

UDK: 631.621.314

*Originalni naučni rad
Original scientific paper*

ENERGETSKA EFIKASNOST ASINHRONIH MOTORA U POLJOPRIVREDI

Đukan Vukić^{1*}, Branko Radičević¹, Nenad Floranović², Milan Kocić²

¹*Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet-Institut za poljoprivrednu tehniku,
Beograd-Zemun*

²*Istraživačko-razvojni centar ALFATEC, Niš*

Sažetak: U radu je ukazano na neke mogućnosti povećanja energetske efikasnosti asinhronih električnih motora sa posebnim osvrtom na primenu i energetske efikasnost u oblasti poljoprivredne proizvodnje. Najvažnije mere koje u tom smislu treba preduzeti su: primena energetski efikasnih asinhronih motora, pravilan izbor motora po snazi, zamena starih motora niskog stepena korisnog dejstva, podešavanje vrednosti napona napajanja, kompenzacija reaktivne energije i optimizacija regulisanih elektromotornih pogona sa asinhronim motorima.

Ključne reči: *asinhroni motor, energetska efikasnost, električna energija, gubici, stepen korisnog dejstva*

UVOD

Asinhroni električni motori, koji se izvode kao trofazni i jednofazni, predstavljaju najrasprostranjeniji električni motor i oni su danas najveći potrošači električne energije. Pogoni sa asinhronim motorima troše između 35% i 40% od celokupne proizvedene električne energije, tako da oni predstavljaju jednu od najznačajnijih oblasti za uštedu električne energije, [1]. I u oblasti poljoprivredne proizvodnje asinhroni motori imaju

*Kontakt autor: Đukan Vukić, Nemanjina 6, 11080 Beograd-Zemun.

E-mail: vukicd@agrif.bg.ac.rs

Rad je rezultat istraživanja u okviru sledećih projekta: 1) „Unapređenje biotehnoških postupaka u funkciji racionalnog korišćenja energije, povećanja produktivnosti i kvaliteta poljoprivrednih proizvoda“, TR-31051, i 2) „Razvoj novih informaciono-komunikacionih tehnologija, korišćenjem naprednih matematičkih metoda, sa primenom u medicini, telekomunikacijama, energetici, zaštiti nacionalne baštine i obrazovanju“, III-44006, koje finasira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

značajnu primenu, tako da je i to oblast gde se povećanjem energetske efikasnosti mogu ostvariti značajne uštede električne energije, [2].

Sve do sredine 1970-tih godina glavni zahtev pri projektovanju asinhronih motora bio je da se postignu minimalni troškovi materijala i izrade motora. Sa rastom cene električne energije kriterijum optimalnosti postaje minimum ukupnih troškova u koje su pored proizvodnih troškova uključeni i godišnji troškovi za gubitke aktivne električne energije, a ponekad i troškovi reaktivne električne energije.

Prvo su u SAD, sa ciljem da ukupni troškovi budu najmanji, propisane minimalne vrednosti stepena korisnog dejstva za motore snage 1-150 kW. U periodu od 1995. do 2000. godine i u Evropi je preovladao stav da je nužno preći na primenu motora koji imaju što manje gubitke, tj. na proizvodnju energetske efikasne asinhronih motora, a ne motora čija je cena što manja. Kao rezultat toga usvojen je Internacionalni standard IEC 60034-30, [3].

Pri definisanju energetske klase u novom Internacionalnom standardu su definisane klase IE1 (standard efficiency), IE2 (high efficiency) i IE3 (premium efficiency). U SAD su već danas najviše zastupljeni motori klase IE2. Zastupljenost motora više energetske klase u Evropi je manje, jer su i promene u tom smislu počele kasnije. Međutim, u narednom periodu doći će do značajnih promena, u skladu sa Direktivom 2005/35/EC, [4]. To će dovesti do toga da će motori veće energetske efikasnosti početi sve više da se primenjuju i u zemljama gde primena tih motora nije obavezna, kao što je to sada slučaj i u Srbiji.

Povećanje energetske efikasnosti pogona sa asinhronim motorima ne postiže se samo upotrebom energetske efikasne asinhronih motora, već se postiže i primenom niza mera koje pre svega utiču na smanjenje troškova električne energije, ali i energetske efikasnosti kompletnog elektromotornog pogona i njegovih komponenti u celini. Naravno, najvažniji, ali ne i jedini parametar energetske efikasnosti je utrošak i optimizacija troškova električne energije, pošto analize pokazuju da utrošena električna energija čini više od 96% ukupnih troškova, dok cena motora učestvuje samo sa 3%, a troškovi održavanja oko 1%.

Veliki doprinos unapređenju poljoprivredne proizvodnje, odnosno povećanju prinosa po jedinici površine i povećanju produktivnosti rada sa što nižom cenom proizvodnje daje primena savremenih tehničkih sredstava pomoću kojih se vrši mehanizacija poljoprivredne proizvodnje. Primena električnih motora u tom smislu ima značajnu ulogu.

Električni motori nalaze veliku primenu u skoro svim oblastima poljoprivrede. S obzirom na velike prednosti električnih motora u odnosu na motore sa unutrašnjim sagorevanjem (tehničke, ekonomske, kvalitativne), oni se gde je god to moguće u poljoprivredi, koriste kao uređaji za proizvodnju mehaničkog rada.

Najvažnije oblasti poljoprivredne proizvodnje u kojima električni motori nalaze primenu su: snabdevanja imanja vodom, transport na ekonomskom dvorištu, obrada zemlje, melioracije i navodnjavanje, ratarstvo, stočarstvo, priprema stočne hrane, mlekarsvo, prehrambena tehnologija, vinogradarstvo i voćarstvo, sistemi za hlađenje i održavanje odgovarajuće mikro klime, radionice i remontne organizacije poljoprivrednih mašina i dr., [5].

Imajući u vidu karakteristike radnih mašina u poljoprivredi pokazuje se da su za primenu u poljoprivredi ubedljivo najpogodniji asinhroni motori sa kaveznom rotorom čije snage najčešće iznose od 10 kW, a ređe do 50 kW. Na svakom poljoprivrednom

imanju srednje veličine instalirano je više stotina asinhronih motora, tako da je neophodno posebnu pažnju obratiti na povećanje energetske efikasnosti primenjenih asinhronih motora, kako postojećih motora, tako i motora u okviru novih elektromotornih pogona.

MATERIJAL I METOD RADA

Asinhroni motor je sa strane statora priključen na električnu mrežu iz koje uzima električnu snagu $P_1 = qUI \cos \varphi$ (utrošena snaga). Rotor je mehanički spregnut sa radnom mašinom kojoj predaje korisnu mehaničku snagu P , slika 1.

Razlika između utrošene električne snage P_1 i korisne mehaničke snage P jednaka je ukupnim gubicima $\sum P_\gamma$ koji se javljaju u motoru i koji se sastoje od električnih, magnetnih i mehaničkih gubitaka, odnosno od gubitaka u bakru, gubitaka u gvožđu i gubitaka usled trenja i ventilacije, [6], [7]:

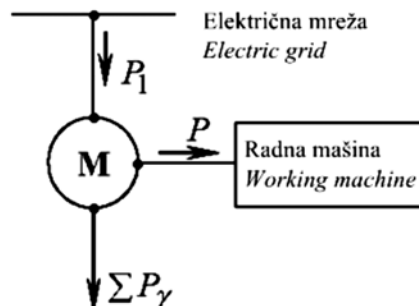
$$\sum P_\gamma = P_1 - P = P_{\gamma el} + P_{\gamma mag} + P_{\gamma meh} \quad (1)$$

Takođe, važe sledeće jednačine:

$$\sum P_\gamma = P_{Cu} + P_{Fel} + P_{fv} \quad (2)$$

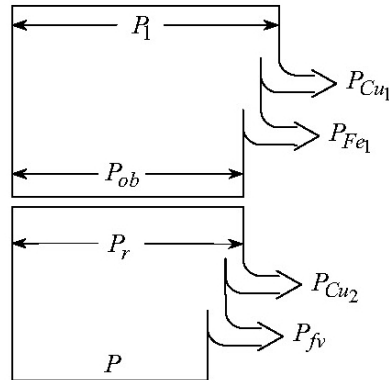
$$\sum P_\gamma = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fel} + P_{fv} \quad (3)$$

gde su: P_{Cu1} i P_{Cu2} gubici u bakru statora i rotora, P_{Fel} gubici u gvožđu statora i P_{fv} gubici usled trenja i ventilacije. Gubici u gvožđu rotora su zanemarljivo mali, [8].



Slika 1. Principijelna šema asinhronog motora
Figure 1. Principal scheme of an asynchronous motor

Tok od utrošene do korisne snage asinhronog motora prikazan je energetske bilansom na slici 2.



Slika 2. Energetski bilans asinhronog motora
Figure 2. The energy balance of an asynchronous motor

Odnos snaga P i P_1 definiše stepen korisnog dejstva asinhronog motora:

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{P}{P + \sum P_\gamma} \quad (4)$$

koji se kreće u granicama od 0,75 do 0,95 u zavisnosti od snage motora. Sa porastom nominalne snage motora povećava se stepen korisnog dejstva, [6].

Gubici u bakru statora i rotora (električni gubici) srazmerni su kvadratu odgovarajuće struje, a gubici u gvožđu statora (magnetni gubici) kvadratu napona. Te činjenice ukazuju na pravac u kome treba delovati da bi se ti gubici smanjili.

Asinhroni motor je induktivni potrošač što znači da pri radu uzima iz mreže pored aktivne i reaktivnu snagu. Odnos tih snaga definisan je faktorom snage $\cos\varphi$. Struja koju trofazni asinhroni motor pri nekoj snazi opterećenja P uzima iz mreže jeste:

$$I = \frac{P}{\eta\sqrt{3}U \cos\varphi} \quad (5)$$

To znači da će za istu korisnu snagu P motor uzimati iz mreže utoliko manju struju što je faktor snage $\cos\varphi$ veći. Minimalna struja se ima za $\cos\varphi = 1$. Pošto su električni gubici srazmerni sa kvadratom struje to se povećanjem faktora snage, pored ostalog, značajno smanjuje ta vrsta gubitaka.

Povećanje faktora snage na optimalnu vrednost postiže se kompenzacijom reaktivne snage i to pomoću kondenzatora koji se vezuju paralelno sa motorom na način prikazan na slici 3.

Sa aspekta vrednosti faktora snage koji se podešava kompenzacija može biti totalna ($\cos\varphi = 1$) ili delimična ($\cos\varphi = 0,9-0,95$), a u zavisnosti od toga da li se kompenzacija vrši za jedan ili za više motora, pojedinačna ili grupna, [6], [11].

Pri delimičnoj kompenzaciji, ukoliko motor ima faktor snage $\cos\varphi$, a kompenzacijom se želi dobiti faktor snage $\cos\varphi_M$, ($\cos\varphi_M < 1$), kondenzatori vraćaju reaktivnu energiju:

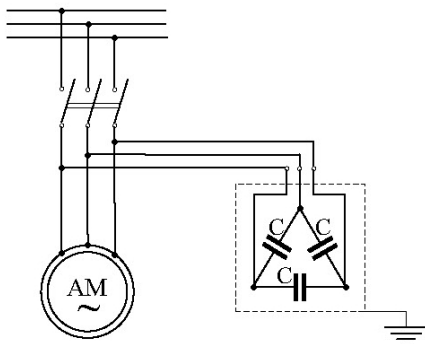
$$Q_c = Q - Q_M = P_1 (tg\varphi - tg\varphi_M) = kP_1 \quad (6)$$

pri čemu je $Q = P_1 tg\varphi$ reaktivna snaga koja se iz mreže uzima pre kompenzacije, a $Q_M = P_1 tg\varphi_M$ reaktivna snaga koja se iz mreže uzima nakon kompenzacije. Koeficijent K iznosi:

$$K = tg\varphi - tg\varphi_M = \frac{\sin(\varphi - \varphi_M)}{\cos\varphi \cos\varphi_M} \quad (7)$$

Kompenzacijom reaktivne energije postižu se sledeći efekti, od opšteg i posebnog interesa:

1. Racionalno korišćenje elektroenergetskih izvora;
2. Smanjenje gubitaka u mreži;
3. Smanjenje padova napona;
4. Smanjenje utroška električne energije i povećanje energetske efikasnosti motora;
5. Povoljniji obračun troškova električne energije.



Slika 3. Kompenzacija reaktivne snage asinhronog motora
Figure 3. Reactive power compensation for an asynchronous motor

REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

Povećanje energetske efikasnosti asinhronih motora u poljoprivredi i prehrambenim tehnologijama moguće je primenom nekoliko mera i postupaka u okviru njihove eksploatacije.

Asinhroni motori, samo zbog greške u izboru snage, često rade sa niskim stepenom korisnog dejstva. Prema istraživanjima iz [1] srednja vrednost opterećenja za motore snage od 1–100 kW je oko 70 %. Slična situacija je i u poljoprivrednoj proizvodnji. Predimenzionisan motor je skuplji za 50–100%. Utrošena aktivna snaga se malo menja (1%), ali je zato reaktivna snaga povećana čak za 50–70%. Povećani troškovi za reaktivnu energiju detaljno su razmotreni i analizirani u [1]. Ti troškovi premašuju cenu motora.

Dilema koja se javlja pri kvaru nekog asinhronog motora jeste da li taj motor premotavati ili kupiti novi motor. Pokazuje se da motori posle premotavanja imaju povećane gubitke snage od 10-30%, što dovodi do smanjenja stepena iskorišćenja za 1-3%. Troškovi remonta i premotavanja motora snage ispod 15 kW, koji su inače masovno zastupljeni u poljoprivrednoj proizvodnji, su često veći od nabavke odgovarajućeg novog motora. Zato je tada najekonomičnije rešenje nabaviti novi motor odgovarajuće nominalne snage više energetske klase. Veliki broj starih motora je predimenzionisan pa je moguće izabrati motor manje nominalne snage. To je naravno neophodno tačno utvrditi dodatnom analizom gde obavezno treba uzeti u obzir i podatak koliko iznosi časovno iskorišćenje datog motora u toku godine.

Kvalitet napona napajanja asinhronog motora definiše se ispunjavanjem propisanih kriterijuma u pogledu:

1. Vrednosti napona (dozvoljena odstupanja su u granicama $U_n \pm 5\%$);
2. Dozvoljena nesimetrija napona, koja treba da je manja od 2%;
3. Dozvoljena harmonijska distorzija napona.

Vrednost napona napajanja ima značajan uticaj na stepen iskorišćenja i faktor snage motora, pa prema tome i na aktivne i reaktivne gubitke i utrošak energije, [6], [9]. Taj uticaj, za razliku od drugih potrošača, npr. termičkih, je različit u zavisnosti od strukture motora po vrsti, veličini i stepenu opterećenosti ($p = P/P_n$). Kod motora manjih snaga taj uticaj je veći.

Kada su u pitanju neregulirani električni pogoni asinhronog motora, a takav je najveći broj u poljoprivrednoj proizvodnji, primenom mere podešavanja vrednosti napona u mreži potrošača u dozvoljenim granicama $\pm 5\%$ mogu se postići značajne uštede koje se ogledaju u smanjenju gubitaka aktivne snage i potrošnji reaktivne energije u motorima i napojnim vodovima. Prema [1] za niskonaponske motore snage 1–300 kW mogu se ostvariti uštede u potrošnji aktivne energije u iznosu 0,5–2%, a u potrošnji reaktivne energije čak 12–20%.

Kod nereguliranih elektromotornih pogona sa asinhronim motorima, pored postupaka podešavanja napona napajanja, uštede u potrošnji električne energije mogu se ostvariti i promenom vrste sprege motora, tj. prebacivanjem iz sprege trougao u spregu zvezda, za slučaj kada je opterećenje motora značajno manje od nominalnog [$P \leq (0,3-0,4)P_n$]. Tada je fazni napon smanjen sa $U_f = U_n$ na $U_f = 0,577U_n$, pa su smanjeni gubici u motoru i reaktivna snaga, [6].

Nesimetrija napona napajanja se najčešće javlja zbog prisustva velikih i monofaznih potrošača i nesimetričnog opterećenja pojedinih faza mreže, što je naročito izraženo u seoskim uslovima i manjim poljoprivrednim gazdinstvima. Kao posledica nesimetričnog napona napajanja, javlja se više negativnih efekata koji utiču na rad asinhronih motora koji se napajaju iz takve mreže. Ti efekti se ogledaju u sledećem:

1. Smanjuje se maksimalni i polazni momenat motora, jer se pored direktne javlja i inverzna komponenta momenta;
2. Povećava se klizanje zbog čega se povećavaju gubici u kolu rotora i potrošnja električne energije;
3. Povećavaju se gubici u gvožđu rotora, jer je i inverzna učestalost rotora dvostruko veća od učestalosti statora;
4. Smanjuje se stepen korisnog dejstva i povećava zagrevanje motora.

Ovi efekti su utoliko izraženiji što je veći stepen nesimetrije. Zato je neophodno da dozvoljeni stepen nesimetrije napona uvek bude u granicama određenim propisom.

Nesinusoidalni oblik napona napajanja asinhronog motora javlja se ili u slučaju kada se motor napaja preko pretvarača promenljive učestalosti u cilju regulisanja brzine ili zbog postojanja drugih nelinearnih potrošača ili pretvarača koji se napajaju iz te mreže. U tom slučaju, u talasnom obliku napona napajanja motora pored osnovnog javljaju se i viši vremenski harmonici koji negativno utiču na rad motora, uključujući i pojavu dodatnih gubitaka, [10]. Prema propisu dozvoljena harmonijska distorzija napona je $THD_u \leq 3-8\%$ (viša vrednost u mreži nižih napona).

Zahtevi za primenom regulisanih asinhronih motora u poljoprivredi javljaju se u slučajevima kada oni služe za pokretanje ventilatora i pumpi većih snaga, [11], [12]. Pokazuje se da je regulacijom protoka fluida (vazduh, voda) i upravljanjem brzine pogonskog asinhronog motora promenom učestalosti napona napajanja moguće postići značajne uštede u potrošnji energije. Te uštede mogu dostići 30–50% u odnosu na druge vidove regulisanja protoka fluida (ventili, prigušivači, podešavanja lopatica i sl.). Pri tome je za svaki konkretan slučaj potrebno izvršiti odgovarajuću tehnokonomsku analizu, pre svega zbog relativno visokih cena pretvarača za regulisanje brzine.

Visoke uštede električne energije regulisanjem brzine posebno se mogu ostvariti u pogonima sa delimično opterećenim motorima. Npr. za smanjenje brzine ventilatora sa 100% na 50% utrošena snaga motora opada sa 100% na 12,5%. Drugim rečima, kada puna ventilacija nije neophodna znatno je ekonomičnije smanjiti brzinu nego da motor radi sa punim brojem obrtaja, a da se protok vazduha prigušuje pomoću ventila u vazдушnom kanalu, kako bi se smanjila prekomerna ventilacija, [13]-[15].

ZAKLJUČAK

Električni motori su jedan od najvećih potrošača električne energije u poljoprivredi. Zato je neophodno preduzimanje mera za povećanje energetske efikasnosti pogona sa asinhronim motorima u toj oblasti i postizavanje što veće uštede utrošene električne energije. Te mere se mogu podeliti u tri grupe. U prvu grupu spada proizvodnja energetski efikasnih asinhronih motora klase IE1, IE2 i IE3. Drugu grupu čine mere za unapređenje energetske efikasnosti asinhronih motora tokom eksploatacije, što se često

naziva energetske menadžmentom motora. U te mere spada pravilan izbor motora po snazi, bolje održavanje, zamena starih motora niskog stepena korisnog dejstva, poboljšanje kvaliteta napona napajanja motora, izbor optimalne vrednosti napona napajanja u intervalu koji je dozvoljen po propisu, kompenzacija reaktivne energije i primena regulisanih asinhronih motora. Treća grupa mera se odnosi na povećanje energetske efikasnosti kompletnog elektromotornog pogona i tu spada optimizacija pogona i izbor efikasnih mehaničkih sistema.

Primenom navedenih mera iz druge i treće grupe može se ostvariti ušteda električne energije u električnim pogonima sa asinhronim motorima u poljoprivredi u iznosu od 5 do 8%. Većom primenom energetske efikasne asinhronih motora taj procenat će se značajno povećati.

LITERATURA

- [1] Kostić, M., 2010. *Povećanje energetske efikasnosti elektromotora u pogonima*, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija
- [2] Vukić, Đ., 1995. *Pogonske mašine u poljoprivredi – Elektromotori u poljoprivredi*, Poljoprivredni fakultet, Beograd, Srbija
- [3] IEC 60034-30 Ed 1, 2008. *Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency Classes of single speed three-phase cage induction motors – Edition 1.0*, Geneva, Switzerland
- [4] Direktiva 2005/32/EC, 2005. Commission for the European Communities with regard to ecodesign requirements for electric motors and their variable speed drives, Brussels, Belgium
- [5] Vukić, Đ., 1994. *Primena i eksploatacija kaveznih asinhronih motora u poljoprivredi*, Poljotehnika, br. 2, Beograd, Srbija, pp. 46-49.
- [6] Vukić, Đ., 2011. *Električni motori*, Visoka škola elektrotehnike i računarstva, Beograd, Srbija
- [7] Vukić, Đ., 1996. *Elektrotehnika*, Naučna knjiga, Beograd, Srbija
- [8] Vukić, Đ., Stajić, Z., Radić, P., 2004. *Asinhronne mašine – zbirka zadataka*, Akademska misao, Beograd, Srbija
- [9] Kostić, M., 1997. *Uticao napona u mreži na opterećenja i potrošnju električne energije*, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija
- [10] Vukić, Đ., 1985. *Uticao vremenskih harmonika na rad asinhronog motora*, Elektrotehnika, br. 12, Beograd, Srbija, pp. 11E-13E
- [11] Hindmarsh, J., 1994. *Electrical Machines and Their Applications*, Pergamon Press, Oxford, England
- [12] Vukić, Đ., 1994. *Poluprovodničko regulisanje brzine asinhronog kaveznog motora*, Poljotehnika, br. 3, Beograd, Srbija, pp. 38-41.
- [13] EuP Lot 11, 2008. *Water Pumps (in commercial buildings, drinking water pumping food industry and agriculture)*, Report to European Commission, Didcot, UK
- [14] Radić, M., Nikolić, D., Stajić, Z., Vukić, Đ., 2005. *Praktičan primer poređenja energetske efikasnosti malih pumpnih stanica*, Poljoprivredna tehnika, br. 2, Beograd, Srbija, pp. 43-53.
- [15] Vukić, Đ., Stajić, Z., Ercegović, Đ., 1998. *Optimizacija elektromotornog pogona pumpi sa asinhronim motorima*, Poljoprivredna tehnika, br. 2, Beograd, Srbija, pp. 65-77.

ENERGY EFFICIENCY OF INDUCTION MOTORS IN AGRICULTURE

Đukan Vukić¹, Branko Radičević¹, Nenad Floranović², Milan Kocić²

¹University of Belgrade, Faculty of Agriculture-Institute of Agricultural Technology,
Belgrade-Zemun, ²Research and Development Center ALFATEC, Niš

Abstract: The paper points to some possibilities for increasing the energy efficiency of asynchronous electric motors with special emphasis on the use and energy efficiency in agricultural production. The most important measures in this regard should be taken are: the application of energy-efficient induction motors, selection of motors based on electric power, replacing the old motors with low level of efficiency, setting the value of supply voltage, reactive power compensation and optimization of regulated electric drives with induction motors.

Key words: asynchronous motor, energy efficiency, electricity, the losses, the degree of efficiency

Datum prijema rukopisa:	28.10.2011.
Datum prijema rukopisa sa ispravkama:	04.11.2011.
Datum prihvatanja rada:	05.11.2011.