

Primerjava transformacijskih metod za vodenje magnetno sklopljenega devetfaznega sinhronskega stroja

Živa Stare, Rastko Fišer, Klemen Drobnič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: ziva.stare@fe.uni-lj.si

Comparison of transformation methods for the control of a magnetically coupled nine-phase synchronous machine

This paper presents a comparison between the multi-stator method (MS) and the adjusted vector space decomposition method (AVSD) for a current control of a nine-phase permanent magnet synchronous machine with magnetically coupled winding sets. The machine consists of three three-phase winding sets without phase shift, which share a common neutral point. It is shown that AVSD-based current control provides dynamic performance regardless of the degree of magnetic coupling between the winding sets. In contrast, MS-based current control has potential instability problems when strong magnetic coupling is present. However, when the magnetic coupling is weaker, the system stability problem is solved.

1 Uvod

Večfazne stroje, katerih število faz je enako večkratniku števila tri, lahko obravnavamo kot sklop skupin navitij. Skupina navitij je sestavljena iz treh faz, ki so med seboj prostorsko zamaknjene za $2\pi/3$ rad. Takšna delitev stroja prinaša mnogo prednosti, saj lahko posamezno skupino navitij obravnavamo kot samostojen trifazni stroj [1]. V večfaznem stroju so lahko skupine navitij med seboj različno prostorsko zamaknjene, v članku obravnavani devetfazni sinhronski stroj s površinsko nameščenimi trajnimi magneti (9SS) pa ima skupine navitij prostorsko nezamaknjene. Prostorski zamik med skupinami je definiran na podlagi kota med sosednjima fazama oz. istoienskima fazama različnih skupin.

Pomembna lastnost večfaznih strojev je tudi magnetna sklopljenost skupin navitij, ki je definirana z vrednostjo medsebojne induktivnosti med skupinami. V članku bo regulacija toka 9SS analizirana pri treh različnih stopnjah sklopljenosti, torej pri močni, delni ter šibki sklopljenosti. Namen članka je pri različnih stopnjah magnetne sklopljenosti primerjati delovanje regulacije toka v pogonu 9SS, ko je regulacija izvedena na podlagi različnih transformacijskih metod. Primerjani metodi sta že uveljavljena transformacijska večstatorska metoda (TVM) in v [2] izpeljana prilagojena transformacijska metoda razklopa prostorskega vektorja (PRPV).

TVM je primerna zgolj za vodenje večfaznih strojev, ki so grajeni iz skupin navitij. Transformacija se

izvede posamezno nad vsako skupino navitij z uporabo standardne Clarkine in Parkove metode. Čeprav je TVM enostavnejša, saj uporablja že znane trifazne pristope, pa pri regulaciji zanemari magnetno sklopljenost med skupinami navitij. To posledično vodi do neupoštevanih navzkrižno sklopljenih členov v transformirani napetostni enačbi, kar lahko povzroči nestabilno delovanje sistema [3].

Druga analizirana metoda bo PRPV, ki je prilagojena oblika uveljavljene transformacijske metode razklopa prostorskega vektorja (RPV). Slednja metoda je primerna le za večfazne stroje, ki imajo med skupinami navitij prostorski zamik, PRPV pa je primerna za izvedbe, katerih skupine so med seboj prostorsko nezamaknjene. Ne glede na prostorski zamik pa obe metodi pri transformaciji upoštevata tudi magnetno sklopljenost med skupinami, kar rezultira v razklopljenih napetostnih enačbah stroja [2].

Prav tako primerna regulacijska metoda za pogone z magnetno sklopljenimi večfaznimi stroji je regulacija povprečja in razlike [4]. Transformacija s Clarkino in Parkovo metodo je ponovno opravljena nad posameznimi skupinami navitij, nato pa se regulacija izvede nad povprečno vrednostjo in razlikami transformiranih tokov. Ob podrobnejši analizi metod RPV in PRPV je bilo ugotovljeno, da sta tudi ti metodi v splošnem le regulacija vsote (oziroma povprečja) in razlike [5], zato je dovolj, če v članku obravnavamo le eno.

2 Model 9SS v naravnih koordinatah

Regulacija toka na podlagi transformacijskih metod TVM in PRPV se bo primerjala v pogonu z 9SS. Stroj je sestavljen iz treh skupin navitij, ki so med seboj prostorsko nezamaknjene in magnetno sklopljene. Vse tri skupine so povezane v skupno izolirano ničlišče. Na sliki 1 je prikazana prostorska razporeditev skupin navitij, kjer je vsaka skupina oštevilčena z 1, 2 ali 3, vsako skupino pa sestavljajo tri faze, ki so označene z a , b in c . Stroj lahko opišemo z enačbama napetosti in magnetnega sklepa v naravnih koordinatah,

$$[u_s] = [R_s] [i_s] + \frac{d}{dt} [\psi_s], \quad (1)$$

$$[\psi_s] = [L_s] [i_s] + [\psi_{pm}], \quad (2)$$

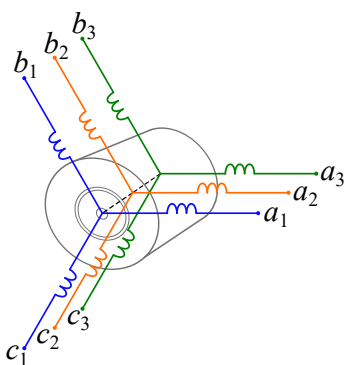
kjer je

$$[u_s] = [u_{a1}, u_{b1}, u_{c1}, u_{a2}, u_{b2}, u_{c2}, u_{a3}, u_{b3}, u_{c3}]^T$$

vektor statorskih napetosti. Po enakem zgledu sta definirana tudi vektorja statorskih tokov $[i_s]$ in magnetnih sklepov $[\psi_s]$. V enačbi nastopa še diagonalna matrika statorskih upornosti, kjer je predpostavljena enakost vseh statorskih navitij, $[R_s] = \text{diag}(R_s)$. Z $[L_s]$ pa je definirana konstantna krožna matrika induktivnosti,

$$[L_s] = \text{circ}(L_s, L_{m2}, L_{m2}, L_{m1}, L_{m2}, L_{m2}, L_{m2}, L_{m1}, L_{m2}, L_{m2}), \quad (3)$$

kjer je z L_s označena lastna induktivnost, L_{m1} je medsebojna induktivnost med prostorsko poravnanimi fazami in L_{m2} je vrednost medsebojne induktivnosti med fazami, ki imajo med seboj prostorski zamik $2\pi/3$ rad. Z $[\psi_{pm}]$ označujemo rotorski magnetni sklep.



Slika 1: Prostorska razporeditev skupin navitij v 9SSN.

3 Transformacijska večstatorska metoda

Transformacijska večstatorska metoda (TVM) je primerna zgolj za vodenje večfaznih strojev, ki so zgrajeni iz trifaznih skupin navitij. To omogoča, da se lahko napetostni model v naravnih koordinatah posamezne skupine navitij transformira v koordinatni sistem rotorskega polja na podlagi splošno znanih trifaznih oblik Clarkine $[C]$ in Parkove $[P]$ transformacije. S transformacijo se nato tvori k podprostorov, ki so odgovorni za elektromehansko pretvorbo energije, torej za ustvarjanje navora v stroju ter k ničelnih komponent, ki ne sodelujejo pri pretvorbi energije. Posledično je s TVM mogoče individualno regulirati tok oziroma navor posamezni skupini navitij [1, 6].

Po transformaciji napetostnega modela 9SS (1), (2) s TVM je za našo analizo predvsem zanimiva transformirana matrika induktivnosti (4). V (4), L_{dq} označuje induktivnost statorskega navitja v vzdolžni d oziroma prečni q osi in je enaka $L_s - L_{m2}$. Induktivnost je v obeh oseh enaka, saj ima 9SS površinsko nameščene trajne magnetne. Z L_M je označena medsebojna induktivnost med d oziroma q osmi različnih skupin navitij in je enaka $L_{m1} - L_{m2}$. Ta člen potrjuje, da TVM transformacija ne razklopi napetostnega modela 9SS, kar lahko povzroča težave pri vodenju stroja z močno magnetno sklopljenimi skupinami navitij, saj je $L_{m1} \approx L_s$ in zato $L_M \approx L_{dq}$. V primeru šibko sklopljenih skupin navitij pa velja, da je $L_{m1} \ll L_s$, posledično je $L_M \ll L_{dq}$ in je zato vpliv

sklopljenosti med skupinami navitij na vodenje stroja minimalen oziroma zanemarljiv. Prav tako so v (4) še induktivnosti ničelnih komponent L_0 in L_{M0} , ki pa jih lahko zanemarimo, saj zaradi izoliranega ničlišča stroja ničelna komponenta toka ne steče.

4 Prilagojena transformacijska metoda razklopa prostorskega vektorja

Prilagojena transformacijska metoda razklopa prostorskega vektorja (PRPV) je prilagojena oblika splošne transformacijske metode razklopa prostorskega vektorja, ki je primerna za devetfazne stroje s prostorsko nezamaknjenimi skupinami navitij. Opis transformacijske matrike $[T]$ in izpeljava transformiranega napetostnega modela na podlagi PRPV je podrobno opisana v [2]. Poglavitna lastnost PRPV pa je, da je po transformaciji veličin le en podprostor odgovoren za elektromehansko pretvorbo energije v stroju, ostali podprostori pa tvorijo ničelno komponento ter pomožne podprostore, ki opisujejo potencialno neravnovesje med skupinami navitij. Posledica dejstva, da je le en prostor odgovoren za pretvorbo energije je, da lahko le z regulacijo tega prostora reguliramo skupen navor stroja.

Ponovno nas po transformaciji zanima le transformirana matrika induktivnosti (5). V (5) je z L_{dq} označena induktivnost statorskega navitja v vzdolžni d oziroma prečni q osi in je enaka $L_s + 2L_{m1} - 3L_{m2}$. Ničelno komponento L_0 ponovno zanemarimo, saj imamo izolirano ničlišče. Z $L_z = L_s - L_{m1}$ pa je definirana induktivnost pomožnih podprostorov, ki je v primeru močno sklopljenih skupin navitij zelo majhna, saj velja $L_s \approx L_{m1}$. Transformirana matrika induktivnosti ima člene le po svoji diagonali, torej z PRPV dosežemo razklopljen napetostni model stroja.

5 Primerjava transformacijskih metod

Primerjava transformacijskih metod TVM in PRPV je bila izvedena v programskem okolju Simulink (Matlab) s simulacijo odziva modela pogona z 9SS na tokovno stopnico. Model pogona, katerega parametri so podani v tabeli 1, je sestavljal regulacijski algoritem na podlagi metod TVM in PRPV, devetfazni dvonivojski močnostni pretvornik in 9SS v naravnem koordinatnem sistemu. Parametri stroja so podani na podlagi laboratorijskega modela 9SS, ki je bil narejen s prenavitjem trifaznega sinhronskega stroja uporabljenega v servovolanu. Izvedbo 9SS, ki ima parametre podane v tabeli 1 bomo imenovali 9SSmoč, saj ima medsebojno induktivnost med skupinami navitij L_{m1} le za stresanje manjšo od lastne induktivnosti L_s , torej ima močno magnetno sklopljene skupine navitij. Nato sledi delno magnetno sklopljena izvedba 9SSdel, ki ima za polovico manjšo vrednost L_{m1} kot pa 9SSmoč. Na koncu pa imamo še šibko sklopljeno izvedbo 9SSšib, katere medsebojna induktivnost L_{m1} ima le petino vrednosti medsebojne induktivnosti pri 9SSmoč.

Na vseh treh izvedbah 9SS smo preizkusili regulacijo toka na podlagi metod TVM in PRPV, da smo lahko nato med seboj primerjali vpliv magnetne sklopljenosti skupin navitij na delovanje regulacije. Vse izvedbe 9SS so bile

$$[L_{TVM}] = [P][C][L_s][P]^{-1}[C]^{-1} = \begin{bmatrix} L_{dq} & 0 & 0 & L_M & 0 & 0 & L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_{dq} & 0 & 0 & L_M & 0 & 0 & L_M & 0 \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & L_{M0} & 0 & 0 & L_{M0} \\ L_M & 0 & 0 & L_{dq} & 0 & 0 & L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_M & 0 & 0 & L_{dq} & 0 & 0 & L_M & 0 \\ 0 & 0 & L_{M0} & 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & L_{M0} \\ L_M & 0 & 0 & L_M & 0 & 0 & L_{dq} & 0 & 0 \\ 0 & L_M & 0 & 0 & L_M & 0 & 0 & L_{dq} & 0 \\ 0 & 0 & L_{M0} & 0 & 0 & L_{M0} & 0 & 0 & L_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[L_{PRPV}] = [T][L_s][T]^{-1} = \begin{bmatrix} L_{dq} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{dq} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_z & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

med simulacijo obremenjene z navorom $M_l = 0,1 \text{ Nm}$, s čimer smo ponazorili trenje in ventilacijo. Na sliki 2 je prikazana shema regulacije s TVM, na sliki 3 pa shema regulacije s PRPV [2]. Zaradi boljše preglednosti slik, so iz diagramov odstranjeni tokovni in hitrostni vhod v blok kompenzacije križnega vpliva ter vsi vhodi električnega kota v transformacijske bloke. Ojačenja PI regulatorjev so izračunana na podlagi metode iz [7].

Na sliki 4 je prikazan odziv prečne komponente statorskega toka na tokovno stopnico pri 9SSmoč. Pri zgornjem časovnem poteku imajo pri obeh metodah PI regulatorji enake vrednosti ojačenj ($K_p = 1,558$ in $K_i = 9790$), torej od obeh metod zahtevamo enako visoko dinamičnost odziva. Iz poteka je razvidno, da PRPV zmore doseči zahtevano dinamičnost, regulacija s TVM pa tega ni zmožna, zato sistem postane nestabilen in prečna komponenta toka začne nenadzorovano naraščati. Kljub nestabilnemu odzivu s TVM, nas je zanimalo za kolikšen faktor je treba upočasniti PI regulatorje, da bo sistem postal stabilen tudi pri uporabi TVM. Na spodnjem časovnem diagramu je prikazan potek toka pri PRPV in istih vrednostih ojačenj regulatorjev, ojačenja regulatorjev pri TVM pa so močno upočasnjena — integralno ojačenje je bilo zmanjšano za faktor 67, proporcionalno pa za faktor 14. Čeprav je sistem sedaj stabilen tudi z metodo TVM, je njegova dinamika zelo počasna napram regulaciji s PRPV, kar je razvidno iz odzivov na tokovno stopnico, saj potrebuje dejanski tok pri TVM $\approx 10 \times$ dlje kot tok pri PRPV, da doseže željeno vrednost.

Na sliki 5 so prikazani odzivi prečne komponente statorskega toka na tokovno stopnico pri vseh treh izvedbah magnetne sklopljenosti in z obema metodama. Zaradi močno počasnejšega prehodnega pojava pri 9SSmoč z metodo TVM, je ta potek odstranjen. Ostali primeri so simulirani pri željeni visoki dinamiki sistema, zato imajo

njihovi PI regulatorji enake vrednosti ojačenj kot je imela v prejšnjem primeru regulacija s PRPV. Če primerjamo sedaj ostale časovne poteke lahko trdimo, da ne glede na izbrano metodo, se z zmanjševanjem magnetne sklopitve zmanjša tudi prehodni čas, ki je potreben da dejanski tok doseže željeno vrednost. Prehodni čas se ne zmanjšuje v nedogled, kar je razvidno pri potekih prečne komponente toka pri metodi PRPV in izvedbah 9SSdel in 9SSšib, saj se njuna poteka prekrivata. Prav tako pa lahko iz slike 5 opazimo, da se z zmanjševanjem magnetne sklopitve zmanjšuje tudi razlika med metodama, kar potrjuje dejstvo, da sta metodi v primeru nesklapljenega stroja oziroma pri stroju s šibko sklopitvijo enakovredni, saj so takrat navzkrižno sklopljeni členi L_M pri TVM enaki nič oz. zanemarljivi.

6 Zaključek

V članku je bila predstavljena primerjava regulacije toka 9SS pri uporabi dveh metod, TVM in PRPV. Potrjeno je bilo, da je TVM primerno implementirati le v primeru majhne magnetne sklopljenosti med skupinami navitij, v primeru močne sklopljenosti pa visoka dinamika ni več mogoča, saj sistem postane nestabilen. Nasprotno pa PRPV ohranja visoko dinamično odziva na zelene vrednosti toka pri vseh stopnjah magnetne sklopljenosti.

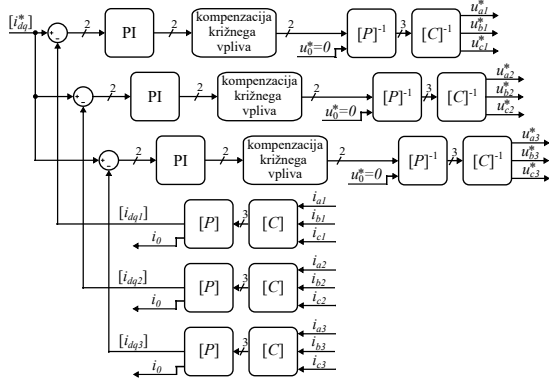
Pri nadaljevanju analize bo treba dobljene simulacijske rezultate potrditi še eksperimentalno. Prav tako bi bilo zanimivo metodi primerjati tudi v drugih obratovalnih stanjih npr. v slabljenju polja, po nastopu napake, ob upoštevanju neenakosti v zgradbi stroja itd.

Zahvala

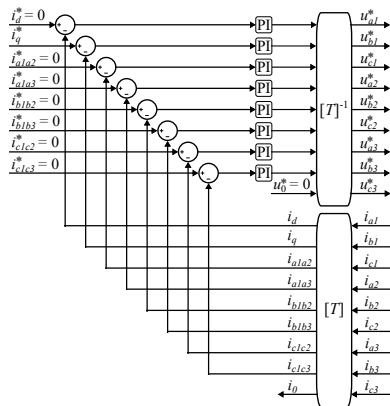
Delo je financirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenija (ARRS) pod doktorskim programom Mladi raziskovalci.

Tabela 1: Parametri obravnavanega pogona z 9SS.

Parameter	Vrednost
Napetost DC-tokokroga U_{DC}	12 V
Trajni tok I_{tr}	$\sqrt{2} \times 10,61$ A
Trajna vrtilna hitrost n_{tr}	1800 rpm
Število polovih parov p_p	3
Število faz n	9
Vztrajnostni moment J_m	1×10^{-4} kgm ²
Upornost statorskega navitja R_s	9,94 mΩ
Lastna induktivnost L_s	16,8 μH
Medsebojna induktivnost L_{m1}	16 μH
Medsebojna induktivnost L_{m2}	-3,4 μH



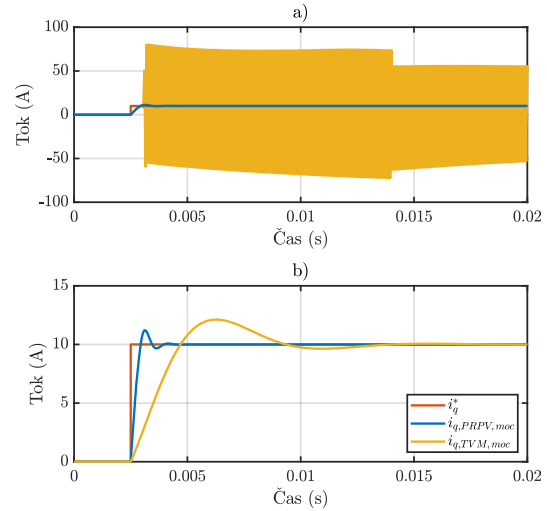
Slika 2: Shema regulacije toka, ki temelji na TVM.



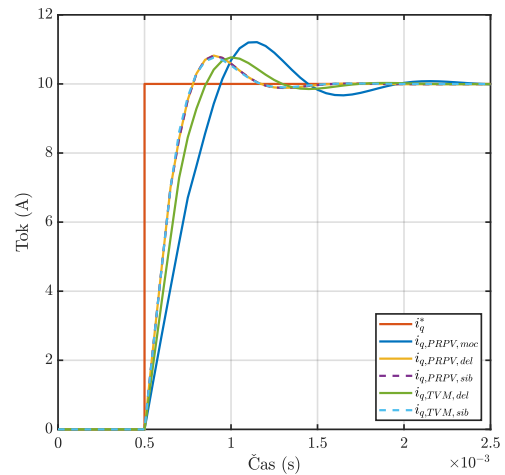
Slika 3: Shema regulacije toka, ki temelji na PRPV.

Literatura

- [1] Y. Hu, Z. Q. Zhu, and M. Odavic, "Comparison of Two-Individual Current Control and Vector Space Decomposition Control for Dual Three-Phase PMSM," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 5, pp. 4483–4492, Sep. 2017.
- [2] Ž. Stare, R. Fišer, and K. Drobnič, "Control of Nine-Phase Machine with Strongly Coupled Winding Sets," in *2023 7th International Young Engineers Forum (YEF-ECE)*. Caparica / Lisbon, Portugal: IEEE, Jul. 2023, pp. 1–6.
- [3] I. Zoric, M. Jones, and E. Levi, "Vector space decomposi-



Slika 4: Odziv prečne komponente toka na tokovno stopnico pri 9SSmoč: a) pri vrednostih ojačenj PI regulatorjev $K_p = 1,558$ in $K_i = 9790$ za obe metodi in b) metoda PRPV ima iste vrednosti ojačenj kot v primeru a), pri metodi TVM pa se ojačenji PI regulatorja zmanjšata



Slika 5: Odziv prečne komponente toka na tokovno stopnico pri 9SSmoč, 9SSdel in 9SSšib.

tion algorithm for asymmetrical multiphase machines," in *2017 International Symposium on Power Electronics (Ee)*. Novi Sad: IEEE, Oct. 2017, pp. 1–6.

- [4] J. Delavec, "Vodenje simetričnega trojnega trifaznega stroja," Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Tech. Rep., 2019.
- [5] M. Zabaleta, E. Levi, and M. Jones, "Modelling approaches for an asymmetrical six-phase machine," in *2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Santa Clara, CA, USA: IEEE, Jun. 2016, pp. 173–178.
- [6] M. Slunjski, "Control of a Nine-Phase Symmetrical PMSM with Reduced Rare Earth Material," Ph.D. dissertation, Liverpool John Moores University, Liverpool, Nov. 2020.
- [7] S.-K. Sul, *Control of electric machine drive system*, ser. IEEE Press series on power engineering. Hoboken, N.J: Wiley-IEEE, 2011, no. 55.