

Hranilniki električne energije z izboljšano dinamiko

Marijan Španer

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko,
Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija
marijan.spaner@um.si

Electrical energy storage system with improved dynamics

The paper presents energy storage systems of electric and hybrid vehicles and approaches how to improve dynamic properties of the energy storage. The key element of the vehicles with electric propulsion is efficient energy storage system. The properties of the battery depend on its type/manufacturing technology, operation temperature, type of load, age and some other factors. Very important property of energy storage is its ability to receive and store significant amounts of energy in short term. The efficiency should be also at such operation the best possible. Commonly used batteries (especially lead batteries) hardly meet this requirement. Therefore the elements that can efficiently handle peaks of energy and, by this, significantly improve dynamics and life time of the battery, are added into the energy storage. In the paper described elements are super-capacitor and mechanical storage-flywheel. Further it is presented how these additional components are integrated into hybrid energy storage system of the vehicle.

Kratek pregled prispevka

Prispevek obravnava sisteme za hranjenje energije pri električnih in hibridnih vozilih ter različne možnosti izboljšav njihovih dinamičnih lastnosti. Ključni element vozil z električnim pogonom je učinkovit hranilnik električne energije. Lastnosti akumulatorske baterije so odvisne od izbrane tehnologije, delovne temperature, tipa obremenitve, življenjske dobe / starosti in še nekaterih drugih okoliščin. Zelo pomembna lastnost hranilnika električne energije je zmožnost oddajanja in sprejemanja velike količine energije v kratkem času. Ob tem naj bi bil izkoristek hranilnika čim boljši. Običajne akumulatorske baterije (še zlasti svinčene) te zahteve le težko izpolnijo. Zato lahko dodamo sklope, ki so sposobni učinkovito prevzeti konice moči in na ta način bistveno izboljšajo dinamične lastnosti ter podaljšajo življensko dobo baterije. V prispevku sta opisana superkondenzator in mehanski vztrajnik kot elementa za hranjenje energije, prav tako pa način njune integracije v »hibridni« hranilnik električne energije.

1 Uvod

Učinkovit hranilnik električne energije je ključni element pogonskega sistema pri vozilih z električnim pogonom. Lastnosti akumulatorske baterije so odvisne od izbrane tehnologije, tipa obremenitve, življenjske dobe, oziroma starosti, delovne temperature, in še mnogih drugih okoliščin. Pomembna zahteva pri hranilniku električne energije je zmožnost oddajanja in sprejemanja velike količine energije v kratkem času. Ob tem naj bi bil izkoristek hranilnika čim boljši. Običajne akumulatorske baterije (še zlasti svinčene) te zahteve le težko izpolnijo.

Kapaciteta akumulatorske baterije, oziroma količina razpoložljive električne energije, je odvisna od pogojev pri praznjenju in od zgodovine uporabe baterije, ki bistveno vpliva na dejansko kapaciteto baterije. Glede na nelinearno odvisnost pri pretvorbi kemične energije v električno in velikega števila dejavnikov ki vplivajo na dejansko kapaciteto baterije (tok pri praznjenju, število opravljenih ciklov praznjenja-polnjenja, globina praznjenja, SOC, obratovalna temperatura in obremenitve) [2], je modeliranje tega procesa zelo zahtevno.

2 Omejitve akumulatorskih baterij

Za analizo energijske izkoriščenosti baterije je potrebno izvesti simulacijo vožnje vozila z električnim pogonom. Za to je potreben model vozila in elektromotorne pogona z močnostnim pretvornikom, pri čemer se za obravnavo delovanja vira energije uporabi ustrezen model akumulatorske baterije. Ob simulaciji vožnje po dinamičnem voznem ciklu se zaradi visoke obremenitve pokažejo slabosti akumulatorske baterije: znižanje napetosti, kar ima za posledico povečanje izhodnega toka ter padec izkoriščenosti shranjene energije. Jasno se pokaže, da akumulatorska baterija najučinkoviteje deluje pri nizki in čim bolj konstantni obremenitvi. Pri vseh akumulatorskih baterijah, ne glede na tip (svinčene, Ni-Mh ali litijeve), s povečevanjem obremenitve upade izkoristek pretvorbe razpoložljive kemične energije v

električno. Pri vozilu nastopajo takšne obremenitve ob delovanju pogonskega motorja s polno močjo, to je predvsem ob močnem pospeševanju pri višjih hitrostih. V tem režimu akumulatorski bateriji zaradi njene notranje upornosti napetost pade in izkoristek hranilnika energije se drastično zmanjša. Dejansko kapaciteto baterije v odvisnosti od praznilnega toka (v primeru konstantnega bremena) je moč zadovoljivo opisati z empiričnim Peukert-ovim pravilom [2]:

$$C_p = I^k t$$

kjer je:

C_p - nazivna kapaciteta baterije [Ah],

I - aktualni praznilni tok [A],

t - čas praznjenja baterije [h] in

k - Peukertova konstanta.

Ker je realna obremenitev dinamično spremenljiva, je za učinkovito analizo priporočljivo uporabiti kompleksnejši model baterije. Za simulacijo delovanja svinčene baterije je zelo primeren »kinetični model baterije«, KiBaM [5], ki upošteva tudi regeneracijski efekt med posameznimi intervali obremenitve.

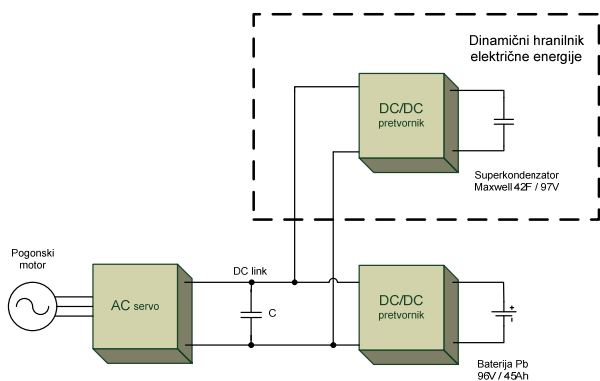
3 Hibridni hranilnik električne energije

Predpostavimo, da je hranilnik električne energije sestavljen iz dveh komponent, od katerih ena pokriva le dinamični del, druga pa srednjo vrednost obremenitve.

S stališča učinkovitosti izrabe akumulirane energije pri vozilu, bi bili idealni pogoji delovanja baterije takšni, da bi pokrivala le srednjo vrednosti potrebne moči. Na ta način je akumulatorska baterija razbremenjena visokih koničnih vrednosti moči in pokriva le relativno majhno srednjo vrednost porabe energije. Posledica je izboljšanje izkoriščenosti hranilnika energije, manjše termične izgube in, predvidoma, tudi podaljšanje življenjske dobe.

Akumulatorski bateriji je dodan »dinamični« sklop, ki prevzema dinamično

komponento, oziroma konice moči pri pospeševanju in zaviranju vozila.

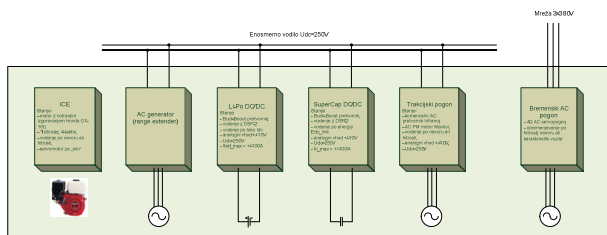


Slika 1: Hibridni hranilnik energije (kombinacija baterije in superkondenzatorja) v vozilu.

V laboratoriju smo zgradili »preizkuševališče hibridnih pogonov«, slika 2. Testno merilno mesto se uporablja za preizkušanje posameznih pogonskih komponent pri vozilih, hranilnikov energije in različnih konfiguracij vodenja posameznih sklopov. V prispevku sta opisani dve različni izvedbi kombiniranega (hibridnega) hranilnika električne energije, sestavljenega iz kemičnega hranilnika (akumulatorske baterije) z dodanim dinamičnim sklopom:

- a) superkondenzatorja s pretvornikom ali
- b) vztrajnika z elektromotornim pogonom.

V vsakem primeru sta obe enoti sta na skupno enosmerno vodilo povezani preko ustreznih močnostnih pretvornikov.



Slika 2: Preizkuševališče hibridnih pogonov.

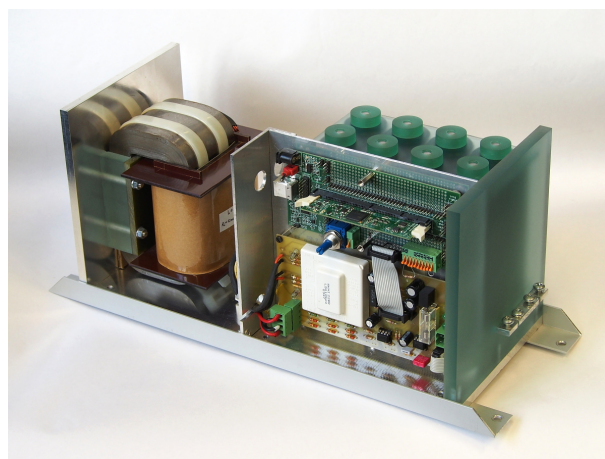
V hibridnem hranilniku energije je uporabljena akumulatorska baterija iz električnega vozila Estrima Biro. Gre za set 8 serijsko vezanih traksijskih svinčenih baterij Leoch DJM1245 s skupno napetostjo 96 V in kapaciteto 45 Ah [6].

4 Hranilnik električne energije s superkondenzatorjem

Superkondenzatorji (SC) ali ultrakondenzatorji so kondenzatorji, ki se zaradi svojih posebnih lastnosti (nove tehnologije, ki omogočajo zelo velike kapacitivnosti, majhne notranje upornosti in posledično visoke tokovne obremenljivosti) uporabljajo za shranjevanje električne energije.

$$W_{SC}(t) = \frac{Cu(t)^2}{2}$$

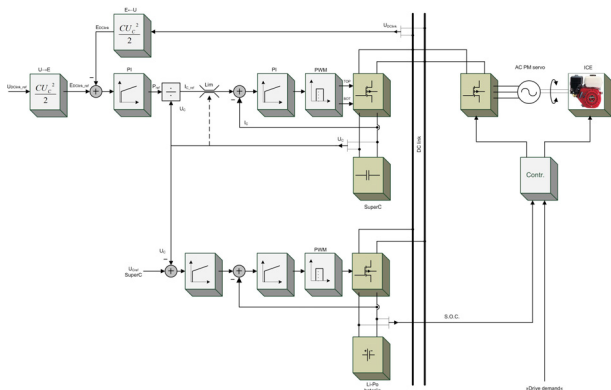
Kondenzatorska baterija je sestavljena iz šestih serijsko priključenih kondenzatorjev s kapacitivnostjo po 250 F / 16 V proizvajalca Maxwell, tip BMOD0250-16.2V. SC je na skupno enosmerno vodilo povezan preko, posebej za ta namen, razvitega dvosmernega stikalnega DC/DC pretvornika, slika 3.



Slika 3: Dvosmerni močnostni DC/DC pretvornik.

Dvosmerni močnostni pretvornik prenaša moč med skupnim enosmernim vodilom z napetostjo 250 V in SC, ki deluje v napetostnem območju od 50 V do 100 V. Sestavljeno vezje združuje pretvornika dveh različnih konfiguracij, tipa Buck in Boost, sestavljena v en sklop. Sklop je voden z mikrokrmilnikom in uporablja pulznoširinsko modulacijo (PWM, Pulse Width Modulation). Modulator z dvema izhodoma skrbi za preklon med dvema različnima strukturama vodenja.

Za vodenje celotnega kombiniranega hibridnega hranilnika električne energije je uporabljena kompleksna shema vodenja (slika 5).

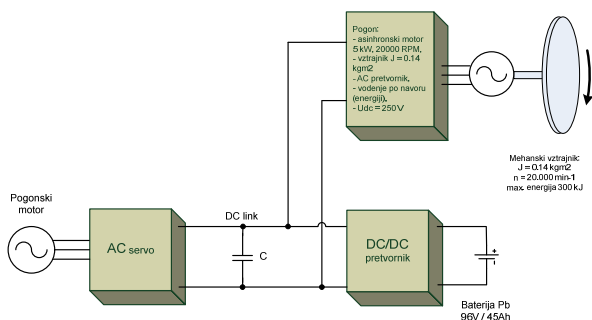


Slika 5: Shema vodenja kombiniranega hranilnika energije.

Strategija vodenja je naslednja: enota s superkondenzatorjem zagotavlja hiter, dinamičen pretok energije na skupno enosmerno vodilo. Linearni PI regulator kontrolira količino energije na enosmernem vodilu, posredno pa zagotavlja stabilno napetost za delovanje glavnega pogona. Zunanja, dinamično počasnejša zanka vodi pretok energije iz baterije na enosmerno vodilo, kar ustreza srednji vrednosti moči pogonskega motorja. Podroben opis delovanja sklopa je podan v [4].

5 Hranilnik električne energije z mehanskim vztrajnikom

Kot alternativa hranilniku električne energije s superkondenzatorjem je, trenutno še v fazi gradnje, predviden tudi hranilnik električne energije z mehanskim vztrajnikom.



Slika 5: Kombinirani hranilnik energije (baterija in električni motor/generator z mehanskim vztrajnikom).

Električni motor (z vodenim pretvornikom) pretvarja električno moč na sponkah motorja (U.I) v mehansko moč na izhodni gredi

($M \cdot \omega$), energija pa se akumulira kot kinetična energija vrtečega se telesa (rotorja). Pretok moči je dvosmeren, pri tem lahko naprava deluje v motorskem ali generatorskem režimu.

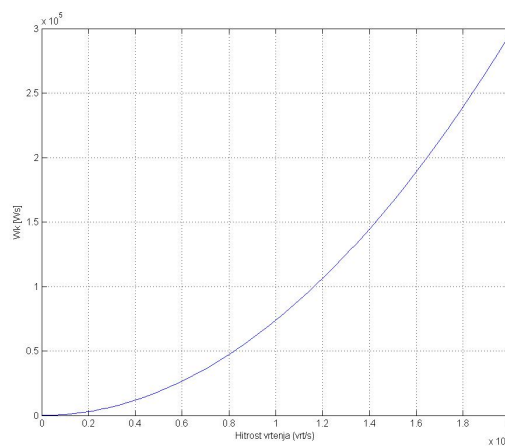
Tudi ta enota je v električni sistem vozila priključena na podoben način kot enota s superkondenzatorjem. Za pogon motorja je uporabljen standardni trifazni mostični pretvornik za pogon izmeničnih motorjev, slika 5.

5.1 Načrtovanju enote z vztrajnikom

Shranjena kinetična energija vrtečega se telesa je podana z izrazom:

$$W_{kin}(t) = \frac{J\omega(t)^2}{2}$$

Glede na zakonitost, da je shranjena energija proporcionalna kvadratu vrednosti vrtilne hitrosti, je za shranjevanje potrebne količine energije smiselno uporabljati čim višje vrtilne hitrosti. Slika 6 prikazuje količino shranjene energije vrtečega se vztrajnika v odvisnosti od vrtilne hitrosti.



Slika 6: Količina shranjene energije vztrajnika v odvisnosti od vrtilne hitrosti.

5.1.1 Izbira oblike in materiala vztrajnika

Mehanski del predvidene konstrukcije sklopa prikazuje slika 7. Na gred vodenega elektromotornega pogona je pritrjen vztrajnik, v katerem se akumulira kinetična energija.

Izbira dimenzij, vrtilne hitrosti in ostalih lastnosti sklopa so odvisne predvsem od razpoložljive tehnologije. V današnjem času se za izdelavo vztrajnikov uporabljata predvsem dva različna materiala, jeklo in kompoziti iz ogljikovih vlaken. Glavno omejitev za visoke hitrosti vrtenja predstavljajo visoke vrednosti centrifugalnih sil, pri katerih obremenitve materiala dosežejo vrednost (natezne) trdnosti materiala. Čeprav ima jeklo višjo specifično maso materiala kot ogljik (večji vztrajnostni moment), omogočajo ogljikovi kompoziti zaradi bistveno višjih trdnosti višje vrtilne hitrosti in posledično so mnogo višje tudi specifične količine shranjene energije na enoto teže. Kljub temu smo se zaradi enostavnejše izdelave in cenejše izvedbe laboratorijske naprave odločili za izdelavo jeklenega vztrajnika.

Oblika vztrajnika, ali je ploščat, oziroma dolg in ozek, določa vrednost vztrajnostnega momenta. Ob tem pa je potrebno upoštevati tudi omejitve vrtilne hitrosti glede na dovoljene obremenitve materiala. Matematično se da dokazati, da je količina shranjene energije pri izbranem materialu odvisna le od mase vztrajnika, ne glede na obliko [3].

Za dano konstrukcijo je masa vztrajnika $m=22$ kg, skupni vztrajnostni moment vseh vrtečih se delov $J=0.14$ kgm². Pri vrtilni hitrosti do $n=20.000$ min⁻¹ to ustreza najvišji vrednosti shranjene energije v razredu 300.000 Ws.

5.1.2 Električni motor/generator za pogon vztrajnika

Električni motor ima funkcijo pretvornika električne energije v mehansko. Glede na današnjo tehnologijo električnih motorjev bi bila najbolj smiselna izbira motorja s trajnimi magneti (PM motor), saj je manjši, omogoča večje preobremenitve in ima boljši izkoristek od ostalih tipov motorjev.

A glede na pretežno impulzno, nizko intermitenčno delovanje električnega motorja, so zelo pomemben dejavnik tudi izgube v prostem teku. PM motorji imajo pri visokih vrtilnih hitrostih primerljivo visoke izgube

magnetenja (histerezne in vrtilne) v primerjavi z motorji brez trajnih magnetov. Zato smo, kljub slabšemu izkoristku, odločili za uporabo asinhronskega (AM) motorja. Zaradi zahtevane visoke hitrosti obratovanja do 20.000 vrt/min je izbran standardni 2-polni motor. Predvidena predelava obsega obdelavo in natančno centriranje rotorja, zamenjavo ležajev, izdelavo novih ležajnih pokrovov kot tudi previjanje navitja statorja na ustrezno napetost.

Pri visokih vrtilnih hitrostih, še zlasti pri aplikaciji, kjer so zahtevane čim manjše izgube, je potrebno zagotoviti minimalno trenje. V ta namen je predvidena vgradnja motorja v zaprto ohišje, kjer bo deloval v helijevi atmosferi. Helij zaradi nižje viskoznosti zagotavlja tudi nižji viskozni zračni upor vrtečega se rotorja. Ob tem je glede hlajenja zelo ugodna tudi bistveno boljša toplotna prevodnost helija (He: 0.14 W/(m.K), zrak: 0.025 W/(m.K), oboje velja pri temperaturi $T=293$ K in tlaku $p=1$ bar).

5.1.3 Ležaji

Uporabljeni ležaji morajo zadostiti mnogim zahtevam. Zagotavljati morajo vrtenje rotorja v širokem območju vrtilne hitrosti in radialnih osnih obremenitev, pri tem pa ne sme biti prevelikih izgub zaradi trenja. Vsem tem zahtevam ustrezajo precizni kotalni ležaji s keramičnimi kroglicami. Ležaj na strani vztrajnika je večji, da zagotavlja zadostno togost in nosilnost.

Pri vleženju celotnega sklopa je potrebno upoštevati tudi možnost vgradnje v vozilo. Pri vodoravno vgrajenem sklopu se med vožnjo ob zavijanju vozila v vrtečem rotorju pojavi žiroskopski efekt, oziroma Coriolisova sila. Navor, ki deluje na vrteči rotor, znaša:

$$|M| = J \cdot \omega \cdot \omega_r$$

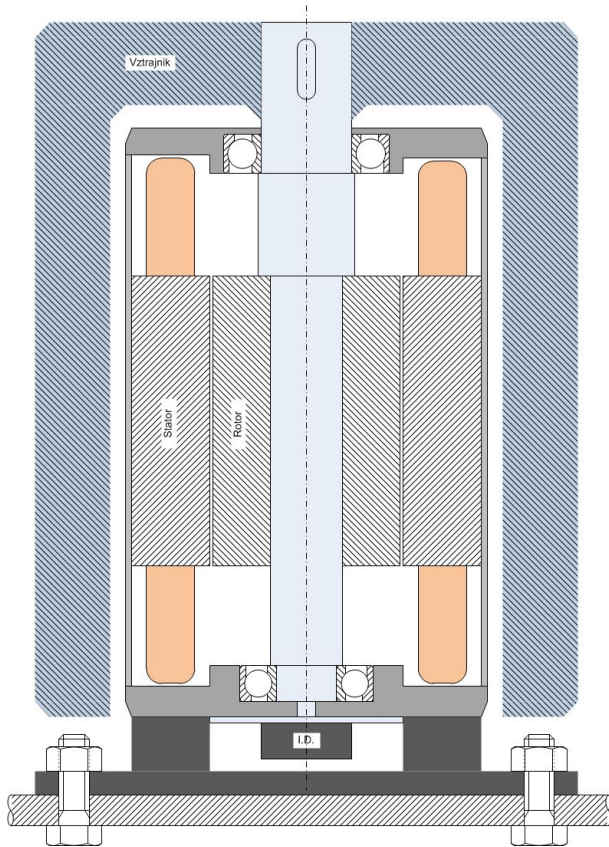
kjer je:

J – vztrajnostni moment rotorja,

ω – kotna hitrost zavijanja vozila in

ω_r – vrtilna hitrost rotorja.

Pri največjih kotnih zasukih vozila (1 rad/s) je največja sila na ležaje pri predvideni konstrukciji $F_{\max}=1600$ N, kar pa je le okrog 15% dovoljene radialne dinamične obremenitve ležajev.



Slika 7: Predvidena konstrukcija elektromotornega pogona z vztrajnikom.

5.1.4 Trifazni močnostni pretvornik za pogon motorja/generatorja

Električni motor/generator je na skupno enosmerno vodilo vozila priključen preko trifaznega tranzistorskega mostiča z vektorskim PWM vodenjem, ki omogoča neodvisno nastavljanje magnetilne in delovne komponente. Na ta način je omogočeno optimalno delovanje v različnih režimih, tako z najvišjo stopnjo magnetenja do nazivne delovne točke (10.000 vrt/min), v območju slabljenja polja (med 10.000 vrt/min in 20.000 vrt/min), kot tudi možnost delovanja brez

magnetnih izgub takrat, ko ni potrebno obremenjevanje motorja, oziroma v prostem teku.

6 Sklep

Na osnovi do sedaj narejenih simulacij in na laboratorijskem preizkuševališču izvedenih eksperimentov je bila potrjena upravičenost uporabe hranilnika s superkondenzatorjem. Prednost je predvsem v izboljšanju dinamičnih lastnosti glede na samo akumulatorsko baterijo. Zaradi razbremenitve baterije z dinamično komponento toka je pričakovati tudi znatno podaljšanje njene življenjske dobe.

Identičen poskus kot s superkondenzatorjem je predviden tudi pri hranilniku energije z vztrajnikom. Cilj je natančno izmeriti in ovrednotiti vse lastnosti, vključno z izkoristkom in dinamičnimi odzivi. Zlasti zanimiva bo primerjava lastnosti med čistim električnim sistemom s superkondenzatorjem in elektromehanskim sistemom z vztrajnikom.

Literatura

- [1] G. Rizzoni, L. Guzzella and B. M. Baumann, "Unified Modeling of Hybrid Electric Vehicle Drivetrains", *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008. APEC 2008*, Feb. 2008, pp. 280–285.
- [2] *Handbook of Batteries*, David Linden, Thomas Reddy, McGraw-Hill, New York, 2001 (<http://www.mcgraw-hill.com.au/html/9780071359788.html>)
- [3] J. Laeuffer, A Small Flywheel Energy Storage for Hybrid Cars, PCIM Europe 2012, 8 – 10 May, Nuremberg
- [4] M. Španer, "Hranilniki energije pri hibridnem pogonu", *Magistrsko delo*, Univerza v Mariboru, 2010.
- [5] Manwell, J. F. and J. G. McGowan. *Lead acid battery storage model for hybrid energy systems*. Solar Energy, 1993. 50(5): p. 399.
- [6] <http://www.leoton.ua/leoch-battery-djm1245.php>.