

Optimizacija izgub električnega pogona z asinhronskim motorjem

Žiga Fabijan, Rastko Fišer, Henrik Lavrič, Klemen Drobnič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: ziga.fabijan@gmail.com

Optimization of losses in induction motor drive

Abstract. Modern induction motor drive contains a frequency converter, which enables an adjustment of the rotational speed and the amplitude of the input voltage. An open-loop control method (*U/f*) is typically employed in low-cost drives, but there remains a problem of an excessive magnetization under light loads. In this paper, we have developed a procedure to calculate losses in a frequency converter and induction motor. An optimal magnetization, which guarantees the best possible efficiency for a given operational point of the drive, is found by adjusting the magnetizing flux linkage at different rotational speeds and torques. A clear benefit of using optimal magnetization instead of constant one is shown by analyzing annual electricity consumption for a 2.2 kW water pump drive.

Keywords: induction motor, frequency converter, *U/f* method, field weakening, pump, Matlab

1 Uvod

Asinhronski motor s frekvenčnim pretvornikom navadno krmilimo v stacionarnem načinu s skalarno *U/f* metodo, kjer je razmerje med statorsko napetostjo in frekvenco motorja običajno konstantno. Takšne izvedbe električnih pogonov se uporablja v manj zahtevnih napravah nižjih moči, kjer izkoristek ni tako pomemben. Vendar tovrsten koncept vodenja ni vezan le na naprave nižjih moči, temveč je pogost tudi pri napravah večjih moči, kot so razni ventilatorji, kompresorji in črpalke, kjer se izkorišča večja robustnost asinhronskih motorjev v primerjavi z ostalimi izvedbami pogonov.

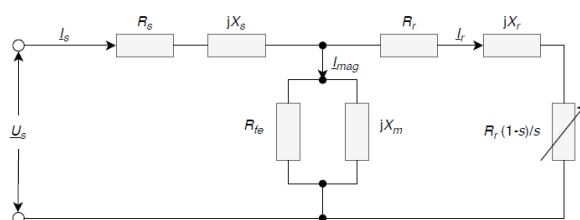
Na temo optimizacije izgub električnega pogona z asinhronskim motorjem (EPAM) je bilo opravljenih že veliko raziskav. Pri skalarni metodi vodenja motorja je bilo opaziti pomanjkanje analiz, ki bi se osredotočile na problematiko premagnetjenja pri nižjih navorih od nazivnega. V članku se bomo zato posvetili optimizaciji izgub EPAM s skalarno metodo glede na optimalni statorski magnetni pretok pri nižjih navorih od nazivnega.

2 Modeliranje izgub

2.1 Model asinhronskega motorja

Numerični model asinhronskega motorja smo izdelali v programu Matlab na podlagi enofazne nadomestne

sheme asinhronskega motorja v stacionarnem stanju [1], ki ga prikazuje slika 1. Pri tem so rotorski parametri reducirani na statorsko stran.



Slika 1. Enofazna nadomestna shema asinhronskega motorja.

Izdelani numerični model motorja pri osnovni frekvenci upošteva izgube v statorskem in rotorskem navitju motorja, izgube v železu (histerezne in vrtilne izgube) ter mehanske izgube (trenje in ventilacija), ki so predstavljene z enačbami (1)-(4) [2]. V modelu nismo upoštevali preostalih izgub, med katere se uvrščajo izgube zaradi višjih harmonskih komponent.

$$P_{Cu,s}(I_s) = m \cdot R_s \cdot I_s^2 \quad (1)$$

$$P_{Cu,r}(I_r) = m \cdot R_r \cdot I_r^2 \quad (2)$$

$$P_{core}(s, \psi_m, f_s) = \left(1 + s \cdot \frac{m_r}{m_s}\right) \cdot k_{h,s} \cdot \psi_m^v \cdot f_s + \left(1 + s^2 \cdot \frac{m_r}{m_s}\right) \cdot k_{e,s} \cdot \psi_m^2 \cdot f_s^2 \quad (3)$$

$$P_{meh}(n) = M_{dry} \cdot \left(\frac{\pi}{30}\right) \cdot n + B \cdot \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot n^2 + k_{vent} \cdot \left(\frac{\pi}{30}\right)^3 \cdot n^3 \quad (4)$$

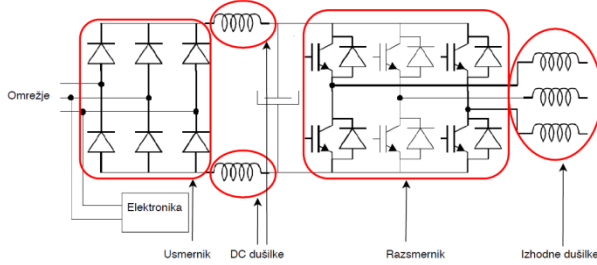
V predstavljenih enačbah predstavlja m število faz motorja, $\frac{m_r}{m_s}$ razmerje med maso rotorja in statorja motorja, $k_{h,s}$ konstanto histereznih izgub v statorju (W), ψ_m magnetni sklep, v magnetilni koeficient ter $k_{e,s}$ konstanto vrtilnih izgub v statorju (W). Konstanti $k_{h,s}$ in $k_{e,s}$ sta pogojeni z materialom in konstrukcijo. M_{dry} predstavlja navor zaradi trenja v suhem okolju, B viskoznostni koeficient ter k_{vent} koeficient ventilacije.

V modelu motorja smo upoštevali spreminjanje glavne induktivnosti L_m od magnetilnega toka I_{mag} , ki smo ga izračunali kot razliko med statorskim in rotorskim tokom, kar prikazuje enačba (5):

$$I_{mag} = I_s - I_r \quad (5)$$

2.2 Model frekvenčnega pretvornika

Glede na izbrani model frekvenčnega pretvornika, ki ga prikazuje slika 2, smo razvili numerični model frekvenčnega pretvornika [2].



Slika 2. Model frekvenčnega pretvornika.

V modelu frekvenčnega pretvornika smo upoštevali sledeče izgube:

- prevodne izgube v usmerniku (6),
- izgube zaradi napajanja elektronike,
- prevodne izgube dušilke v enosmernem DC linku in izhodnih dušilkah (7) in (8),
- prevodne izgube v razsmerniku (9),
- preklonpe izgube v razsmerniku (10).

$$P_{izg,usm} = 2 \cdot U_d \cdot \frac{P_{usm,izh}}{U_{dc}} \quad (6)$$

$$P_{izg,DC-dus} = R_{DC-dus} \cdot \left(\frac{P_{raz,vh}}{U_{dc}}\right)^2 \quad (7)$$

$$P_{izg,izh-dus} = m \cdot R_{izh-dus} \cdot I_s^2 \quad (8)$$

$$P_{raz} = f(I_s, \varphi, m_i) \quad (9)$$

$$P_{sw,lin} = K_{sw} \cdot I_s \cdot f_{sw} \quad (10)$$

V enačbah predstavlja m_i modulacijski indeks, φ kot med delovno in navidezno komponento moči ter K_{sw} empirično določeno konstanto preklapljanja tranzistorjev frekvenčnega pretvornika.

3 Določitev optimalnega magnetenja

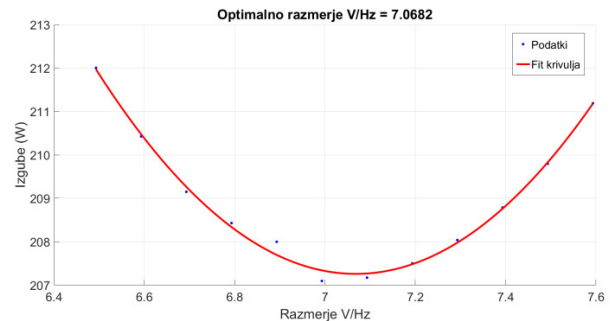
Skalarni način vodenja EPAM z U/f metodo temelji na konstantnem statorskem magnetnem sklepu $\underline{\psi}_s$, ki je neposredno odvisen od razmerja statorske napetosti \underline{U}_s in statorske frekvence f_s (11).

$$\underline{\psi}_s = \frac{U_s}{f_s} \quad (11)$$

Enačbe (1)-(10) sestavljajo nelinearen sistem enačb, ki je za poljubno delovno točko (n , M) in napajalne pogoje (U , f) rešljiv z ustreznim numeričnim postopkom. Na ta način izračunamo tako rezultirajoče električne veličine (tokove) kot tudi izgube. Jasno je, da s spreminjanjem napajalnih pogojev pri nespremenjeni

delovni točki vplivamo na iznos posameznih izgubnih komponent pogonskega sistema. V principu gre za prerazporeditev izgub iz magnetilne v rotorsko vejo in obratno: z zviševanjem magnetenja naraščajo izgube v železu, z zniževanjem pa izgube v rotorskem bakru.

Kot pomoč pri iskanju optimalnega napajalnega pogoja smo uvedli faktor k (razmerje U/f), ki ponazarja razmerje med statorsko napetostjo in frekvenco. Faktor k smo spreminjali od izbrane začetne pa do končne vrednosti s korakom 0,1. Za vsak k smo izračunali vrednost izgub motorja ter nato izrisali krivuljo na podlagi skupnih izgub. Faktor k , ki je zagotovil minimalne izgube (minimum krivulje na sliki 3), je optimalni k_{opt} , saj je bilo takrat izračunanih najmanj izgub v motorju. Primer iskanja za delovno točko ($M = 8 \text{ Nm}$ ter $n = 900 \text{ min}^{-1}$) prikazuje slika 3.



Slika 3. Prikaz iskanja optimalnega k_{opt} .

Tabela 1 predstavlja izračunana optimalna razmerja V/Hz za različne delovne točke (n , M). Iz nje je razvidno, da se vrednost optimalnega razmerja U/f znižuje z zniževanjem navora. Z zniževanjem vrtilne hitrosti motorja se razmerje U/f rahlo povečuje, saj je potrebno pokriti padec napetosti na statorski upornosti, ki se močneje izrazi pri nižjih vrtilnih hitrostih. V numeričnem modelu EPAM smo namreč poenostavili enačbe tako, da sta vrednosti pritisnjene in inducirane statorske napetosti enaki.

Tabela 1. Izračunana optimalna razmerja U/f .

	2 Nm	6 Nm	10 Nm	14 Nm
300 vrt/min	4,6	7,4	8,8	9,6
600 vrt/min	4,0	6,7	8,0	8,7
900 vrt/min	3,7	6,3	7,6	8,3
1200 vrt/min	3,5	6,0	7,3	8,1
1500 vrt/min	3,3	5,7	7,1	7,9

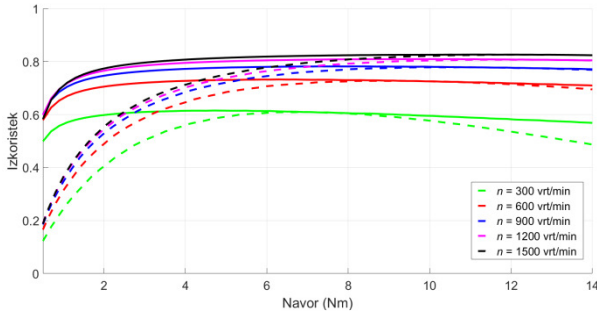
4 Rezultati simulacij in meritev

4.1 Simulacijski rezultati

V tem podpoglavju so predstavljeni simulacijski rezultati izkoristkov EPAM s konstantnim ter optimalnim razmerjem U/f za širok razpon obratovalnih točk. Simulirali smo delovanje 2,2 kW motorja ter frekvenčnega pretvornika Danfoss FC 302 [3].

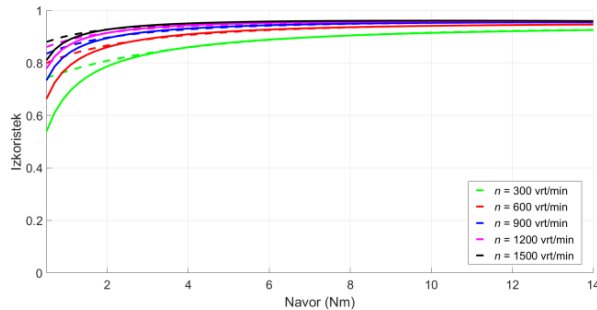
Slika 4 prikazuje simulirane izkoristke asinhronskega motorja pri optimalnem in konstantnem

razmerju U/f . Opazimo lahko, da se pri optimizaciji magnetenja motorja izkoristek izboljša predvsem pri nižjih navorih. Pri obremenitvah v bližini nazivnega navora optimalno magnetenje pričakovano takorekoč sovпада z nazivno vrednostjo. Izboljšanje izkoristka opazimo tudi pri nizkih vrtilnih hitrostih in visokih navorih (nad 10 Nm), zaradi izrazitejšega vpliva padca napetosti na statorski upornosti.



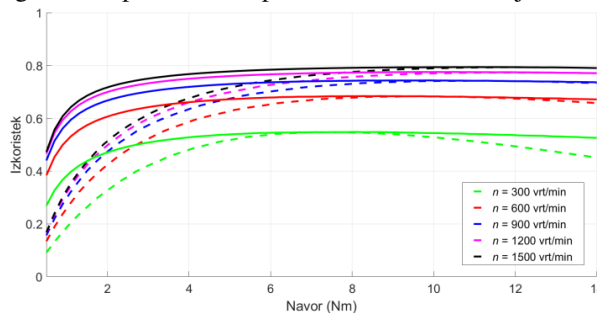
Slika 4. Izkoristki asinhronskega motorja v odvisnosti od navora za nekaj vrtilnih hitrosti: optimalni k_{opt} (polna črta), nazivni k_n (črtkana črta).

Slika 5 prikazuje simulirane izkoristke frekvenčnega pretvornika. Razvidno je, da vrednosti izkoristkov v večini delovnih točk ostajajo nespremenjeni, razen pri nizkih navorih (do 4 Nm). V tem področju so simulirani izkoristki z optimalnim razmerjem U/f manjši od nazivnega razmerja U/f , saj z zmanjšanjem izgub asinhronskega motorja zmanjšamo tudi izhodno moč iz frekvenčnega pretvornika. Posledično se izgube frekvenčnega pretvornika močnejše izrazijo.



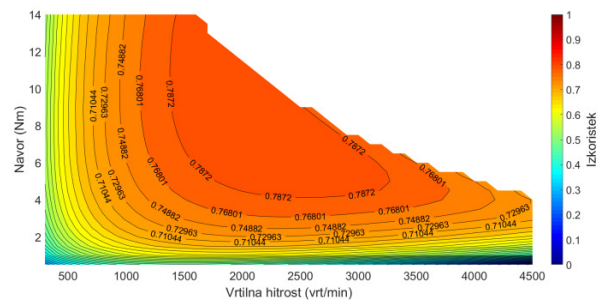
Slika 5. Izkoristki frekvenčnega pretvornika v odvisnosti od navora za nekaj vrtilnih hitrosti: optimalni k_{opt} (polna črta), nazivni k_n (črtkana črta).

Na sliki 6 so predstavljeni izkoristki EPAM, kjer je razvidno, da so poteki simuliranih izkoristkov ter ugotovitve podobne kot pri asinhronskem motorju.



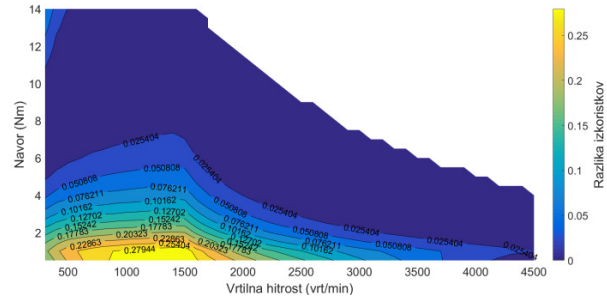
Slika 6. Izkoristki EPAM v odvisnosti od navora za nekaj vrtilnih hitrosti: optimalni k_{opt} (polna črta), nazivni k_n (črtkana črta).

Izkoristek EPAM smo ovrednotili tudi v področju slabljenja polja, kjer je za doseg nadnazivnih vrtilnih hitrosti potrebno magnetno polje že v osnovi znižati. Slika 7 prikazuje vrednosti izkoristkov EPAM pri optimalnem razmerju U/f . Pri tem je razvidno, da so najvišji simulirani izkoristki EPAM nahajajo v bližini nazivnih vrednosti motorja. Pri predstavljenih rezultatih je statorski tok omejen na nazivno vrednost.



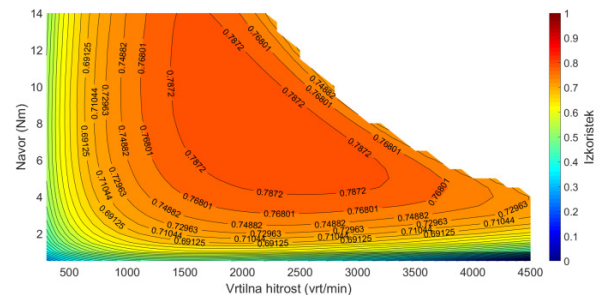
Slika 7. Prikaz izkoristkov EPAM pri optimalnem razmerju U/f .

Na sliki 8 je prikazano izboljšanje izkoristkov EPAM z nastavljenim optimalnim razmerjem U/f . Izkoristki se v primerjavi s konstantnim razmerjem U/f najbolj izboljšajo pri nizkih navorih ter vrtilnih hitrostih motorja do slabljenja polja (do 1500 vrt/min). V področju slabljenja polja je potrebno zmanjševati razmerje U/f zaradi napetostne omejitve frekvenčnega pretvornika. Zaradi tega sta razmerji, ki ga še dovoljuje sistem EPAM in optimalno razmerje U/f blizu ter je posledično izboljšanje izkoristka manj izrazito.



Slika 8. Razlika izkoristkov EPAM pri vodenju s konstantnim in optimalnim razmerjem U/f .

V nadaljevanju smo z možnostjo 25 % povečanja statorskega toka od nazivnega, kar je bilo pogojeno s konceptom delovanja pogona v področju slabljenja polja, razširili obratovalne točke EPAM. Slika 9 prikazuje vrednosti izkoristkov EPAM, kjer je bila dovoljena višja vrednost statorskega toka od nazivne.

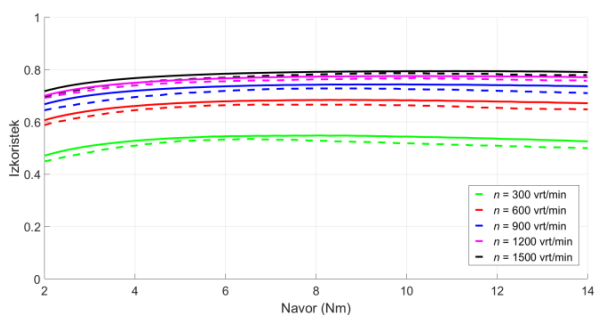


Slika 9. Prikaz izkoristkov EPAM pri dovoljenem višjem statorskem toku od nazivnega.

Takšen način delovanja EPAM je dovoljen za kratkotrajno obratovanje. Razvidno je, da smo pridobili dodatna področja delovanja EPAM, kjer je v področju višje vrednosti statorskega toka od nazivnega vrednost izkoristkov nekoliko nižja. Na sliki 9 niso prikazane vrednosti izkoristkov EPAM pri navorih višjih od nazivnega (14 Nm).

4.2 Primerjava simulacijskega in izmerjenega izkoristka pri optimalnem magnetenju

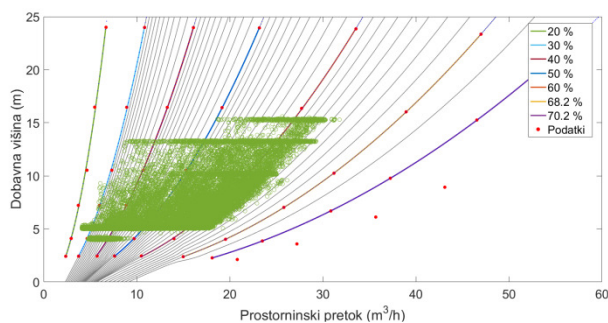
Pri meritvi [2] je bil uporabljen enak asinhronski motor in frekvenčni pretvornik kot v simulaciji. Slika 10 prikazuje izračunane in izmerjene izkoristke EPAM. Rezultata se dobro ujemata, saj znaša največje odstopanje 5 %. Do odstopanja je prišlo predvsem na račun neupoštevanja višjih harmonskih komponent ter deloma zaradi konstantno nastavljenе temperature EPAM.



Slika 10. Izkoristki EPAM v odvisnosti od navora pri optimalnem k_{opt} . S polno črto so označeni simulacijski rezultati, s črtkano črto pa izmerjeni rezultati.

5 Analiza električnega pogona s črpalko

Idejo optimalnega magnetenja smo preizkusili na pogonu, ki ga sestavlja EPAM in črpalka – breme z izrazito kvadratno karakteristiko [4]. EPAM smo krmilili s skalarno metodo, pri čemer je bilo v prvem primeru razmerje U/f konstantno, v drugem pa optimalno. Na podlagi letne statistike obratovalnih točk (H , Q) črpalke, ki so na sliki 11 skupaj z njenimi izkoristki predstavljene z zelenimi krogi, smo izračunali vhodno električno moč P_{el} .



Slika 11. Letni cikel obratovanja pogona črpalke.

Pri vsaki obratovalni točki je pogon črpalke deloval 10 minut (1/6 h). Z enačbo (12) smo izračunali letno porabo električne energije pogona črpalke W_{letna} z

optimizacijo magnetenja motorja in brez nje ter primerjali rezultate.

$$W_{letna} = \sum_{vzorec=1}^{52560} P_{el}(vzorec) \cdot \frac{1}{6} h \quad (12)$$

Pri enačbi (12) smo z vzorcem ponazorili obratovalne točke pogona črpalke. Izračunali smo letno porabo energije pogona črpalke z optimizacijo, kar smo označili z $W_{letna,opt}$ in brez nje $W_{letna,kons}$:

$$W_{letna,opt} = 5,1355 \text{ MWh}$$

$$W_{letna,kons} = 5,7396 \text{ MWh.}$$

Z optimizacijo EPAM bi tako na letni ravni privarčevali okoli 0,6 MWh električne energije, kar predstavlja zmanjšanje porabe električne energije za 10,5 %. Iz tega sklepamo, da bi pri pogonih večjih moči zmanjšanje porabe električne energije pomembno pripomoglo k zmanjšanju stroškov obratovanja.

6 Zaključek

Optimalno magnetenje asinhronskega motorja, ki zagotavlja najmanjše izgube v motorju, hkrati sovпада tudi z minimumom skupnih izgub v celotnem pogonu. Zato v primeru enake stikalne frekvence močnostnega pretvornika zadostuje, da se osredotočimo zgolj na minimiziranje izgub v asinhronskem motorju. Pokazali smo, da z optimizacijo magnetenja motorja v največji meri izboljšamo izkoristke EPAM predvsem pri nizkih obremenitvah. Nasprotno je učinek prilagoditve magnetenja pri nizkih vrtilnih hitrostih (in enakih obremenitvah) bistveno manjši. Praktična vrednost prilaganja magnetenja se najlepše pokaže v energijski bilanci na dolgi rok. Pri pogonu EPAM s črpalko smo z optimizacijsko metodo zmanjšali letno porabo električne energije za 10,5 %. V primeru pogonov črpalke (ali drugih bremen s kvadratno karakteristiko) večjih moči, so tako absolutni prihranki električne energije lahko zelo veliki.

Literatura

- [1] M. Merljak, Zaviranje pretvorniško napajanega asinhronskega motorja, *Magistrsko delo*, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, 2017.
- [2] F. Abrahamsen, Energy Optimal Control of Induction Motor Drives, *Doktorska disertacija*, Institut for Energiteknik, Aalborg Universtet, 2000.
- [3] Ž. Fabijan, Optimizacija izgub električnega pogona z asinhronskim motorjem, *Magistrsko delo*, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, 2020.
- [4] H. Lavrič, K. Drobnič, R. Fišer, "Energy Efficiency Assessment of Variable Speed Pump Drive in Industrial Cooling System", *IEEE CPE-POWERENG 2020 Online Proceedings*, Setubal, Portugal, 8-10 July 2020, pp. 261-266.