

Načrtovanje programske opreme za vodenje večfaznega pogona

Mitja Nemec, Andraž Rihar

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

Software design for the control of a multi-phase drive

Abstract. *Recent increase of current capability and output power of electric drives is a result of important technology-related improvements in the field of semiconductor power switches and utilization of multi-phase configurations. Multi-phase multi-system electric machines can be magnetically coupled at different levels, resulting in different mutual inductances. Control of magnetically coupled multi-system machines is not straightforward. The paper describes the effects of different control strategies on phase currents in multi-phase systems, presented with simulation results. Results show that phase-opposition control of magnetically-coupled machines is pointless. Furthermore, advanced control strategies, focused on using a combination of the main control algorithm, as well as additional difference-removal algorithms are presented. A graphical user interface was prepared for easier testing and interpretation of test results.*

1 Uvod

Razvoj električnih pogonov je neposredno povezan z razvojem polprevodniških močnostnih stikal. Tako z današnjo tehnologijo namreč hitro dosežemo tokove v območju 500 A – 1000 A, ki predstavljajo tako problem za močnostno elektroniko kot tudi za sam stroj. Tipična rešitev, ki se danes vedno bolj pogosto uveljavlja, je prehod s trifaznega pogona na večfazni pogon [1], [2]. Poleg povečanja moči ob uporabi enake tehnologije pa večfazni pogoni omogočajo tudi doseganje nižjih izgub [2], [3] in redundanco v primeru napak [4].

Vendar pa v večini primerov večfaznih pogonov ni dovolj samo razširitev na strojnem nivoju (pretvornik in stroj), bistvena sprememba je tudi v načinu regulacije.

Za potrebe razvoja in testiranje večfaznega pogona nujno potrebujemo programsko opremo s pripadajočim grafičnim uporabniškim vmesnikom, ki bi lahko bila splošno uporabna za testiranje različnih večfaznih strojev in za preverjanje vplivov različnih dejavnikov (principov vodenja, konstrukcijskih parametrov, karakteristik pretvornikov, itn.).

Članek predstavlja načrtovanje programske opreme za vodenje večfaznega pogona s poudarkom na uporabi kombinacije glavnih regulatorjev in regulatorjev razlike. Pristop je prikazan za primer 6-faznega dvosistemskega motorja.

2 Topologije

Če kot parameter delitve večfaznih strojev v obzir vzamemo tip magnetne sklopitve, torej magnetne

povezave več navitij stroja, lahko električne stroje v grobem delimo na dve področji. Lahko so izdelani kot popolnoma neodvisni sistemi, torej med posameznimi sistemi oziroma istosmiselnimi fazami posameznih sistemov ni magnetne sklopitve (faktor sklopa $K = 0$) in jih označujemo kot $n \times 3$ – fazni stroji (na primer 2×3 – fazni stroj). Lahko pa med sistemi obstaja magnetna sklopitve, ki je načeloma med istosmiselnimi fazami različnih sistemov pozitivna ($0 < K < 1$). Faktor sklopa K je sicer poenostavljeno določen kot razmerje med medsebojno induktivnostjo M dveh navitij in korenem zmnožka lastnih induktivnosti L navitij. V našem primeru predvidevamo, da so lastne induktivnosti vseh navitij enake. V nadaljevanju so za lažjo interpretacijo dogajanja v večsistemskem stroju prikazani rezultati simulacije klasičnega H-mostiča, ki napaja dve bremenski dušilki z enakima lastnima induktivnostma (L_1 in L_2) in medsebojno induktivnostjo M , ki je povezana s faktorjem sklopa K (slika 1). Simulacije so bile izvedene v programskem okolju LTSpice pri stikalni frekvenci 20 kHz.

2.1 Brez sklopitve med sistemi

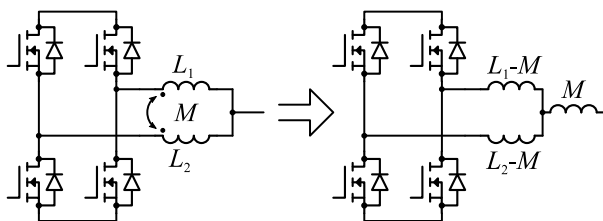
V primeru brez sklopitve sistemov ($K = 0$) lahko vsak sistem vodimo kot ločen stroj, saj veličine med seboj, razen prek položaja rotorja, niso povezane. Možna je tudi uporaba faznega zamika PWM signalov do 180° , ki je zelo pogosta na področju večvejnih DC/DC pretvornikov [5] in lahko v nekaterih konfiguracijah večfaznih strojev pomembno vpliva na zmanjšanje valovitosti toka v enosmerni vmesni tokokrog [6].

Rezultati simulacij kažejo, da je v primeru faktorja sklopa $K = 0$ tako ob uporabi sofaznega (fazni kot PWM je 0° , slika 2), kot tudi protifaznega proženja (fazni kot je 180° , slika 5), valovitost toka čez posamezno dušilko enaka, le v drugem primeru fazno zamaknjena. Z vidika celotnega bremenskega toka, torej skupnega toka obeh dušilk, je v drugem primeru valovitost enaka 0 A.

2.2 Sklopitve med sistemi

V primeru sklopitve sistemov analiza zaradi medsebojne induktivnosti M , ki povezuje oba sistema oziroma v primeru predstavljenih simulacij obe bremenski dušilki, postane kompleksnejša.

Za lažjo interpretacijo dogajanja lahko lastnima induktivnostma posameznih bremenskih dušilk odštejemo medsebojno induktivnost in torej dobimo $L_1 - M$ oziroma $L_2 - M$, na izhodno sponko pa dodamo dodatno dušilko z induktivnostjo M (slika 1) [7].

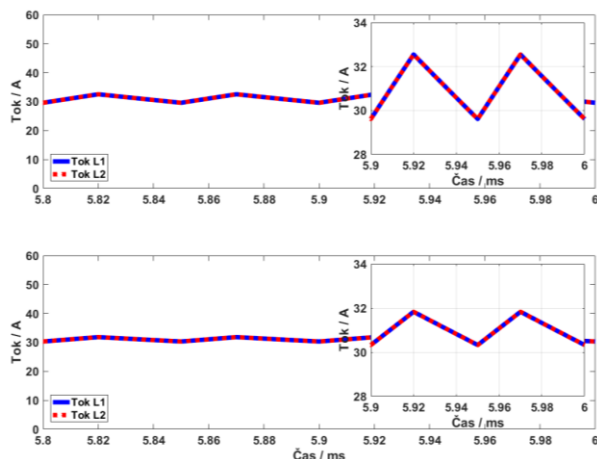


Slika 1. Shematski prikaz (levo) H-mostiča, ki napaja dve dušilki z lastnima induktivnostma L_1 in L_2 in medsebojno induktivnostjo M ter nadomestni shematski prikaz (desno) s tremi nadomestnimi dušilkami z vrednostmi L_1-M , L_2-M in M .

Stopnja sklopitve je seveda lahko različna in se spreminja od 0 do 1, pri čemer faktor sklopa $K = 1$ označuje uporabo bifilarnega navitja, pri čemer je vsak odcep napajan s svojo vejo. Običajno je seveda tudi v tem primeru še prisotne nekaj stresane induktivnosti posameznih navitij in zato raje predvidevamo faktor sklopa $K = 0,95$. Negativni faktorji sklopa so na področju električnih pogonov izredno redki, saj s posameznimi navitji želimo istosmiselno povečevati skupni navor motorjev. Negativni faktorji sklopa se pogosteje pojavljajo v DC/DC pretvornikih, kjer imajo določene prednosti [7].

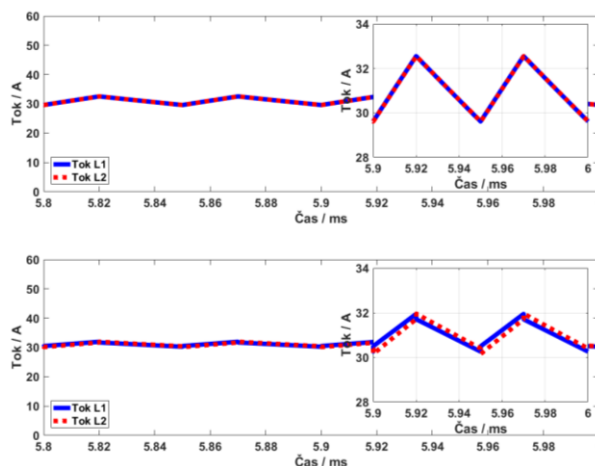
V primeru pozitivnega faktorja sklopa uporaba faznih zamikov signalov PWM pri proženju posameznih vej ni več povsem enostavna in ima različne vplive.

V primeru, da je sistem sklopljen pozitivno in je prožen popolnoma sofazno, se valovitost skozi posamezen sistem zmanjša na polovico, saj zaradi medsebojnega vpliva v tem primeru vsako navitje prevzame polovico valovitosti toka (slika 2).



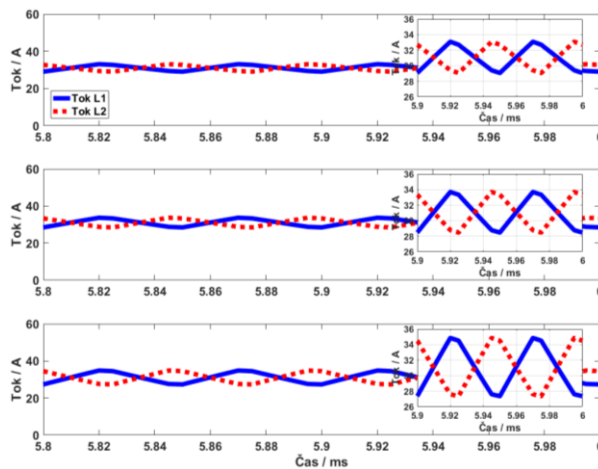
Slika 2. Potek tokov skozi dušilki L_1 (modra) in L_2 (rdeča) za sofazno proženje pri faktorju sklopitve $K = 0$ (zgornji del) in $K = 0,95$ (spodnji del)

Zaradi parazitnih efektov v sistemu (zakasnitve prožilnih vezij, zakasnitve MOSFET-ov, itn.) lahko pride do relativno majhne zakasnitve posameznih prožilnih PWM signalov. Majhna zakasnitev v primeru $K = 0$ praktično ne vpliva na potek tokov čez posamezni dušilki, ob $K = 0,95$ se posamična valovitost sicer ponovno razpolovi, pojavijo pa se manjše tokovne konice, ko sistema nista enako prožena (slika 3).



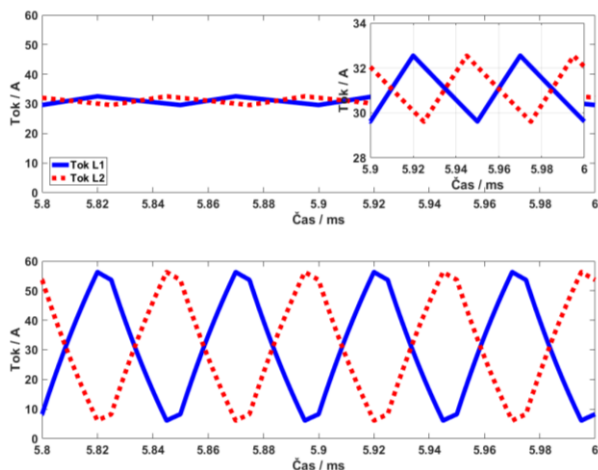
Slika 3. Potek tokov skozi dušilki L_1 (modra) in L_2 (rdeča) za skoraj sofazno proženje (zakasnitev 100 ns) pri faktorju sklopitve $K = 0$ (zgornji del) in $K = 0,95$ (spodnji del)

V primeru pozitivnega K in protifaznega proženja je valovitost na izhodu sicer enaka nič, saj sta toka ravno fazno premaknjena za 180° , povečevanje faktorja sklopa pa neposredno vpliva na povečevanje valovitosti toka skozi posamezni dušilki in je v določenih primerih (odvisno od aplikacije in različno sklopljenih strojev [8]) lahko smiselno ($K = 0,33, 0,5$ in $0,66$ – slika 4).



Slika 4. Potek tokov skozi dušilki L_1 (modra) in L_2 (rdeča) za protifazno proženje (fazni zamik 180°) pri faktorjih sklopitve $K = 0,33$ (zgornji del), $K = 0,5$ (srednji del) in $K = 0,66$ (spodnji del)

V primeru bifilarnega navitja ($K = 0,95$) protifazno proženje ni smiselno (slika 5), saj se valovitost tokov poveča čez vse razumne meje. Tako je protifazno proženje smiselno samo pri strojih, pri katerih so posamezni sistemi razklopljeni oziroma zelo šibko sklopljeni. V vseh ostalih primerih je sofazno proženje edina smiselna izbira.



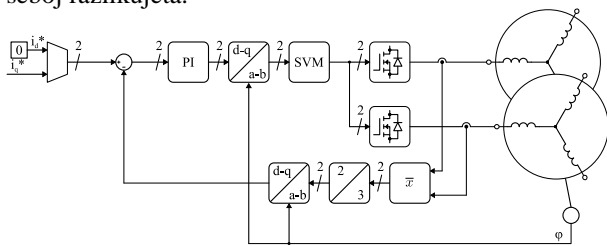
Slika 5. Potek tokov skozi dušilki L_1 (modra) in L_2 (rdeča) za protifazno proženje (fazni zamik 180°) pri faktorju sklopitve $K = 0$ (zgornji del) in $K = 0,95$ (spodnji del)

3 Tokovna regulacija pri večfaznih strojih

Tokovna regulacija električnih strojev temelji na dobro znani teoriji polja [9], kjer merjeni tok preslikamo v dvoosni koordinatni sistem in nato reguliramo prečno in vzdolžno komponento z dvema PI regulatorjema. Tak princip regulacije je uporaben tudi pri večfaznih strojih.

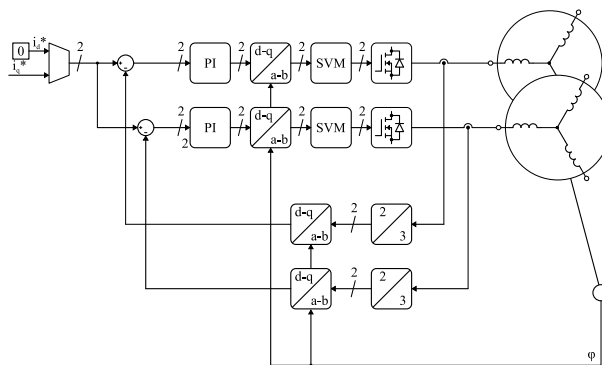
3.1 Klasična paralelna regulacija

V kolikor imamo opravka z 2×3 -faznim strojem (šestfazni stroj, pri katerem sta dva sistema medsebojno popolnoma razklopljena), lahko tok reguliramo na dva načina. Najbolj preprost način je, da reguliramo povprečno vrednost toka obeh sistemov (slika 6). Prednost tega načina je predvsem v nezahtevnosti, saj ne potrebujemo dodanih regulatorjev, vendar pa lahko prihaja do asimetrije toka, v kolikor se sistema med seboj razlikujeta.



Slika 6. Regulacija povprečnega toka pri razklopljenem dvakrat trifaznem stroju.

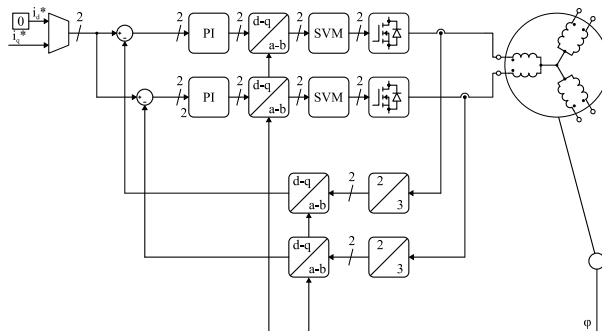
Nekoliko bolj zahtevna rešitev je regulacija toka vsakega posameznega sistema (slika 7). Z regulacijo toka v posameznem sistemu dosežemo, da ne prihaja do asimetrije toka, vendar pa ta rešitev rabi nekoliko več računske moči.



Slika 7. Regulacija tokov v vsakem posameznem sistemu pri razklopljenem dvakrat trifaznem stroju.

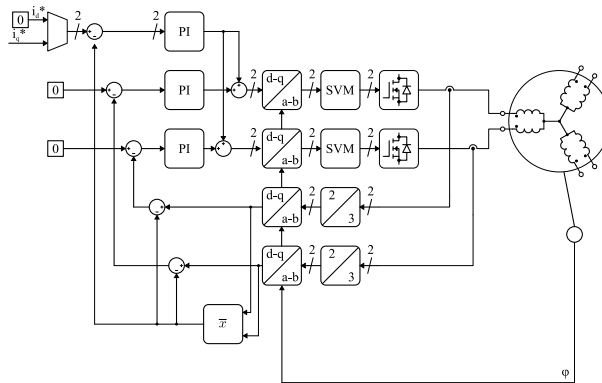
3.2 Glavni regulator ter regulatorji razlike

Pri strojih, kjer so sistemi medsebojno magnetno sklopljeni, pa ločena regulacija toka v posamezni veji ni dovolj. Zaradi medsebojne sklopitve se vsaka sprememba v enem sistemu obnaša kot motnja v sklopljenem sistemu. V kolikor se torej sistem odzove na motnjo, bo tako ponovno zmotil sklopljeni sistem. Tako klasična regulacija posameznih komponent deluje le v primeru, ko so spremembe toka dovolj majhne, le-to pa posledično pomeni slabo dinamiko (slika 8).



Slika 8. Regulacija tokov v vsakem posameznem sistemu pri sklopljenem šestfaznem stroju

Ta problem se lahko reši na več načinov, vendar se najlažja rešitev ponuja preko regulacije povprečnega toka (slika 9). V tem primeru glavno delo regulacije opravlja regulator povprečne vrednosti, s katerim dosežemo dovolj veliko dinamiko. K temu so dodani regulatorji, s katerimi odpravljamo asimetrijo v vsakem sistemu, ki pa imajo počasnejšo dinamiko.



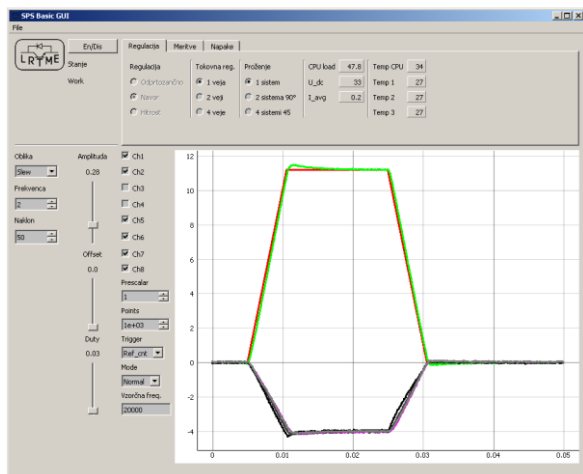
Slika 9. Regulacija povprečnega toka in posameznih tokov v vsakem sistemu pri sklopljenem šestfaznem stroju

4 Preostala programska oprema

V fazi preizkušanja večfaznega pogona je zaželeno imeti možnost spremljanja ne le vseh merjenih veličin (predvsem tokov), temveč tudi možnost izbire načina proženja (sofazno, protifazno) ter principa regulacije (regulacija povprečne vrednosti, regulacija posameznega sistema ali regulacija povprečne vrednosti ter asimetrije posameznega sistema). Tako je v samem mikrokrmilniku treba realizirati vse možne načine regulacije ter proženja.

4.1.1 Programska oprema in uporabniški vmesnik

Za nadzor izvajanja programa v mikrokrmilniku in izbiro načina delovanja je bil v programskem okolju Python pripravljen namenski grafični uporabniški vmesnik (slika 10). Ta omogoča izbiro številnih parametrov in načinov delovanja (zgoraj levo), spremljanje numeričnih vrednosti izmerjenih veličin (zgoraj desno), nastavljanje obratovalnih točk (levo) in grafični prikaz izmerjenih in izračunanih vrednosti za lažjo interpretacijo in sledenje postopku testiranja.



Slika 10. Namenski grafični uporabniški vmesnik z implementirano regulacijsko logiko za spremljanje in nastavljanje parametrov obratovalnih točk razsmernika.

5 Zaključek

Pri prehodu s trifaznega pogona na večfazni pogon je poleg same konstrukcije stroja in močnostne elektronike treba dovolj pozornosti nameniti tudi proženju in regulaciji toka. Pri tem velja upoštevati, da je najprimernejši način tako proženja kot tudi regulacije odvisen od same konstrukcije stroja. Pripravljen programski vmesnik, vključno z namensko izdelanim grafičnim uporabniškim vmesnikom, bo v sklopu nadaljnjih raziskav lahko veliko pripomogla k enostavnejši, kvalitetnejši in celovitejši analizi delovanja večfaznih večsistemskih pogonov z različnimi stopnjami magnetne sklopitve.

Literatura

- [1] E. Levi, "Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 5, pp. 1893–1909, May 2008.
- [2] E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat, in S. Williamson, "Multiphase induction motor drives – a technology status review," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, no. 4, pp. 489, 2007.
- [3] J. Huang, M. Kang, J. q Yang, H. b Jiang, in D. Liu, "Multiphase machine theory and its applications," in *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2008, pp. 1–7.
- [4] M. J. Duran in F. Barrero, "Recent Advances in the Design, Modeling, and Control of Multiphase Machines - Part II," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, pp. 459–468, Jan. 2016.
- [5] O. Garcia, P. Zumel, A. de Castro, in A. Cobos, "Automotive DC-DC bidirectional converter made with many interleaved buck stages," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 3, pp. 578–586, May 2006.
- [6] S. Bhattacharya, D. Mascarella, G. Joos, J.-M. Cyr, in J. Xu, "A Dual Three-Level T-NPC Inverter for High-Power Traction Applications," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 4, no. 2, pp. 668–678, Jun. 2016.
- [7] A. Leban in D. Vončina, "Vpliv sklopljenih dušilk na lastnosti vzporedno vezanih pretvorniških modulov," presented at the Zbornik petnajste mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2006, 25. - 27. september 2006, Portorož, Slovenija, 2006, pp. 459–462.
- [8] Y. Hu, Z. Q. Zhu, in M. Odavic, "Comparison of Two-Individual Current Control and Vector Space Decomposition Control for Dual Three-Phase PMSM," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 5, pp. 4483–4492, Sep. 2017.
- [9] V. Ambrožič in P. Zajec, *Električni servo pogoni*. V Ljubljani: Slovensko združenje elektroenergetikov CIGRÉ-CIRED, 2016.