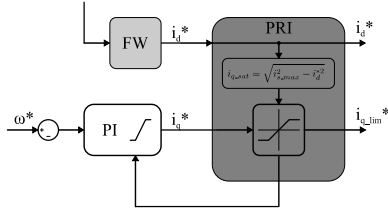
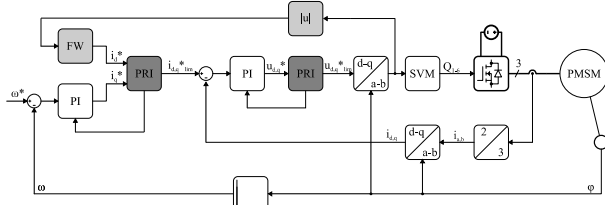


upoštevati, da je sistem prišel v nasičenje zaradi podajanja prioritete d -komponente. V kolikor regulator hitrosti tega ne upošteva se lahko v področju slabljenja polja (ko je q -komponenta toka, zaradi prisotnosti d -komponente, nekoliko bolj omejena) integralni člen preveč napolni. Posledično lahko pri prehodnih pojavih zaradi tega prihaja do večjih prenehajev. Obravnave tega problema v literaturi nismo zasledili. Rešitev je prikazana na sliki 3.



Slika 3: Implementacija prioritete v d -osi

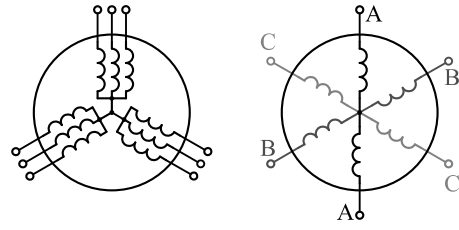
Tako je celotna regulacijska shema v resnici malenkost bolj kompleksna saj upoštevanje prioritete veličin v d -osi zahteva povratno povezavo pri regulaciji veličin v q -osi, da preprečitev integralnega pobega deluje pravilno (slika 4). Regulacijsko gledano je to pravzaprav trivialen problem, s stališča implementacije je to že nekoliko kompleksnejše predvsem, ker imajo posamezni moduli več medsebojnih povezav kar je pri razvoju, predvsem pa pri vzdrževanju programske opreme nezaželeno [14].



Slika 4: Upoštevanje dinamičnega nasičenja v q osi

3 Večfazni stroji

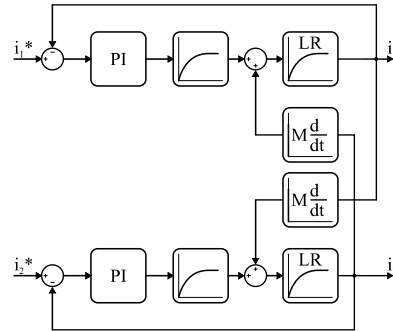
Pri implementaciji regulacije večfaznih strojev se srečamo z novimi težavami. Ob tem se velja nekoliko omejiti, saj obstaja veliko različnih tipov večfaznih strojev [10]. V laboratoriju se ukvarjamo predvsem z n -krat 3-faznimi stroji. Tak stroj se lahko načrtuje kot klasični trifazni stroj le navitja so lahko bodisi »multi-filarna«, ali pa gre za navitja iste faze, ki so prostorsko zamaknjena pri strojih z več polovimi pari (slika 5). V tem primeru lahko govorimo tudi o stroju z ločenimi navitji. Poleg tega so možne tudi kombinirane izvedbe. Ti stroji se obnašajo enako kot trifazni stroji in tudi konstrukcija stroja je praktično enaka konstrukciji klasičnih trifaznih strojev. Le-to olajša načrtovanje celotnega pogona v primeru, kjer je glavni kriterij paralelizacija zaradi doseganja višje moči.



Slika 5: n -krat trifazni stroj

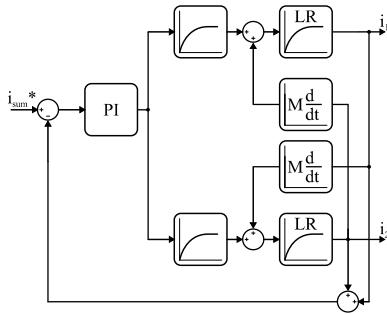
3.1 Vpliv sklopitve na stabilnost

Pri »multi-filarno« navitih stroji je prva težava, ki se pojavi izvedba in stabilnost regulacije toka. Ker sta dve ali več faz med seboj močno sklopljeni prihaja do medsebojnega vpliva (slika 6) [15]. Sprememba toka v eni veji se kaže kot motnja v drugi veji. V idealnih razmerah, ko je želena vrednost za obe veji enaka, ni prisotnosti šuma in so parametri v obeh vejah enaki sta obe zanki stabilni. Zaradi prisotnosti šuma pa regulacija ene veje obratuje drugače, kot regulacija druge veje, pri čemer bo medsebojna sklopitev povzročila oscilacije. Najenostavnejša rešitev tega je, da s precejšnjim znižanjem ojačanja regulatorjev preprečimo oscilacije. Vendar s tem bistveno poslabšamo dinamiko odziva na spremembo želene vrednosti.



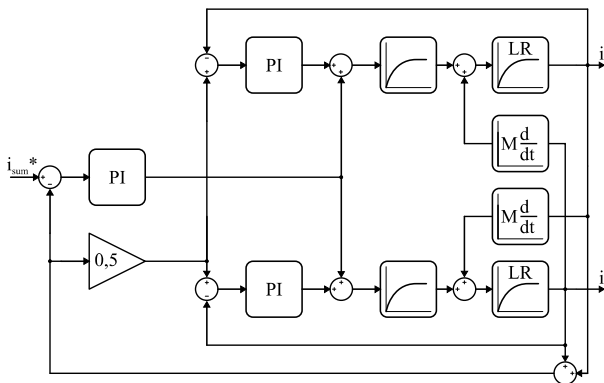
Slika 6: Regulacija toka pri dveh sklopljenih navitjih

Rešitev, ki ohranja dinamiko in je še vedno enostavna je, da za obe veji uporabimo samo en regulator (slika 7). V tem primeru reguliramo vsoto obeh tokov, pri čemer medsebojna sklopitev nima vpliva na stabilnost regulacije. Edina težava tega pristopa je, da zaradi različnih parametrov v obeh vejah, tok posamezne veje zagotovo odstopa od povprečne vrednosti vseh vejnih tokov. S primernim načrtovanjem (enaka dolžina medsebojnih povezav, temperaturna izenačitev močnostnih komponent, ...) se lahko ta odstopanja kontrolira, vendar pa moramo v tem primeru pri željeni vrednosti toka imeti nekaj rezerve, da posamezni vejni tokovi ostanejo znotraj meja, ki jih določa strojna oprema.



Slika 7: Regulacija vsote tokov

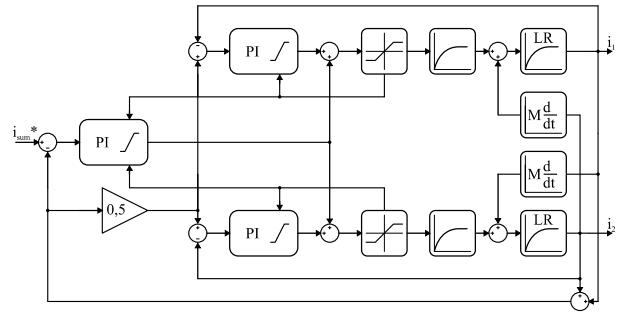
Najbolj komplicirana rešitev pri kateri ohranjamo dinamiko ter tudi uspešno izenačimo oba (vse) vejna toka izhaja iz regulacije vsote tokov. Tu (slika 8) je regulator vsote glavni regulator, s katerim dosežemo zahtevano dinamiko. V vsako vejo pa sta, paralelno glavnemu regulatorju, dodana tudi regulatorja razlike, ki delujeta precej počasneje in izenačita tok posamezne veje. Tako sta toka obeh vej enaka povprečju tokov.



Slika 8: Regulacija vsote in razlike tokov

Pri paralelni vezavi regulatorjev pa nastopijo nove težave. Prvo vprašanje je, kako se nastavi nasičenja posameznih regulatorjev (slika 9)? V kolikor imamo srečo in je regulirani sistem popolnoma simetričen, bosta izhoda regulatorjev razlike enaka 0, tako je smiselno izhod regulatorja povprečja nastaviti na polno območje (100%). Izhoda regulatorjev razlike pa lahko omejimo na vrednost, s katero pričakujemo, da bomo dosegli izenačitev tudi ko bosta sistema maksimalno nesimetrična. In pri pogonih z »multi-filarno« izvedbo strojev to znaša od nekaj % do največ 10% polnega območja.

Dodatno pa je treba omejiti tudi vsoto izhodov regulatorja povprečja ter regulatorja razlike. Vsota vsekakor ne sme presegati polnega območja. Če preseže, potem moramo dodano omejiti izhoda posameznih regulatorjev (podobno kot v poglavju 2.1) Ali se obema regulatorjema enako zmanjša omejitev izhoda? Ali je morda bolj smiselno zmanjšati omejitev uteženo? Žal smo do sedaj ta problem samo zaznali, jasnega odgovora na to vprašanje še nimamo.

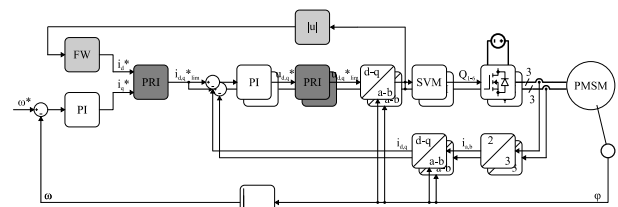


Slika 9: Upoštevanje nasičenja pri vsoti izhodov dveh (ali več) regulatorjev

3.2 Slabljenje polja pri večfaznih strojih

Zelo podobno se regulacija stroja z n skupinami trifaznih navitji dodano zakomplicira v področju slabljenja polja ob upoštevanju prioritete v d -osi (slika 10). V kolikor v eni skupini navitji pride do nasičenja pri krmilnih veličinah zaradi upoštevanja prioritete, kako naj se sistem odzove? Ali naj se dodatno omeji v obeh (vseh) skupini proporcionalno? Ali naj se omeji samo skupina, ki je prišla v nasičenje?

Dodatno vprašanje pa je tudi, katero vrednost izbrati kot povratni signal za regulator slabljenja polja? Povprečno vrednost amplitude želene vrednosti napetosti od vseh skupin navitji ali amplitudo skupine z največjo vrednostjo? Naše izkušnje kažejo, da je bolj smiselno izbrati amplitudo skupine navitji z največjo vrednostjo. V tem primeru smo vedno dovolj globoko v slabljenju polja, da lahko vse skupine uspešno regulirajo tok. V kolikor bi za povratno vrednost izbrali povprečno vrednost amplitud želene vrednosti od vseh skupin, je lahko polje v eni skupini premalo slabljeno in tako v tisti skupini tok ni več reguliran.



Slika 10: Regulacija večfaznega stroja

Še najbolj izrazito se ta problem pojavi ko pogon z dvema skupinama navitji obratuje v fantomskem obratovanju. Pri tem en skupina obratuje kot motor, druga pa kot generator. Tak način obratovanja je uporaben za testiranja, saj lahko pogon obremenimo brez zunanje mehanske obremenitve. Tipično v skupini, ki deluje kot motor, regulatorji bližje nasičenja kot pri skupini, ki deluje kot generator.

4 Zaključek

Kot smo videli, je pri implementaciji regulacije treba biti pozoren na mnoge detajle že pri klasičnih trifaznih pogonih. Pri večfaznih pogonih pa se pojavijo novi problemi za katere sicer obstajajo rešitve vendar pa je tudi tu treba biti pozoren na mnoge tehnične detajle.

Po naših izkušnjah pogon sicer deluje tudi v primeru, ko naštetih problemov ne naslovimo, vendar pri delovanju prihaja do problemov, kot so: nekoliko višji prenehaji pri prehodnih pojavih ter nestabilno delovanje v področju slabljenja polja.

Zahvala

Delo je bilo sofinancirano iz programa ARRS »Pretvorniki električne energije in regulirani pogoni« P2-0258 (B).

Literatura

- [1] P. Zhao in G. Yang, "Torque Density Improvement of Five-Phase PMSM Drive for Electric Vehicles Applications," *J. Power Electron.*, vol. 11, no. 4, pp. 401–407, Jul. 2011, doi: 10.6113/JPE.2011.11.4.401.
- [2] L. Parsa in H. A. Toliyat, "Five-phase permanent-magnet motor drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 1, pp. 30–37, Jan. 2005, doi: 10.1109/TIA.2004.841021.
- [3] P. Zheng, F. Wu, Y. Lei, Y. Sui, in B. Yu, "Investigation of a Novel 24-Slot/14-Pole Six-Phase Fault-Tolerant Modular Permanent-Magnet In-Wheel Motor for Electric Vehicles," *Energies*, vol. 6, no. 10, Art. no. 10, Okt. 2013, doi: 10.3390/en6104980.
- [4] E. Jung, H. Yoo, S.-K. Sul, H.-S. Choi, in Y.-Y. Choi, "A Nine-Phase Permanent-Magnet Motor Drive System for an Ultrahigh-Speed Elevator," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 3, pp. 987–995, Maj 2012, doi: 10.1109/TIA.2012.2190472.
- [5] 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, p. 489, 2007, doi: 10.1049/iet-epa:20060342.
- [6] J. Wen in K. M. Smedley, "Hexagram Inverter for Medium-Voltage Six-Phase Variable-Speed Drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2473–2481, Jun. 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.921475.
- [7] L. de Lillo *et al.*, "Multiphase Power Converter Drive for Fault-Tolerant Machine Development in Aerospace Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 2, pp. 575–583, Feb. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2036026.
- [8] 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, doi: 10.1109/JESTPE.2016.2517819.
- [9] M. Nemeč in A. Rihar, "Načrtovanje programske opreme za vodenje večfaznega pogona," Zbornik Elektrotehniške in računalniške konference ERK Portorož, Slovenija: IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE, 2018.
- [10] A. Rihar, M. Nemeč, in H. Lavrič, "Trendi v razvoju močnostne elektronike za vodenje električnih strojev," *Elektrotehniški Vestn.*, vol. 86, no. 5, pp. 237–247, 2019.
- [11] A. Rihar, P. Zajec, M. Nemeč, M. Petkovšek, in D. Vončina, "Načrtovanje, zasnova in izdelava večfaznega razsmernika z MOSFET stikali," Zbornik Elektrotehniške in računalniške konference ERK Portorož, Slovenija: IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE, 2018, pp. 217–220.
- [12] J.-H. Song, J.-M. Kim, in S.-K. Sul, "A new robust SPMSM control to parameter variations in flux weakening region," in *22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation Proceedings of the 1996 IEEE IECON*, Aug. 1996, pp. 1193–1198 vol.2. doi: 10.1109/IECON.1996.566049.
- [13] Y. Zhang, J. Jin, H. Jiang, in D. Jiang, "Adaptive PI Parameter of Flux-Weakening Controller Based on Voltage Feedback for Model Predictive Control of SPMSM," *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Oct. 2020, pp. 2674–2681. doi: 10.1109/ECCE44975.2020.9235453.
- [14] S. MacConnell, *Code complete: a practical handbook of software construction*. Microsoft Press, 1993.
- [15] Ž. Stare, K. Drobnič, in M. Nemeč, "Ocena dinamičnega odziva izhodnega toka enosmernega močnostnega pretvornika s sklopljenima dušilkama na podlagi metode lege korenov," Zbornik Elektrotehniške in računalniške konference ERK Portorož, Slovenija: IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE, 2022.