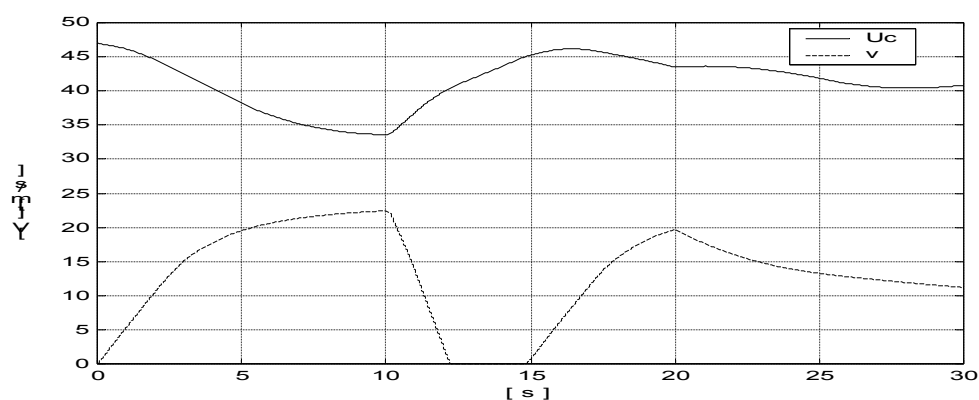


Obr. 2 Model elektrického skútru s ultrakapacitorem

Výsledky získané simulací jsou na obr. 3 a obr. 4.

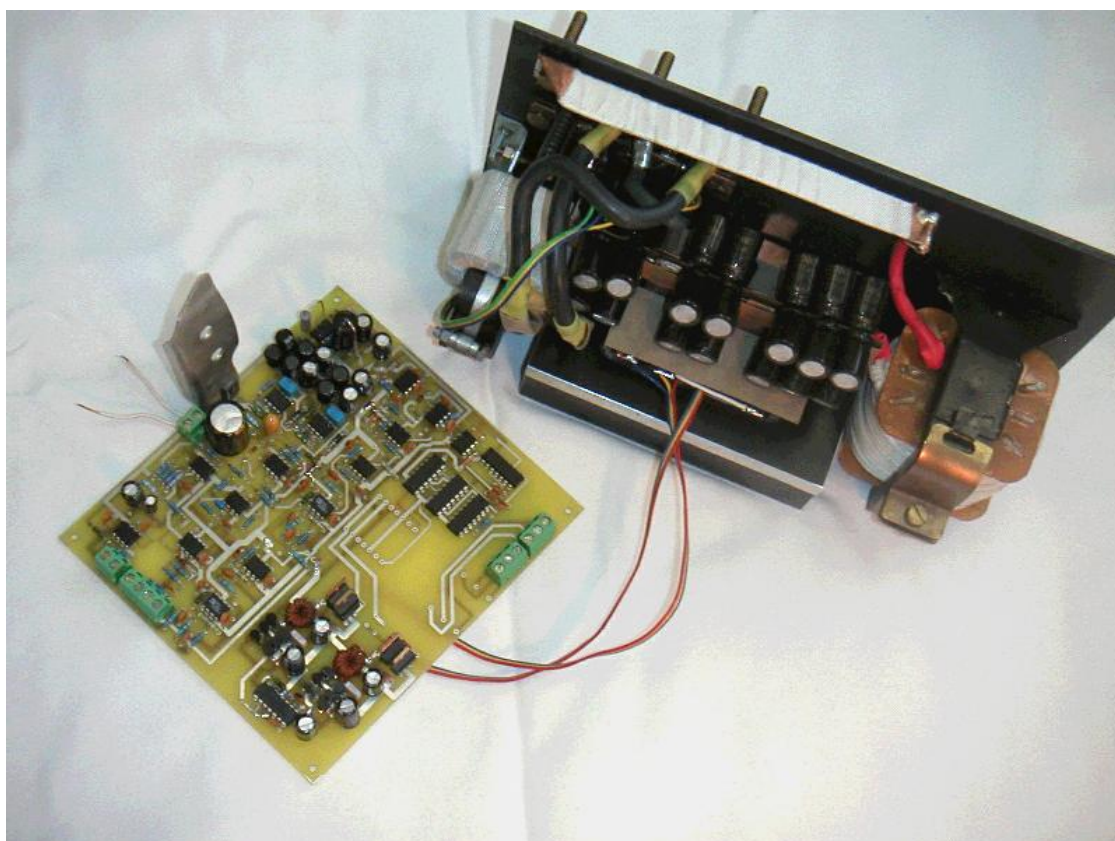


Obr. 3 Průběhy proudu akumulátoru a proudu zátěže



Obr. 4 Průběh napětí ultrakapacitoru a rychlosti skútru

Byl simulován režim s rozjezdem zabrzděním a dalším rozjezdem. Na obr. 4 je čárkovaně vynesena rychlost skútru. Plnou čarou je zobrazeno napětí na ultrakapacitoru. Na obr. 3 je čárkovaně vynesena proud odebíraný měničem skútru, plnou čarou je vynesena proud tekoucí do akumulátoru. Je patrné že rychlé změny proudu jsou účinně filtrovány.



Obr. 5 Fotografie měniče pro připojení ultrakapacitoru a jeho řídicích obvodů

5. Závěr

Z cenového hlediska je u popsaného systému rozhodující cena ultrakapacitorů. Je však zřejmé, že ceny těchto prvků se budou v nejbližší době výrazně snižovat, pokud mají ultrakapacitory uspět na trhu. Při cenových rozvahách je nutno brát v úvahu přínos spočívající v prodloužení životnosti akumulátorů.

Vzhledem ke svým specifickým vlastnostem se ultrakapacitory hodí vedle popisované aplikace především pro využití při startování spalovacích motorů. Předpokládá se využití energie ultrakapacitoru spolu s energií akumulátorové energie především při obtížných zimních startech.

6. Poděkování

Článek vznikl za podpory grantového projektu GAČR 102/00/D013.

7. Literatura

Rose, M. F., Johnson, C., Owens, T., Stephens, B. (1994) *Journal of Power Sources*, 47, 303.
Conway, B. E., Birss, V., Wojtowicz, W. (1997) *Journal of power sources*, 66, 1.