

Možnosti testiranja električnih pogonskih sklopov na preizkuševališču z rekuperacijo energije

Henrik Lavrič, Luka Košir, Klemen Drobnič, Rastko Fišer

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

Testing possibilities for electrical drives components with recuperative energy test bench

Complexity of modern electric drives demands high reliability of its components. In this paper an energy efficient testing of converted-fed electric drives is presented. A DC link connection between two converters, which supply breaking and tested machine, enables energy recuperation. The software solution provides five different testing modes such as: manual control of only one motor, manual control of synchronized machines, fully automated measurement of various characteristics (torque, efficiency...), loading according user-defined function and loading using periodical reference signal. Experimental results of presented tests confirm versatility of the test bed.

1 Uvod

V sodobnih industrijskih aplikacijah se uporabljajo različni elektromotorski pogoni [1]. Kompleksnost njihove zasnove je odvisna od zahtev v tehnološkem procesu in nenazadnje tudi od cene. Za zagotavljanje kvalitetnega obratovanja tekom predvidene življenjske dobe, je smiselno tako elektromotorje kot tudi ostale gradnike elektromotorskih pogonov pred vgradnjo preizkusiti [2].

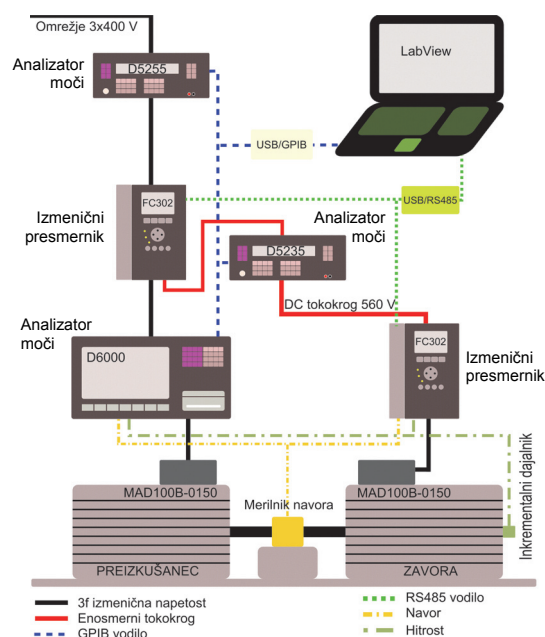
Standardni preizkusi za asinhronske motorje so dobro poznani [3]. Pri obremenilnem preizkusu je motor na gredi sklopljen z zavoro, ki je običajno pasivnega značaja (Prony-jeva zavora, zavora na vrtnične toke). Pri tem se celotna zavorna energija pretvarja v toploto, kar v celoti predstavlja izgube in zato pomeni neekonomično porabo energije. Ob tem je tudi nastavljanje oz. regulacija zavornega učinka zelo težavna, še posebej pri Prony-jevi zavori. Zaradi naštetih pomanjkljivosti je bolj prikladno na mestu zavore uporabiti električni stroj – generator, ki preko regulacije hitrosti oz. navora omogoča poljubno nastavljanje zahtevane obremenitve preizkušancu. Najbolj poznana izvedba takšnega dinamometra je sistem z enosmernim generatorjem, ki ga obremenjujemo z zavornim uporom. S spreminjanjem upornosti je regulacija zavornega učinka močno olajšana, še vedno pa se zavorna energija v celoti sprošča v obliki Joulske toplote. Z uporabo sodobnih gradnikov elektromotornih pogonov je možno na eleganten način odpraviti tudi to slabost in mehansko

zavorno energijo v veliki meri ponovno pretvoriti v električno energijo ter jo koristno uporabiti znotraj preizkuševališča (rekuperacija).

V Laboratoriju za elektromotorske pogone je bilo razvito avtomatizirano preizkuševališče na osnovi elektromagnetne zavore z uporabo asinhronskega stroja, napajanega preko izmeničnega presmernika (IP) [4], [5], [6]. Takšna izvedba zavore je zelo fleksibilna in omogoča tako trošenje energije na zavornem upor, kakor tudi rekuperacijo energije za pogon preizkušanca. Pri izvedbi IP z aktivno vhodno (usmerniško-razsmeriško) stopnjo (*angl.* active front end AFE) se lahko rekuperirano zavorno energijo vrača neposredno v omrežje. Običajno takšno možnost omogočajo IP višjih moči, kjer je takšna funkcija ekonomsko upravičena. Na ta način se popolnoma obide potrebo po uporabi zavornega upora.

2 Zasnova preizkuševališča

Eksperimentalna zasnova preizkuševališča je prikazana na sliki 1. V prikazani konfiguraciji sta tako na mestu zavore kot preizkušanca nameščena enaka stroja – asinhronska servo motorja, pri čemer sta oba vodena s pripadajočima IP. Trenutno mehansko moč oz. obremenitev preizkušanca se določa s pomočjo



Slika 1. Eksperimentalna zasnova preizkuševališča.

merilnika navora, preko katerega sta sklopljena zavora in preizkušane ter inkrementalnega dajalnika pozicije oz. merilnika vrtilne hitrosti. Ta dva merilnika služita tudi kot vira povratne informacije za regulacijo izbrane procesne količine, ki se izvaja na IP zavore. S pomočjo analizatorjev moči se zajema fizikalne količine, ki so potrebne za določevanje lastnosti celotnega sklopa. Za merjenje karakteristik preizkušanca načeloma zadostuje le analizator moči NORMA D6000, ker pa želimo imeti vpogled v energijski pretok celotnega sistema, merimo z D5255 dotok energije iz mreže in z D5235 pretok energije v vmesnem enosmernem tokokrogu. Preko slednjega se namreč zavorna energija dovaja nazaj v IP za pogon preizkušanca, s čimer je vzpostavljen interni rekuperacijski krog [5].

Nadzorni program za koordinacijo delovanja in izvajanja meritev teče na osebem računalniku v LabVIEW okolju. Z obema IP je vzpostavljena serijska komunikacija na RS485 vodilu, z merilnimi instrumenti pa na GPIB vodilu. Referenco zavore oz. obremenitev lahko podajamo na dva načina, kot navor ali kot vrtilno hitrost. Lahko pa preko tekstovne datoteke v nadzorni program vnesemo bremensko funkcijo obeh količin hkrati. Možno je tudi ročno nastavljanje delovnih točk prek spreminjanja vrtilne hitrosti preizkušanca in reference zavore hkrati. Tako se lahko izvaja obremenitev motorja v poljubni delovni točki. Aplikacija je zasnovana tako, da se noben regulacijski algoritem ne izvaja na osebem računalniku. To nalogo opravljajo vgrajeni hitrostni in procesni PID regulatorji v IP [4].

3 Načini upravljanja preizkuševališča

Nadzorni program je zasnovan tako, da omogoča različne načine upravljanja sklopa ali celo posameznega podsestava posebej.

3.1 Ročno upravljanje enega motorja

Motor lahko upravljamo s hitrimi izvršitvami ukazov za zagon, prosti iztek, zaviranje, reverziranje, spreminjanje ramp za zagon in zaustavitve, nastavljanjem hitrostne reference... Ukazi so nam na voljo v obliki stikal in gumbov. Merjene količine lahko zajemamo z ročnim proženjem.

3.2 Ročno upravljanje sklopa

Pri sinhroniziranem sklopu nastavljam obremenitev tako, da referenco prilagajamo z vrtljivim gumbom. Zajete količine shranjujemo ročno. Kot referenčno vrednost lahko podajamo tako vrtilno hitrost kot tudi navor, odvisno od izbrane regulacijske zanke na IP zavore. Pred zagonom določimo začetno vrtilno hitrost in meje, v katerih bomo podajali omenjeno referenco. Med obratovanjem sklopa lahko neodvisno od zavore spreminjamo vrtilno hitrost preizkušanca preko vnosnega polja, kamor vnašamo neposredno številčno vrednost reference. Tako dosežemo katerokoli delovno točko na karakteristiki. Ta način je primeren za trajno konstantno obremenitev in meritev segrevalnih krivulj pri različnih intenzivnostih obremenitve.

3.3 Avtomatizirana meritev

Najbolj zanimiva možnost na preizkuševališču je popolnoma avtomatizirana meritev. Njen namen je pridobiti popolno sliko o električnih in mehanskih karakteristikah preizkušanca. Ta način preizkušanja je zanimiv tudi za preizkus motorjev na koncu proizvodnega procesa v tovarni. Na začetku podamo meje meritve, število merilnih točk in začetno vrtilno hitrost. Izračunajo se merilne točke in po zagonu se sklop sinhronizira. Merilne točke so tudi tu lahko podane kot navor ali pa kot vrtilna hitrost. Za zajem količin v merilni točki je potreben kriterij ujemanja določenega števila zaporednih odčitkov reference in dejanske vrednosti na IP zavore. Ko algoritem preide vse točke, ustavi sklop, kot rezultat pa dobimo tabelo zajetih podatkov in karakteristiko za predogled.

3.4 Funkcijsko podajanje obremenitve

Za nekatere meritve, npr. meritve termičnih obremenitev stroja, lahko definiramo časovno odvisno funkcijo obremenjevanja, ki jo v številski obliki zapišemo v tekstovno datoteko. Tako lahko definiramo različno dolge časovne intervale s pripadajočimi intenzitetami obremenitev. Obremenitev podamo v treh stolpcih tekstovne datoteke. V prvi stolpec vpišemo čas v sekundah kot neodvisno spremenljivko, v drugi stolpec pa referenco hitrosti, ki je poslana v IP preizkušanca. Tako dobimo časovno odvisnost vrtilne hitrosti, ki pa je ni nujno spreminjati. Če želimo, da je vrtilna hitrost preizkušanca ves čas testiranja konstantna, potrdimo zahtevo v uporabniškem vmesniku. V tretji stolpec vnašamo referenco, ki se bo posredovala zavori (vrtilno hitrost ali navor – odvisno od izbrane vrste regulacijske zanke). Vgrajena je varnostna funkcija, ki onemogoča podajanje zelenih referenc zunaj nastavljenih mej na obeh IP.

3.5 Generiranje periodične dinamične obremenitve

Za podajanje obremenitve uporabimo sinusno, žagasto, trikotno ali pravokotno obliko signala. Periodični referenci za IP zavore določimo frekvenco, amplitudo in enosmerno komponento. Zaradi visoke dinamike pojavov zajem količin prek analizatorjev ni predviden, zato pa lahko časovne poteke količin spremljamo na osciloskopu.

4 Eksperimentalni rezultati

Rezultati, prikazani v nadaljevanju, so bili posneti ob uporabi dveh identičnih 6-polnih asinhronskih servo

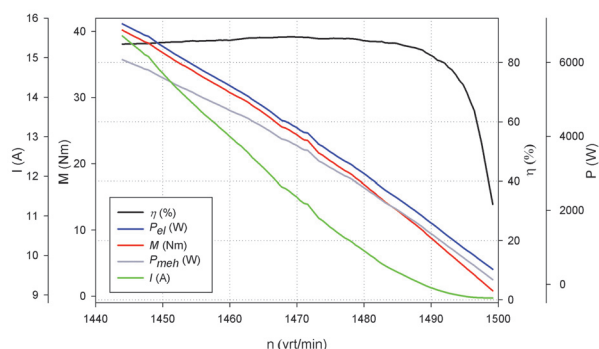
Tabela 1: Osnovni nazivni podatki elektromotorjev

Indramat MAD100B-0150	
Nazivna vrtilna hitrost	1500 vrt/min
Maksimalna vrtilna hitrost	6000 vrt/min
Nazivni navor	30 Nm
Maksimalni navor	68 Nm
Nazivna moč	4710 W
Nazivni tok	12,9 A
Maksimalni tok	23,55 A
Vztrajnostni moment	0,019 kgm ²

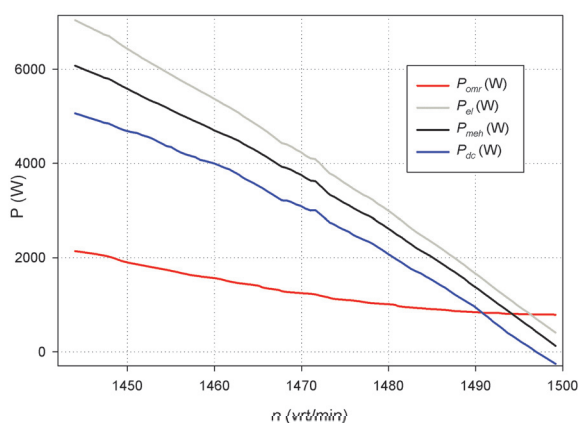
motorjev proizvajalca Indramat (Bosch Rexroth) in dveh 7,5 kW IP, nazivnega toka 16 A, proizvajalca Danfoss. Nazivni podatki motorjev so zbrani v tabeli 1.

4.1 Avtomatizirana meritev

Na sliki 2 je prikazana obremenilna karakteristika, ki je izrisana iz zajetih merilnih podatkov. V skupnem grafu so prikazane sledeče fizikalne količine: izkoristek motorja η , navor M , oddana mehanska moč na gredi P_{meh} , vhodna električna moč P_{el} in fazni tok I . Pred zagonom meritve je bilo v vmesniški obrazec vneseno zeleno območje meritve med 0 Nm in 40 Nm pri začetni hitrosti gredi 1500 vrt/min. Na sliki 3 pa so prikazani pretoki moči med gradniki merilnega mesta. Že na prejšnji sliki prikazanim močem P_{meh} in P_{el} sta dodana še poteka moči iz mreže P_{omr} in moči P_{dc} , ki se od zavore preko povezave enosmernih tokokrogov vrača za napajanje preizkušanca, torej rekuperirana moč. Moč, ki priteka iz mreže, pokriva le izgube na merilnem mestu in je pri višjih obremenitvah precej manjša od električne vhodne moči motorja.



Slika 2. Grafična predstavitev obremenilne karakteristike asinhronskega motorja.

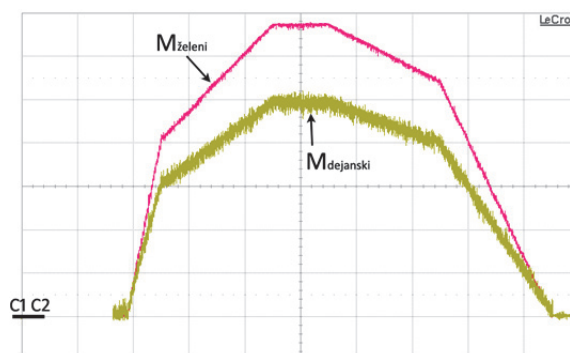


Slika 3. Pretok moči med gradniki merilnega mesta.

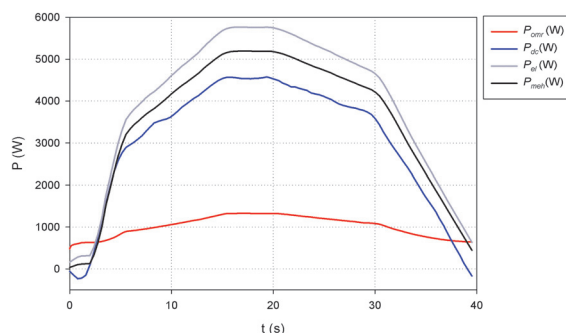
4.2 Uporabniško podana obremenilna funkcija

Takšen primer obremenjevanja je bil izveden pri snemanju oscilograma na sliki 4, kjer sta poteka zelenega in dejanskega navora motorja. Na sliki 5 so prikazani poteki istih moči kot na sliki 3, vendar tokrat za funkcijsko podan primer obratovanja. Sedaj je bolj očitna negativna vrednost moči P_{dc} preko povezave enosmernih tokokrogov. V prostem teku in ob majhni obremenitvi so izgube v IP in motorju zavore večje, kot

je mehanska moč na gredi. Razlika povzroča pretok moči po povezavi enosmernih tokokrogov v obratni smeri kot pa potem, ko je obremenitev (in s tem na zavori generirana moč) večja. Poteki moči na grafu logično sledijo poteku navora na sliki 4.



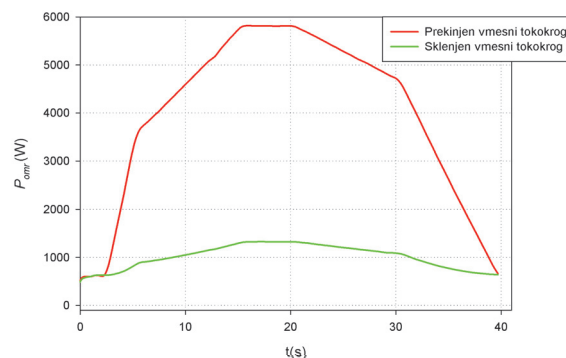
Slika 4. Oscilogram zelene vrednosti (3,8 Nm/d) in dejanske vrednosti navora (5 Nm/d) pri uporabniško definiranem obremenitvenem profilu; $k_t=5$ s/d.



Slika 5. Pretok moči pri uporabniško definiranem obremenitvenem profilu.

4.2.1 Razmere pri prekinjeni povezavi enosmernih tokokrogov

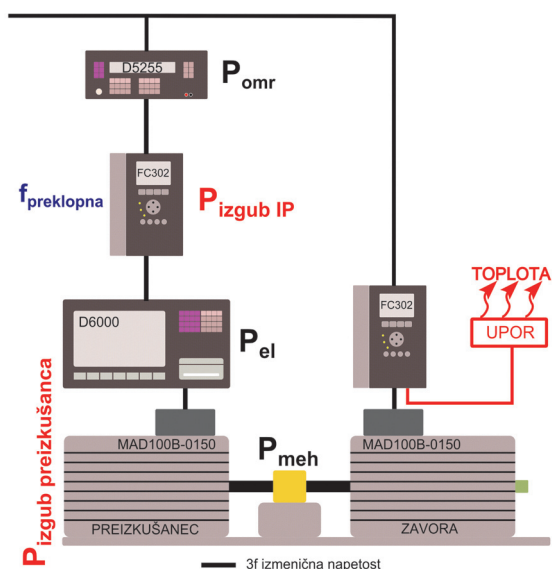
Za namen primerjave izgub ob rekuperativnem delovanju merilnega mesta in trošenju zavorne energije na upor z aktiviranjem zavornega modula sta na sliki 6 prikazani pripadajoči električni moči iz omrežja. Princip vezave na merilnem mestu pri nerekuperativnem delovanju je razviden s slike 7. Razlika v dovedeni moči v sistem je očitna. Zavedati se moramo, da prihranek na



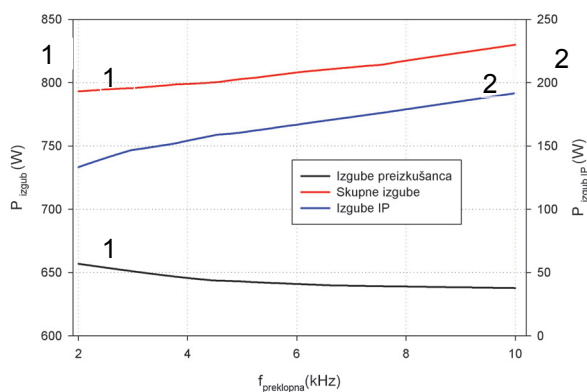
Slika 6. Primerjava moči iz mreže pri rekuperativnem načinu delovanja (povezava enosmernih tokokrogov sklenjena) in pri trošenju energije na upor (povezava razklenjena).

račun rekuperacije energije raste s povečevanjem moči pogona.

V nerekuperativnem načinu delovanja preskuševališča (slika 7) je izvedena tudi analiza izgub elektromotorskega pogona v odvisnosti od modulatorske stikalne frekvence IP. Na sliki 8 so prikazane izgubne moči IP, preizkušane motorja in pa skupna izgubna moč pogona pri spreminjanju stikalne frekvence od 2 kHz do 10 kHz. Zaradi preklopnih izgub IGBT tranzistorjev se z naraščanjem frekvence izgube v IP povečujejo, hkrati pa zaradi zmanjševanja valovitosti toka izgube v motorju upadajo na račun manjših izgub v feromagnetnem jedru. V primeru našega motorja je sprememba izgub majhna, tako da v skupnih izgubah pogona pride bolj do izraza naraščanje stikalnih izgub v IP. Posledično je krivulja skupnih izgub monotono naraščajoča, kar je v nasprotju s pričakovanji glede na rezultate v [7], kjer na krivulji skupnih izgub pogona prevladuje padajoč trend vse do stikalne frekvence 8 kHz.



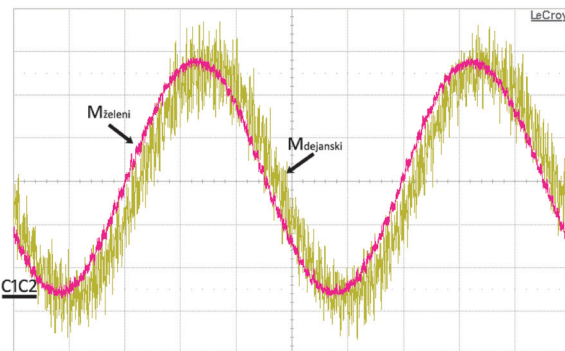
Slika 7. Principialna shema vezav preskuševališča pri nerekuperativnem načinu obratovanja.



Slika 8. Analiza izgub elektromotorskega pogona pri spreminjanju stikalne frekvence IP.

4.3 Periodična dinamična obremenitev

Na oscilogramu na sliki 9 sta prikazana poteka želenega in dejanskega navora sinusne oblike. Želja po periodičnem dinamičnem obremenjevanju preizkušancea izvira iz ideje pri diagnosticiranju stanja motorja, kjer bi radi raziskali, kako dinamično obnašanje bremena vpliva na rezultat. Izkazalo se je, da je najvišja frekvenca periodičnega obremenjevanja omejena zaradi vztrajnosti sklopa (mehanska časovna konstanta) in hitrosti izvajanja internega programa, med katerim se osvežuje referenca na IP. Za postavljeni eksperimentalni sklop je smiselna zgornja frekvenčna meja pri 3 Hz.



Slika 9. Oscilogram želenega (5 Nm/d) in dejanskega navora (5 Nm/d) pri dinamičnem obremenjevanju s sinusno obliko reference; $k_t=200$ ms/d.

5 Sklep

V članku je predstavljenih kar nekaj možnosti testiranja sestavnih komponent izmeničnih elektromotorskih pogonov. S popolnoma avtomatizirano meritvijo lahko pridemo do obremenilne karakteristike, takšne kot jo npr. za asinhronski motor pričakujemo od proizvajalca. Različni načini upravljanja s sklopom, ki jih omogoča nadzorni program, ponujajo možnosti za preizkušanje različnih načinov vodenja in diagnosticiranja stanja motorja oz. tudi pogona. Vse to je možno tudi koristno uporabiti v pedagoškem procesu za poglobljen študij elektromotorskih pogonov.

Literatura

- [1] B. M. Wilamowski, J. D. Irwin, *The Industrial Electronics Handbook, Power electronics and motor drives*. Taylor and Francis Group, Second edition, 3-1 to 4-19, 2011.
- [2] G. L. Skibinski, R.M. Tallam, M. Pande, R. J. Kerkman, D. W. Schlegel, System design of adjustable speed drives. IEEE Industry applications magazine, pages 47–74, July/August 2012.
- [3] Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standard 112-2004.
- [4] L. Košir, Avtomatizirano preizkuševališče komponent električnih pogonov, Diplomsko naloga univerzitetnega študija, Ljubljana, 2013.
- [5] L. Strauch, Avtomatizirano merilno mesto za preizkušanje pretvorniško napajanih električnih motorjev, Diplomsko naloga univerzitetnega študija, Ljubljana, 2011.
- [6] I. Merkač, Računalniško voden preizkuševališče pretvorniško napajanih električnih motorjev, Diplomsko naloga univerzitetnega študija, Ljubljana, 2007.
- [7] T. Marčič, G. Štumberger, M. Hadžiselimović, I. Zagradišnik, Vpliv modulatorske frekvence na izgube elektromotorskega pogona, harmonsko popačenje toka in temperaturo asinhronskega motorja, Elektrotehniški vestnik, Vol. 73, No. 2-3, str. 125-130, 2006.