

Brezensenzorska regulacija hitrosti enosmernega stroja

Mitja Nemeč¹, Yuge Zhao²

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

²École supérieure d'ingénieurs en génie électrique, Rouen, France

E-pošta: mitja.nemec@fe.uni-lj.si

Sensorless speed control of DC drive

Abstract. This paper presents a method to control the speed of a DC machine without any speed/angle sensor. The method is based upon detection of BEMF voltage ripple which is the result of machine construction. By measuring the rotor current and/or impressed voltage ripple one can determine the rotor speed with spectral analysis. The experimental results show the transient response to speed reference change as well as the load change. Furthermore the startup and reversing procedure are also shown. The method, while having some drawbacks, is ready to use with any DC machine.

1 Uvod

Z vedno večjo stopnjo avtomatizacije, ki jo omogoča tehnološki napredek, napredne rešitve v električnih pogonih prodirajo tudi na področja, kjer zaradi cenovne občutljivosti to do sedaj ni bilo mogoče.

Tako se na področju enosmernih strojev v zadnjih desetletjih ni spremenilo veliko. V novih pogonih se enosmerni stroji uporabljajo samo pri cenovno najbolj občutljivih aplikacijah, kjer pa so stroji že v uporabi, pa se v primeru nadgraditve pogona tipično zamenja celoten pogon s strojem skupaj.

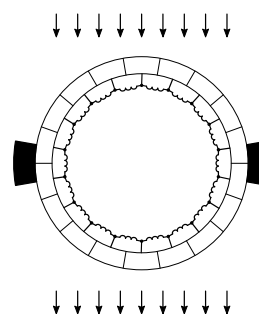
Enosmerni stroj je bil v preteklih desetletjih najbolj razširjen stroj, poleg asinhronskega stroja, zaradi enostavne relacije med napajalno napetostjo in vrtilno hitrostjo. Tako se je vrtilna hitrost krmilila preko napajalne napetosti. Z napredkom tehnologije in predvsem z cenovno dosegljivostjo pa regulacija hitrosti prodira tudi na področja, kjer je sicer krmiljene hitrosti dovolj dobro, saj se z regulacijo nekoliko izboljšajo lastnosti delovanja. Za regulacijo pa potrebujemo tako senzor hitrosti kot tudi pripadajočo signalno in močnostno elektroniko (v nadaljevanju krmilnik).

Zaradi lažje integracije sistema kot tudi zaradi zniževanja stroškov so se pri izmeničnih pogonih pojavile rešitve s katerimi lahko reguliramo hitrost brez senzorja hitrosti. V kolikor gre za generične rešitve, potem le-te delujejo pri srednjih do visokih vrtilnih hitrostih in imajo težave oz. ne delujejo pri nizkih vrtilnih hitrostih. Če pa je rešitev razvita za točno določen stroj in pretvornik, pa se lahko doseže tudi obratovanje v mirovanju oz. pri nizkih vrtilnih hitrostih.

V tem članku bo predstavljena taka rešitev za regulacijo hitrosti enosmernega stroja brez senzorja. Tako lahko novim aplikacijam, ki se jo poslužijo, znižamo ceno, pri obstoječih aplikacijah pa je možna nadgradnja brez poseganja v mehaniko pogona.

2 Teorija

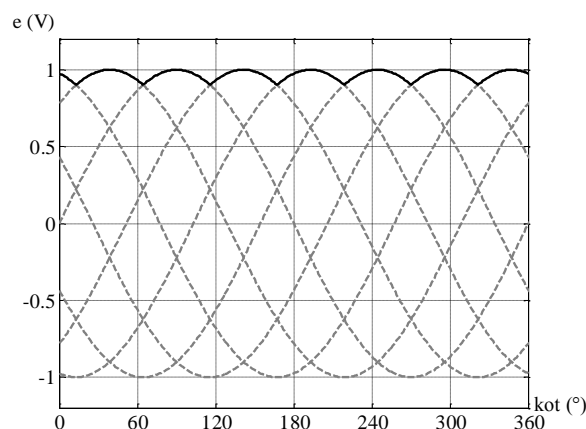
Teorija delovanja enosmernega stroja je že dobro znana [1]. Za potrebe brezsenzorske regulacije hitrosti pa si je treba pogledati, kako je zgrajen rotorski sklop (slika 1).



Slika 1. Rotor enosmernega stroja s ščetkami, komutatorjem in rotorskimi navitji

Ko se rotor vrti ima inducirana napetost posameznega rotorskega navitja sinusno obliko. Inducirana napetost na rotorskih sponkah pa ima obliko ovojnice vseh sinusnih napetosti posameznih rotorskih navitij (slika 2). Tako inducirana napetost ni popolnoma enosmerna. V primeru, da je stroj napajen s togo enosmerno napetostjo ta valovitost inducirane napetosti povzroči valovitost v rotorskem toku, katere frekvenca je proporcionalno odvisna od vrtilne hitrosti. V kolikor pa je stroj napajen tokovno, pa mora valovitost pritisnjene napetosti popolnoma slediti valovitosti inducirane napetosti. In tudi v tem primeru je frekvenca valovitosti proporcionalna vrtilni hitrosti.

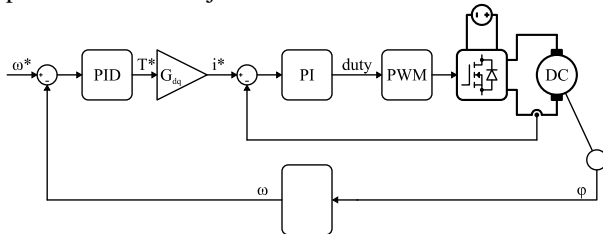
Tako lahko z meritvijo frekvence valovitosti toka oz. napetosti dobimo podatek o vrtilni hitrosti stroja [2].



Slika 2. Inducirana napetost posameznega rotorskega navitja (črtkano) in inducirana napetost na rotorskih sponkah (polna črta)

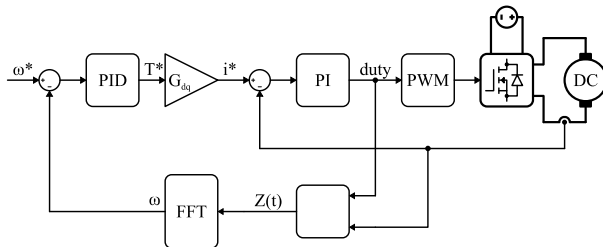
3 Brezsenzorska regulacija

Pri klasični regulaciji hitrosti (slika 3) dinamiko regulacije hitrost določa mehanska vztrajnost, saj sta zakasnitev samega izračuna hitrosti iz merjenega kota in zakasnitev notranje tokovne regulacijske zanke v večini primerov zanemarljivi.



Slika 3. Blokovna shema regulacije hitrosti s senzorjem

Pri brezsenzorski regulaciji hitrosti pa se hitrost določi z oceno frekvence valovitosti bodisi v pritisnjeni napetosti bodisi v rotorskem toku (slika 4).

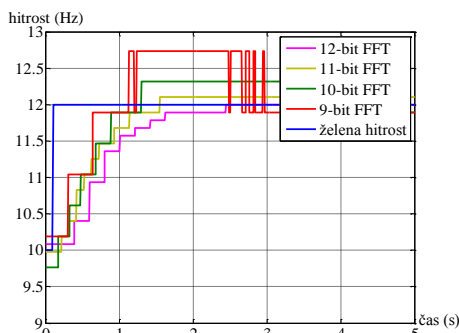


Slika 4. Blokovna shema regulacije hitrosti brez senzorja

Uporaba hitre Fourierjeve transformacije (FFT) pa prinaša več težav. Prva težava je omejena frekvenčna ločljivost saj je le-ta omejena z časom zajema signala [3], [4]. Le to se vidi na sliki 5.

Nadalje omejena ločljivost v sklenjeni regulacijski zanki lahko pripelje do mejnega nihanja, kar je lahko nezaželeno [5].

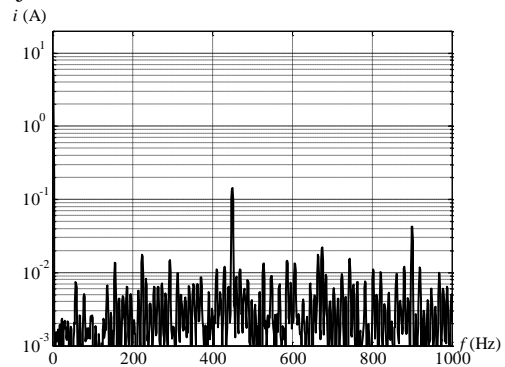
Tretja težava pa je časovna zakasnitev, saj je treba zajeti določeno število vzorcev. To je razvidno na sliki 5, ki prikazuje potek ocenjene hitrosti na podlagi FFT analize valovitosti rotorskega toka med pospeševanjem. Pri vzorčni frekvenci 20 kHz zakasnitev v primeru 512 vzorcev (9 bitni FFT) znaša 25,6 ms, pri 4096 vzorcih (12 bitni FFT) pa kar 204,8 ms. Tako je sama zakasnitev zaradi izračuna FFT zanemarljiva, saj za 4096 točk znaša 0,2 ms.



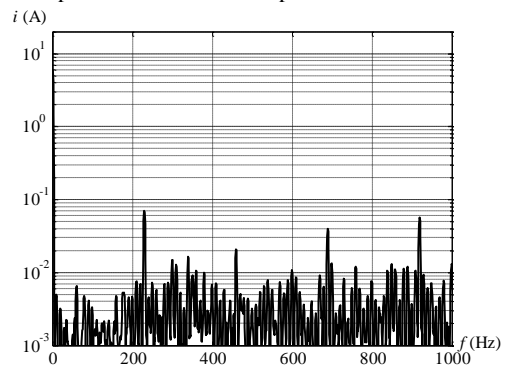
Slika 5. Zakasnitev signala hitrosti v primeru različne dolžine okna za FFT (512, 1024, 2048 in 4096 vzorcev).

Tudi sam zagon gredi je problematičen. Dokler se gred ne vrtili, je amplituda valovitosti 0 V in je s frekvenčno analizo ne moremo zaznati. Tako je sam zagon treba izpeljati odprtozankno, ko pa hitrost dovolj naraste za uspešen zajem hitrosti, pa lahko preklopimo v zaprtozankno delovanje.

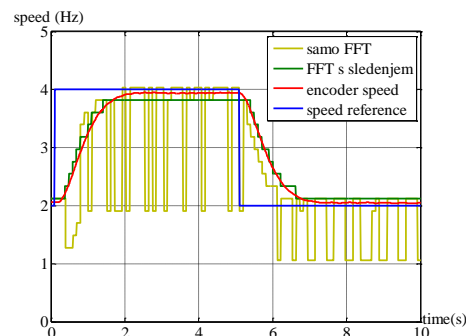
Zadnja težava pa je spekter valovitosti. V tem namreč ni izrazita samo ena frekvenčna komponenta (slika 6). Tako je lahko v določenih primerih amplituda drugih frekvenčnih komponent (tipično dvojna in polovična frekvenčna komponenta) višja od iskane frekvenčne komponente. To je še posebej izrazito pri strojih, pri katerih so ščetke optimalno nastavljene za eno smer vrtenja, stroj pa se vrtili v nasprotno smer (slika 7). In v kolikor algoritem ocenjuje vrtilno hitrost samo na podlagi frekvence valovitosti z najvišjo amplitudo, lahko določi napačno vrtilno hitrost (slika 8). Le temu se uspešno izognemo tako, da algoritmu zožimo iskanje frekvence na območje okoli predhodno pridobljene ocene hitrosti.



Slika 6. Spekter valovitosti toka pri vrtilni hitrosti +10 Hz



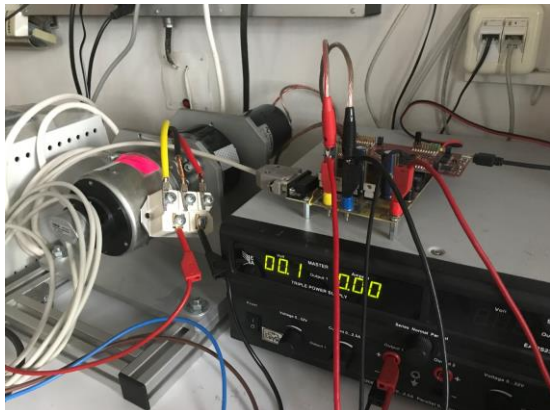
Slika 7. Spekter valovitosti toka pri vrtilni hitrosti -10 Hz



Slika 8. Podatek o vrtilni hitrosti pridobljen na podlagi frekvence valovitosti z najvišjo amplitudo

4 Rezultati

Algoritem za brez-senzorsko regulacijo hitrosti je bil preizkušen na enosmernem pogonu s podatki iz tabele 1. Na isti gredi sta bila tudi sinhronski stroj s trajnimi magneti, ki je služil za obremenitev, in dajalnik kota, s katerim smo merili dejansko hitrost (slika 9). Algoritem se je izvajal na mikrokrmilniku TMS320F28377S.

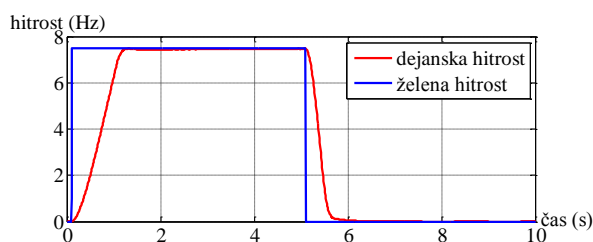


Slika 9. Slika testnega sistema

Tabela 1. Podatki pogona

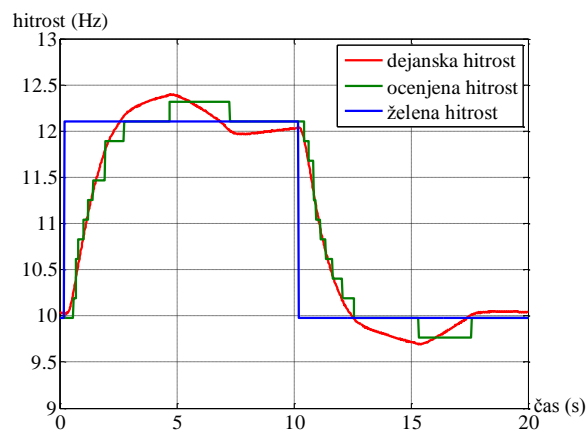
Moč stroja	500 W
Nazivni tok stroja	20 A
Nazivni navor	1,2 Nm
Nazivna vrtilna hitrost	4000 min ⁻¹
Rotorska upornost	0,3 Ω
Rotorska induktivnost	180 μH
Rotorski vztrajnostni moment	0,0027 kgm ²
Napajalna napetost	24 V
Preklopna/vzorčna frekvenca	20 kHz

Slika 10 prikazuje zagon in zaustavitev gredi v primeru, ko je hitrost regulirana s pomočjo senzorja. Odziv je hiter in brez prenehajev, v stacionarnem stanju pa je hitrost pričakovano konstantna.

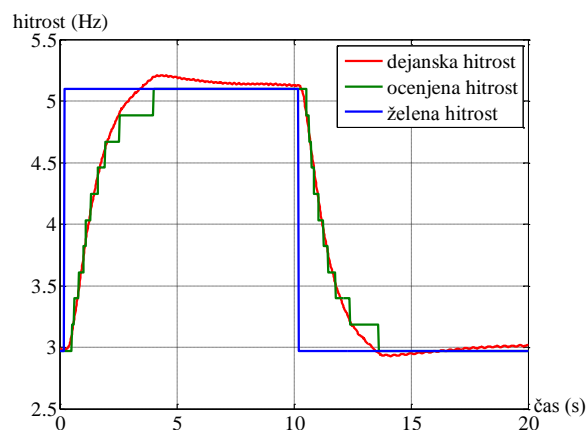


Slika 10. Zagon in ustavitev gredi s klasično regulacijo s senzorjem

Zaradi omejene frekvenčne ločljivosti pri oceni hitrosti na podlagi spektra valovitosti, je v nadaljevanju zelena hitrost bila omejena samo na vrednosti, ki jih lahko točno ocenimo s spektralno analizo. Tako sliki 11 in 12 prikazujeta odziv na skočno spremembo zelene vrednosti hitrosti v primeru regulacije brez senzorja. Zaradi dodatne zakasnitve, ki jo vnaša vzorčenje dovolj velikega števila vzorcev za potrebe spektralne analize, je odziv počasnejši in tudi prihi.

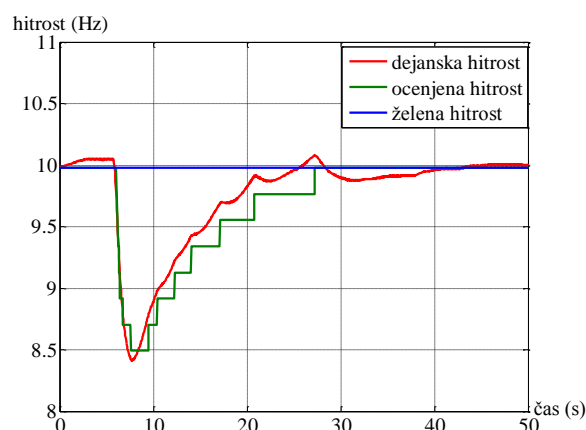


Slika 11. Zaprtzančni odziv na spremembo hitrosti (z 10 Hz na 12.1 Hz)



Slika 12. Zaprtzančni odziv na spremembo hitrosti (z 3 Hz na 5.1 Hz)

Odziv na spremembo obremenitve pa je prikazan na sliki 13. Vidimo, da se pogon ustrezno odzove, še bolj pa pade v oči neenakomeren odziv dejanske hitrosti, ki je posledica grobe ocene hitrosti na podlagi spektralne analize. Vendar pa se hitrost po prehodnem pojavu ustali.

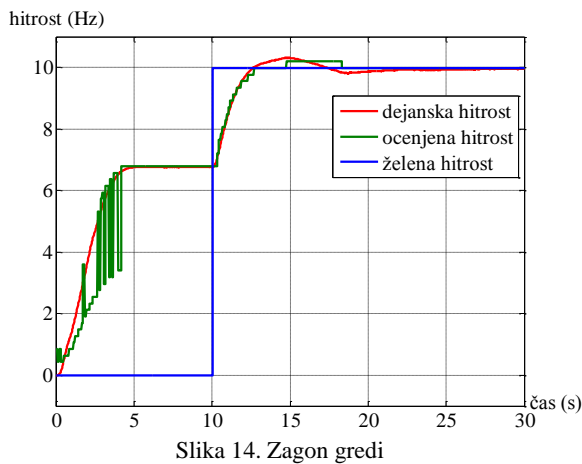


Slika 13. Zaprtzančni odziv na spremembo obremenitve pri 10 Hz

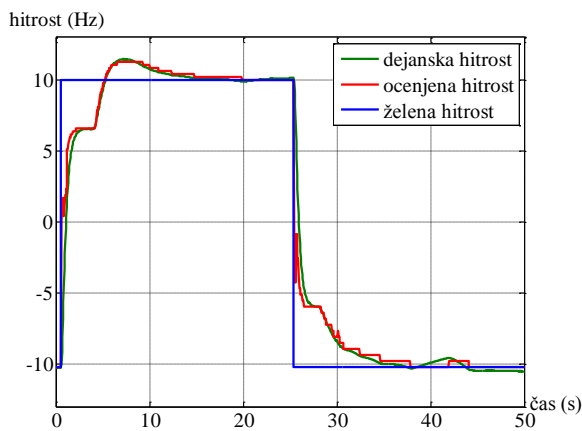
Zagon takega pogona poteka v dveh fazah (slika 14). Najprej se stroj samo krmili, tako da se počasi dvigne pritisnjena rotorska napetost. Le-ta povzroči, da čez rotor steče tok, ki generira navor in stroj prične pospeševati. Ko stroj neha pospeševati, je inducirana

napetost blizu pritisnjene napetosti. Preklop iz krmiljenja v regulacijo hitrosti se zgodi, ko sistem zazna dovolj enakih zaporednih odčitkov. Šele potem lahko gred poženemo do višje ali nižje hitrosti.

Še nekoliko bolj zapleteno je reverziranje takega pogona (slika 15). Ko želena vrednost spremeni predznak, pogon preklopi v način krmiljenja dokler sistem ne zazna dovolj enakih zaporednih odčitkov hitrosti z ustreznimi predznaki in v okolici pričakovane vrednosti. Nato pa se zopet preklopi iz krmiljenja v regulacijo hitrosti.



Slika 14. Zagon gredi



Slika 15. Reverziranje

5 Zaključek

Predstavljena metoda regulacije hitrosti brez senzorja sicer deluje vendar pa ima velike omejitve, ki preprečujejo, da bi bila splošno uporabna. Metoda je pogojno uporabna pri pogonih kjer so mehanske časovne konstante zelo velike. V tem primeru postane zakasnitev zaradi spektralne analize zanemarljiva tudi, ko okno zajema podaljšamo z namenom izboljšanja frekvenčne ločljivosti.

Efekt, ki ga povzroča valovitost inducirane napetosti, žal ni primeren za določanje hitrosti pri nizkih vrtilnih hitrostih. Zato bomo v prihodnje pozornost namenili spremenljivi impedanci rotorja. V kolikor bi le-to opisali z modelom, bi morebiti lahko z opazovalnikom določili položaj rotorja (in preko tega tudi hitrost).

Literatura

- [1] D. Miljavec in P. Jereb, *Električni stroji: temeljna znanja*. Fakulteta za elektrotehniko, 2008.
- [2] S. Ropoša in M. Hadžiselimović, „Meritev vrtljajev v sesalno enoto integriranega univerzalnega motorja“, v *Zbornik petnajste mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference*, Portorož, Slovenija, 2006, let. A, str. 391–394.
- [3] M. Nemeč in A. Leban, „Uporaba diskretne Fourierjeve transformacije v močnostni elektrotehnik“, v *Zbornik dvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference*, Portorož, Slovenija, 2011, let. A, str. 356–370.
- [4] K. Drobnič, V. Ambrožič, in R. Fišer, „Uporaba diskretne Fourierjeve transformacije pri detekciji zlomljenih rotorskih palic v asinhronskem motorju“, *Elektrotehniški Vestn.*, let. 80, št. 4, str. 177–183, 2013.
- [5] H. Peng, A. Prodic, E. Alarcon, in D. Maksimovic, „Modeling of Quantization Effects in Digitally Controlled DC-DC Converters“, *IEEE Trans. Power Electron.*, let. 22, št. 1, str. 208–215, jan. 2007.