

Topologija močnostnega pretvornika za uporabo v serijskih hibridnih vozilih

Mitja Nemeč¹, Primož Bajec², Damijan Miljavec¹, Peter Zajec¹, Vanja Ambrožič¹

¹ Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani
Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

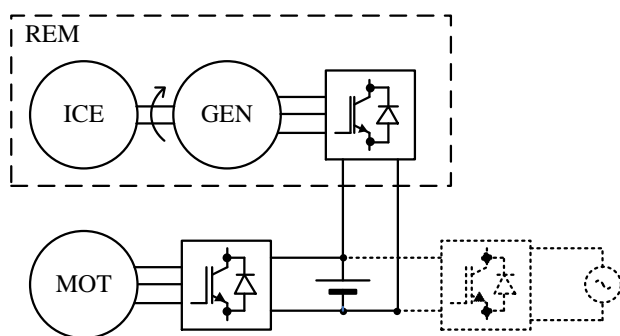
² Hidria Inštitut za materiale in tehnologije d.o.o.
Sp. Kanomlja 23, 5281 Spodnja Idrija, Slovenija
e-mail: mitja.nemec@fe.uni-lj.si

Power Converter Topology for the Range Extender Module

The paper presents a somehow unconventional but efficient power supply topology to be used in the Range Extender Module for electric vehicles. The design procedure, hardware and control loop is described. As one of the design requirements was to achieve the highest possible efficiency in the generator mode of the Range Extender, the commonly used three-phase inverter topology was not considered to be an optimal selection. An alternative topology is proposed instead. Judging from the prototype evaluation results are fully met.

1 Uvod

Z naraščajočo popularnostjo ter vedno večjim tržnim deležem hibridnih in električnih vozil, se vedno več pozornosti posveča specifičnim tehničnim rešitvam na tem področju. Od vseh različnih topologij prenosa moči od vira energije do koles, eno izmed možnosti predstavlja vozilo s podaljšanim dosegom (slika 1).



Slika 1. Prenos moči pri vozilu s podaljšanim dosegom

Glavni pogonski motor (MOT) dobi energijo iz baterije. Baterija se lahko polni iz omrežja, v primeru ko vozilo stoji in je priklopljeno na omrežje ali pa preko generatorja (GEN), ki ga poganja stroj z notranjim izgorevanjem (ICE). Ta sklop (REM) lahko deluje tudi ko se vozilo giblje in s tem podaljša doseg vozila. V primerjavi s popolnoma električnim vozilom, taka topologija ponuja bistveno večji doseg, pri čemer v vozilu večino časa obratuje samo električni stroj

(MOT). Druga prednost takšne topologije v primerjavi z ostalimi hibridnimi vozili je, da motor z notranjim izgorevanjem večino časa deluje samo v obratovalni točki, za katero je optimiran, tako da lahko celoten sklop doseže relativno visok izkoristek in nizke vrednosti emisij.

V nadaljevanju bomo predstavili proces načrtovanja skupaj s predlagano topologijo močnostnega pretvornika za modul za podaljšanje dosega (REM)

2 Postopek načrtovanja

Pri načrtovanju REM modula so bili glavni trije kriteriji: visok izkoristek, fleksibilnost regulacije ter varno delovanje kot tudi volumen in masa pretvornika. Ker električni stroj v REM modulu večino časa deluje v generatorskem načinu je tu tudi glavni poudarek pri optimizaciji. Prostor, ki je bil na voljo je narekoval izbiro sinhronskega stroja s trajnimi magneti (PMSM), saj le ti dosegajo dovolj velike gostote moči na volumen.

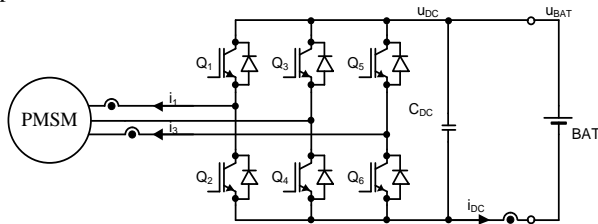
V motorskem načinu je bila edina zahteva, da stroj razvije najmanj 30 Nm navora od mirovanja pa vse do 1000 vrt⁻¹ s katerim zagotovimo uspešen zagon motorja z notranjim izgorevanjem. Pogon mora biti sposoben ugoditi tem zahtevam tako pri polni bateriji, kot tudi pri popolnoma izpraznjeni bateriji, kjer lahko enosmerna napetost pade vse do 280 V.

V generatorskem načinu pa mora biti pogon sposoben polniti baterijo s 15 kW moči od popolnoma izpraznjene baterije do popolnoma napolnjene baterije, kjer je lahko napetost baterije tudi do 425 V. Poleg tega mora pogon imeti možnost obratovanja tako v območju konstantne moči, konstantnega toka kot tudi konstantne napetosti. Nazivni vrtljaji v generatorskem načinu so 5000 vrt⁻¹ z 10% tolerance, znotraj katere mora biti pogon popolnoma funkcionalen

2.1 Topologija močnostne stopnje

Najbolj pogosta topologija močnostnega pretvornika za PMSM pogon je trifazni tranzistorski mostič, ki je prikazan na sliki 2. Zaradi zahtev po visokem izkoristku morebitni dodatni DC/DC pretvornik za prilagoditev napetostnih nivojev ni zaželen. Tako mora biti inducirana napetost stroja nižja od najnižje napetosti baterij tudi pri najvišjih obratovalnih hitrostih, saj le tako lahko reguliramo tok samo z ustreznim proženjem

tranzistorjev. Za polnjenje baterije mora pretvornik skupaj z navitji stroja delovati kot pretvornik navzgor. To pa lahko v skrajnem primeru, ko je baterija skoraj polna, vrtilna hitrost pa je na spodnji meji (4500 vrt^{-1}), povzroči da so fazni toki okoli 75 A.

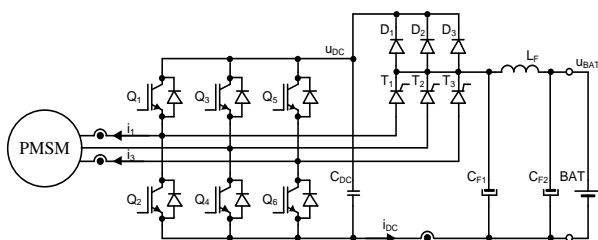


Slika 2. Tipična topologija močnega pretvornika

Pri tako visokih napetosti v sistemu je uporaba IGBT tranzistorjev kot preklopnih elementov najbolj smiselna. Vendar pa ta izbira zaradi relativno visokega padca v prevodni smeri in nizke inducirane napetosti stroja povzroči relativno nizek izkoristek pretvornika. Stroj bi sicer lahko bil konstruiran tako da bi imel višjo inducirano napetost vendar pa bi obratovanje pri izpraznjeni bateriji zahtevalo delovanje v območju slabljenja polja. To pa bi prineslo dve težavi. Prva in manjša težava je dodatno znižanje izkoristka zaradi povečanja statorskega toka potrebnega za slabljenje polja. Druga in večja težava pa je varnostni vidik, saj v primeru da je napetost baterije nižja od medfazne inducirane napetosti in, zaradi kakršnega koli razloga, odpove regulacija, sistem nima več nadzora nad strojem in tokom baterije. V tem primeru trifazni mostič preide v usmerniški režim s čimer izgubimo nadzor nad tokom baterije.

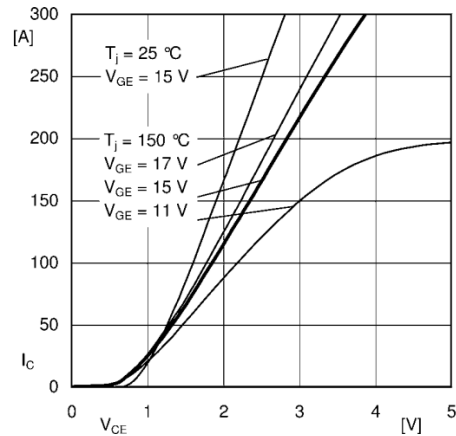
Zaradi vseh omenjenih razlogov predlagamo uporabo topologije, ki je prikazana na sliki 3. V motorskem načinu so tiristorji izklopljeni in trifazni tranzistorjski mostič obratuje enako kot pri klasični topologiji. Kondenzator C_{DC} služi samo kot »snubber« kondenzator, saj je enosmerni tokokrog prekinjen z diodami D_{1-3} .

V generatorskem načinu pa so stikala tranzistorjskega mostiča popolnoma izklopljena kjer mu diode D_{1-3} preprečujejo delovanje v usmerniškem načinu. Tako je lahko inducirana medfazna napetost stroja višja od napetosti baterije. Tok baterije pa je krmiljen s tiristorji T_{1-3} , ki skupaj z prostotečnimi diodami v tranzistorjih Q_2 , Q_4 in Q_6 sestavljajo polkrmiljeni usmernik. Izhodni filter C_{F1} , L_F in C_{F2} samo omejuje valovitost toka v baterijo, ki je posledica nizke frekvence komutacij, ki se pri stroju s 5 polovimi pari giblje med 1,1 kHz in 1,4 kHz.

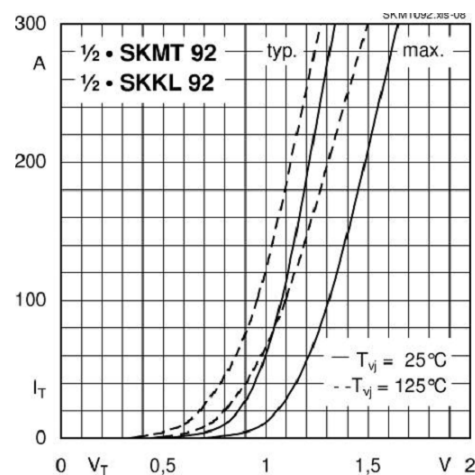


Slika 3. Predlagana topologija močnega pretvornika

Pri izbrani topologiji pa mora biti inducirana napetost vedno višja od napetosti baterije, tudi pri popolnoma polni bateriji. Ker je inducirana napetost višja, so fazni toki nižji (pri isti moči) in znašajo največ 25 A. Nižji tokovi povzročajo nižje izgube tako v stroju, kot tudi v pretvorniku in skupaj z elementi, ki imajo nižje padeč v prevodni smeri kot IGBT tranzistorji (sliki 4 in 5) prispevajo k bistveno izboljššanemu izkoristku.



Slika 4. Padec napetosti na IGBT-ju

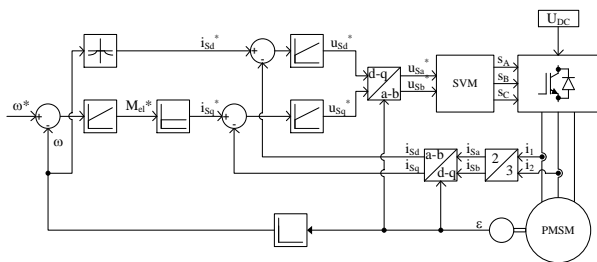


Slika 5. Padec napetosti na tiristorju

3 Načrtovanje regulacijske zanke

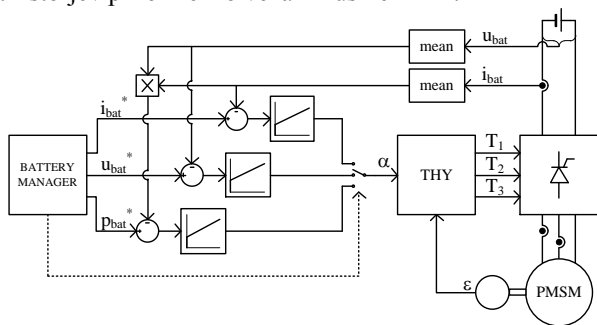
Ker močnostna stopnja deluje v dveh načinih, je tudi regulacijski algoritem sestavljen iz dveh različnih shem.

V motorskem načinu regulacija temelji na dobro znani teoriji orientacije polja (FOC) in je prikazana na sliki 6. Zaradi zahtev da stroj razvije polni navor v motorskem načinu tudi v mirujočem stanju smo se morali poslužiti uporabe absolutnega dajalnika pozicije, saj v takih primerih regulacija brez senzorja rotorskega kota ni zanesljiva.



Slika 6. Blokovna shema regulacije v motorskem načinu

Regulacijska shema za generatorski način pa je prikazana na sliki 7. Tudi tu se poslužujemo informacije o kotu rotorja za pravilno proženje tiristorjev, saj je inducirana napetost stroja odvisna od pozicije rotorja. S tem se izognemo dodani meritvi statorske napetosti, ki se tipično uporablja za sinhronizacijo proženja tiristorjev pri omrežno vezanih usmernikih.



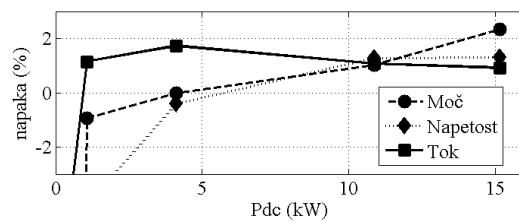
Slika 7. Blokovna shema regulacije v generatorskem načinu

V odvisnosti od načina polnjenja baterije se izbere ustrezen način regulacije. Zaradi nizke frekvence komutacije je lahko valovitost reguliranih veličin problematična. Tipična rešitev tega problema bi bila v znižanju pasovne širine regulatorjev. V našem primeru pa smo se raje poslužili filtriranja dejanskih vrednosti s tekočim povprečjem, ki zelo dobro duši valovitost pri relativno nizki zakasnitvi izhodnega signala [3].

Ker tak filter dobro deluje le v primeru, ko je okno povprečenja enako periodi osnovnega harmonika valovitosti, mora biti vzorčenje sinhronizirano s pozicijo stroja. V našem primeru smo s PLL zanko držali vzorčno frekvenco 64-krat višjo od električne frekvence stroja, kar je pri najvišjih hitrostih stroja pomenilo skoraj 30 kHz.

Sicer je res, da v tem primeru vzorčna frekvenca ni konstantna, kar bi lahko povzročalo probleme regulacijski zanki, vendar pa se vzorčna frekvenca spreminja samo za ±10%, in še to relativno počasi. Tako da to ne vpliva na točnost izračuna napetosti, toka in moči ter posledično na stabilnost regulacije [4].

Dodatno, tak način vzorčenja omogoča natančen in hiter izračun napetosti, toka in moči. Slika 8 tako prikazuje doseženo natančnost z uporabo 10 bitnega AD pretvornika in tokovnih ter napetostnih merilnikov z 1% natančnostjo.



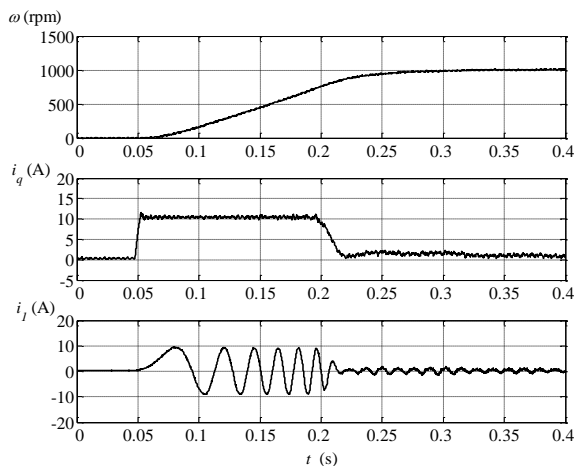
Slika 8. Napaka pri meritvi napetosti, toka in moči.

4 Rezultati

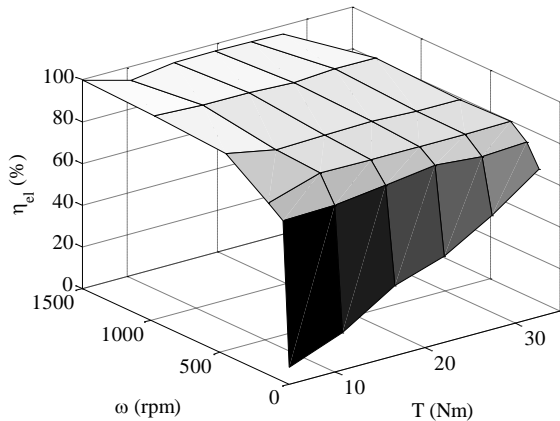
Laboratorijski prototip je bil zgrajen okoli IGBT močnostnega modula Semix151GD12E4s proizvajalca Semikron Za tiristorje T_{1-3} in diode D_{1-3} so bili uporabljeni moduli SKKL92/12E istega proizvajalca. Uporabljeni mikrokrmilnik TMS320F2808 podjetja Texas Instruments, v katerem sta se izvajala tako motorski kot generatorski krmilni algoritem ima dovolj PWM enot za proženje stikal v tranzistorskem mostiču kot tudi tiristorjev. Hkrati pa ponuja dovolj računске moči kot tudi delovnega spomina za izvajanje treh PID regulatorjev, PLL zanke, par filtrov s tekočim povprečjem in ostale nadzorne funkcije.

V motorskem načinu je bila prekopna kot tudi vzorčna frekvenca nastavljena na 10 kHz, pri čemer je bila napajalna napetost nastavljena na 300 V. Rezultate v motorskem načinu prikazujejo slike 9, 10 in 11.

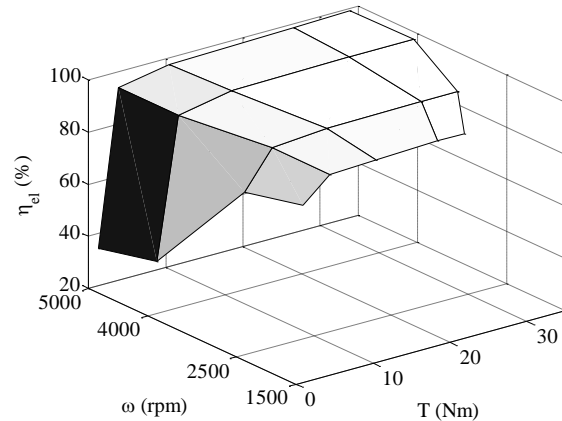
Kot vidimo na slikah 10 in 11, je izkoristek samega pretvornika precej visok, medtem ko se izkoristek celotnega REM sklopa nekoliko zniža predvsem na račun izkoristka PMSM stroja. Prav tako je razvidno, da je stroj sposoben razviti zahtevanih 30 Nm navora potrebnih za zagon motorja z notranjim izgorevanjem.



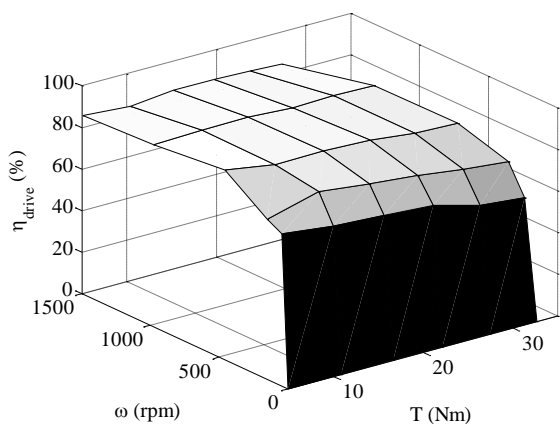
Slika 9. Zagonski prehodni pojav



Slika 10. Izkoristek pretvornika v motorskem načinu



Slika 12. Izkoristek pretvornika v generatorskem načinu

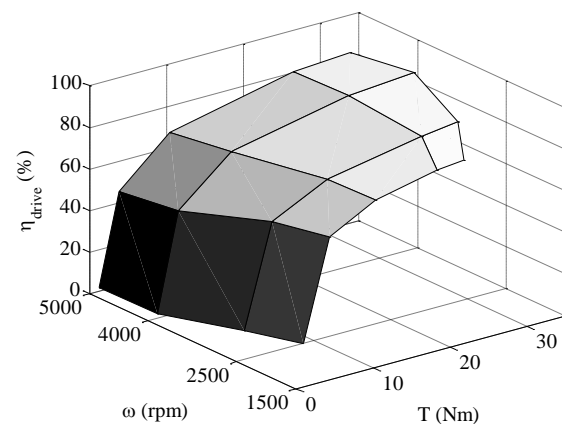


Slika 11. Celoten izkoristek v motorskem načinu

Pri testih generatorskega načina je bila baterija nadomeščena s čistim ohmskim bremenom (sliki 12 in 13). Kot kažejo rezultati je izkoristek pretvornika (η_{el}) zelo visok (tudi do 99.2%). Tako v pretvorniku nastaja le malo izgub (največ 120 W), ki pa se lahko disipirajo samo z zračnim hlajenjem, kar znatno poenostavi mehansko konstrukcijo pretvornika. Po drugi strani pa je skupni izkoristek REM modula relativno nizek zaradi slabega izkoristka stroja. Ugotovitve na podlagi meritev in termične analize kažejo, da so za večino izgub odgovorni vrtilni tokovi na rotorju. Le ti se pojavljajo tako v zaščitni oblogi trajnih magnetov kot tudi v vijakih, ki skupaj držijo rotorski paket. Ta pomanjkljivost bo odpravljena pri naslednji reviziji stroja.

5 Sklep

Uporabljena topologija močnostnega pretvornika se ponaša z izredno visokim izkoristkom v generatorskem



Slika 13. Celoten izkoristek v generatorskem načinu

načinu in poleg tega izpolnjuje tudi vse preostale zahteve.

Z ustreznim načrtovanjem, boljšimi konstrukcijskimi prijemi (segmentacija rotorskih magnetov, ustrezna izolacija posameznih elementov za preprečevanje krožnih tokov ...) in primerno izbiro materialov lahko pričakujemo skupni izkoristek modula za podaljšanje dosega tudi nad 92%.

Literatura

- [1] P. Bajec, B. Pevec, D. Voncina, D. Miljavec and J. Nastran, "Extending the low-speed operation range of PM generator in automotive applications using novel ac-dc converter control," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 2, pp. 436-443, Apr 2005.
- [2] B. Bose, *Modern power electronics and ac drives*. Prentice Hall PTR USA, 2002.
- [3] S. W. Smith, *Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists*. Newnes, 2003.
- [4] T. Wescott, *Applied control theory for embedded systems*. Newnes, 2006.