

ASINHRONI MOTORI SA PROMENOM VEZE POLUNAMOTA STATORA RADI POVEĆANJA ISKORIŠĆENJA I FAKTORA SNAGE

Miloje Kostić, Žarko Janda, Jovan Radaković*, Lajos Miskolci*

Institut "Nikola Tesla" Beograd

*SEVER Električne mašine a. d. Subotica

Sadržaj: U radu su izvršene računске i eksperimentalne provere opravdanosti primene asinhronih motora sa promenom veze (napona) faznih polunamota statora (veza YY/Δ). Na primeru ispitanih motora snaga od 1-7,5 kW utvrđena je značajna korist od primene ovih motora. Tako su pri sniženom naponu od 0,866Un (odgovara vezi polunamota statora u Δ), pri opterećenjima od 0-75%, gubici snage niži za 13-1,7% a reaktivna opterećenja niža za oko 1/3 (ili za 20-17% Pn). Pri opterećenjima ≥80%, motor se koristi u vezi YY (ili za Un), kako ne bi došlo do povećanih gubitaka snage. S obzirom da više od 4/5 motora snaga od 1-7,5kW radi u području opterećenja od 25-75%(ili u proseku sa opterećenjima od 50%), to je opravdana izrada i primena odgovarajuće serije YY/Δ motora.

Ključne reči: efikasnost, gubici, asinhroni motor, prevezivanje namota

1. UVOD

Sve do 1970-tih godina ciljna funkcija projektovanja asinhronih motora (AM) je minimum proizvodnih troškova-troškova materijala i izrade motora. Sa rastom cena električne energije, kriterijum optimalnosti postaje minimum ukupnih svedenih troškova, u koje su pored proizvodnih, uključeni i godišnji troškovi za gubitke aktivne energije $W_{vp}(kWh/god)$ a često i troškovi za utrošenu reaktivnu energiju $W_Q(kvarh/god)$. Prvo su u SAD, zbog interesa nacionalne ekonomije da ukupni svedeni troškovi budu najmanji, propisane minimalne vrednosti stepena iskorišćenja za motore od 1-100 kW [1].

Udruženje evropskih proizvođača električnih mašina i energetske elektronike i Evropska komisija, složili su se 1999. godine da propišu zajedničke klasifikacione šeme za različite nivoe energetske efikasnosti asinhronih motora [2]. Klasifikaciona šema [2] precizira tri klase motora po kriterijumu energetske efikasnosti (eff1, eff2 i eff3), tj. tri niza minimalnih vrednosti stepena iskorišćenja motora snaga od 1-100 kW u klasi eff1 i

eff2. U klasu eff3 svrstavaju se motori čije su vrednosti stepena iskorišćenja ispod minimalnih za klasu eff2 - uglavnom ranije proizvedeni motori u eksploataciji. Motori klase eff2 imaju manje gubitke snage za 20%, u odnosu na one u klasi eff3, ali su utrošak materijala i cena takođe veći za oko 20%.

Ekonomski proračuni, za motor snage 15 kW, pokazuju da će biti isplativo nabaviti motor u klasi eff2 ukoliko on radi sa nominalnim opterećenjem najmanje 2000h/godišnje ako se racuna sa cenom energije od 0,05 Euro/kWh [2]. Iz toga sledi da bi se, pri opterećenju od 50%, isplativost postigla tek pri radu od 4000h/god.

Motori u klasi eff1 imaju manje gubitke snage za oko 40% u odnosu na (uobičajene) motore iz klase eff3.

Navedene klasifikacione šeme predviđaju tri kategorije motora (eff1, eff2 i eff3) po kriterijumu stepena iskorišćenja. Tako su za standardne zatvorene motore (zaštite IP54 i IP55) sa kaveznom rotorom snaga od 1.1 do 90 kW, dvopolne i četvoropolne i izvedbe za napona 400 V i 50 Hz, propisane minimalne vrednosti stepena iskorišćenja da bi se motor date snage mogao svrstati u klasu eff1 ili eff2. Te vrednosti za navedene četvoropolne motore su date u tabeli 1.

Ponuđena klasifikaciona šema je učinila da, i u Evropi, proizvođači počnu da se takmiče u proizvodnji motora visoke energetske efikasnosti (High efficiency motors -HEMs) a ne samo sa nižim cenama. Izrada navedenih motora je praćena i povećanim troškovima. Najveće razlike u troškovima biće između onih proizvođača koji HEMs baziraju na poboljšanju standardnih konstrukcija i onih koji stvaraju novi red motora.

Ako red HEMs bazira na konstrukciji standardnog reda motora, troškovi za opremu i alate su minimalni. Najveće promene su u boljem iskorišćenju raspoložive konstrukcije za smeštaj većih količina aktivnog materijala (gvožđe, bakar), i/ili u korišćenju kvalitetnih magnetnih limova.

Tabela 1: Nominalne vrednosti stepena iskorišćenja za četvoropolne motore ($2p=4$)

Snaga motora kW	eff3 motori $\eta_n <$	eff2 motori $\eta_n \geq$	eff3 motori $\eta_n \geq$
1.1	76.2	76.2	83.8
1.5	78.5	78.5	85.0
2.2	81.0	81.0	86.4
3	82.6	82.6	87.4
4	84.2	84.2	88.3
5.5	85.7	85.7	89.2
7.5	87.0	87.0	90.1
11	88.4	88.4	91.0
15	89.4	89.4	91.8
18.5	90.0	90.0	92.2
22	90.5	90.5	92.6
30	91.4	91.4	93.2
37	92.0	92.0	93.6
45	92.5	92.5	93.9
55	93.0	93.0	94.2
75	93.6	93.6	94.7
90	93.9	93.9	95.0

Kada je u pitanju promena geometrije, koristi se povećanje dužine aktivnog dela u datom kućištu motora. Na ovaj način je moguće postići da tipičan eff3 motor pređe u eff2 (gubici manji do 15%). Stvaranje i proizvodnja novog reda HEMs je skopčana sa znatnim povećanjem troškova (za razvoj, nabavku nove opreme i alata, kvalitetnijih i skupljih materijala). Procenjuje se da je klasu eff1 moguće dostići samo razradom novog reda HEMs.

Motori malih (1-10 kW) i srednjih (10-30 kW) snaga, najčešće rade manje od 2000÷3000h/godišnje i sa opterećenjima ispod 50-60%, pa bi isplativost nabavke motora eff2, umesto eff3, često mogla biti neopravdana. Zato pojedini autori [3] predlažu da se motori snaga od 1.1÷7.5 kW rade sa smanjenim stalnim gubicima snage ($P_o = P_{fW} + P_{Fe} + P_{Cu0}$) na račun povećanja gubitaka opterećenja ($P_{\gamma P} = P_{Cu1P} + P_{Cu2P} + P_d$), što dovodi [3] do povećanja stepena iskorišćenja pri opterećenjima ispod 50-70%, uz istu cenu motora i (2) nešto manjeg stepena iskorišćenja u nominalnom režimu.

Rešenje koje se predlaže u ovom radu- **asinhroni motori sa promenom veze (napona) polunamota statora**- omogućava da se pri vezi za snižen napon (Δ) značajno poboljšaju stepen iskorišćenja i faktor snage pri opterećenjima do 70- 80%, a da se prelazom u vezu za pun napon (YY) pri opterećenjima bliskim nominalnim eliminiše pomenuto smanjenje stepena iskorišćenja.

2. STEPEN ISKORIŠĆENJA PRI DELIMIČNIM OPTEREĆENJIMA MOTORA

Vrednosti stepena iskorišćenja su različite za različite nivoe relativnih opterećenja ($p=P/P_n$) motora, i mogu se utvrditi pomoću izraza:

$$\eta = P / (P + P_o + P_{\gamma P_n} \cdot (P/P_n)^2) \quad (1)$$

ili, za zadate relativne iznose gubitaka praznog hoda (p_o) i nominalnih gubitaka opterećenja ($p_{\gamma n}$)

$$\eta = p / (p + p_o + p_{\gamma n} \cdot p^2) \quad (1a)$$

gde je vrednost gubitaka P_o određena iz oglada praznog hoda motora, a nominalni iznos gubitaka opterećenja kao razlika ukupnih gubitaka snage u nominalnom režimu i gubitaka praznog hoda ($P_{\gamma P_n} = P_{\gamma n} - P_o$)

Pri istim iznosima nominalnih gubitaka snage ($P_{\gamma n}$) i nominalnog stepena iskorišćenja motora (η_n):

$$P_{\gamma n} = P_o + P_{\gamma P_n} \quad (2)$$

$$P_{\gamma n} = P_o + P_{\gamma P_n} \quad (2a)$$

$$\eta_n = P_n / (P_n + P_{\gamma n}) \quad (3)$$

$$\eta_n = 1 / (1 + p_{\gamma n}) \quad (3a)$$

ali sa različitim učešćima navedenih gubitaka snage

$$p_o = P_o / P_n \quad (4)$$

$$p_{\gamma n} = P_{\gamma P_n} / P_n \quad (5)$$

vrednosti ukupnih gubitaka snage u motoru i vrednosti stepena iskorišćenja (izraz 1) će biti različite za iste iznose relativnih opterećenja $p=P/P_n < 1$. Promene stepena iskorišćenja u oblasti opterećenja $p=0.125-1.125$, za motore sa različitim odnosom stalnih gubitaka (p_o) i gubitaka opterećenja ($p_{\gamma n}$), su prikazane na slici 1.

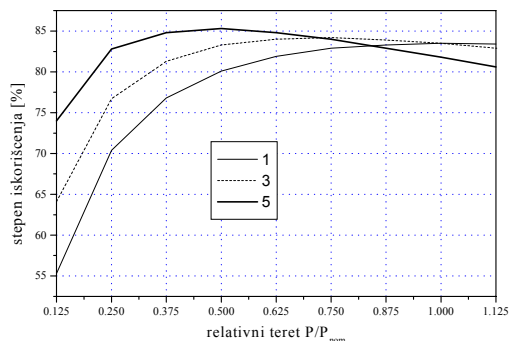
Na sl.1 su prikazane zavisnosti stepena iskorišćenja u području opterećenja od 0- 1,125 P_n , za motore 1, 2 i 3, čiji su podaci dati u tabeli 2, dok su na sl.2 date promene ukupnih gubitaka snage za iste motore.

Tabela 2:

Motor	P_o	$P_{\gamma P_n}$	$P_{\gamma n}$
1 (kriva 1)	0,099	0,099	0,198
2 (kriva 3)	0,068	0,130	0,198
3 (kriva 5)	0,041	0,182	0,223

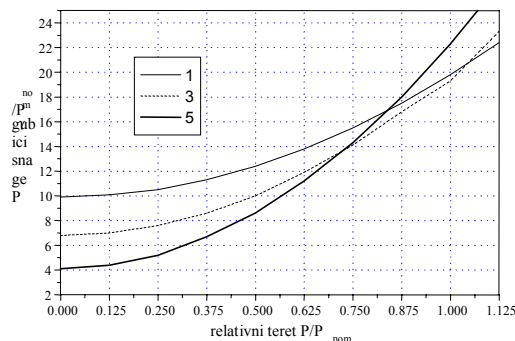
Očigledno je da će, pri nižim, stalnim ili promenljivim opterećenjima u odnosu na nominalno, motor 3 raditi sa znatno višim stepenom iskorišćenja, i pored toga što su im deklarirani iznosi nominalnog stepena iskorišćenja $\eta_n=83,5\%$ isti. U pogonu je većina motora predimenzionisana iz razloga sigurnosti i /ili zbog razlike između prve veće nominalne snage motora u odnosu na potrebnu (projektovanu) snagu. Tako motori malih, srednjih i većih snaga najčešće rade, redom, u oblasti opterećenja do 50%, 50-75 i 75-100% nazivne snage. Ako se razmotre zavisnosti stepena iskorišćenja (sl.1), uočava se da razlike u vrednostima stepena iskorišćenja između pojedinih motora variraju sa promenom opterećenja motora. To znači da motor sa visokim stepenom iskorišćenja u nominalnom režimu (η_n) ne garantuje i visok stepen iskorišćenja pri delimičnim opterećenjima. To se posebno odnosi na motore sa visokim iznosima gubitaka u praznom hodu p_o (motor 1), tj. gubitaka u gvožđu. Ovo znači da nominalna vrednost stepena iskorišćenja nije dovoljan pokazatelj za energetska efikasnost (posmatranog motora) pa bi proizvođači trebali da daju i informaciju o vrednostima stepena iskorišćenja pri delimičnim opterećenjima. U tom smislu se predlaže da proizvođači utvrde, i daju kao kataloški podatak, vrednosti stepena iskorišćenja pri karakterističnim opterećenjima od 25, 50, 75 i 100% nominalne snage motora.

Mada se npr. smanjenjem stalnih gubitaka snage (P_o) povećava vrednost stepena iskorišćenja pri malim opterećenjima (vrednosti η_{25} i η_{50}), treba primetiti da postoje određena ograničenja dokle se može ići sa tim smanjenjem. Tako u motoru date konstrukcije, sa smanjenjem gubitaka u gvožđu, približno u istom



Sl.1. Stepen iskorišćenja u funkciji relativnog tereta.

relativnom odnosu, se povećavaju gubici opterećenja, koji su i do dva puta veći u apsolutnom iznosu, pa to po pravilu dovodi do povećanja ukupnih gubitaka pri nominalnom opterećenju, za koje se utvrđuje najveće povišenje temperature a time i nominalna snaga motora.



Sl. 2. Gubici snage u funkciji relativnog tereta.

3. ZAVISNOST GUBITAKA SNAGE I REAKTIVNIH OPTEREĆENJA OD NAPONA

Pri proračunu zavisnosti ukupnih gubitaka snage od napona $P_{\gamma p} = f(U/U_n)$, za opterećenja od praznog hoda do nominalnog, prvo je iz oglada praznog hoda utvrđena zavisnost **stalnih gubitaka**

$$P_o(U/U_n) = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{fW} \quad (9)$$

gde su P_{Cu} , P_{Fe} i P_{fW} redom gubici u bakru, gvožđu i na trenje i ventilaciju u praznom hodu.

Gubici opterećenja ($P_{\gamma p}$) su zavisni od relativnih vrednosti opterećenja ($p = P/P_n$) i napona ($U = U/U_n$):

$$P_{\gamma p} = P_{\gamma p_n} \cdot p^2 / u^2 \quad (10)$$

gde su $P_{\gamma p_n}$ -gubici opterećenja u nominalnom režimu (P_n , U_n). Zatim se sračunavaju vrednosti ukupnih gubitaka snage u motoru:

$$P_{\gamma} = P_o(u) + P_{\gamma p}(u, p) \quad (11)$$

Na osnovu dobijenih vrednosti P_{γ} utvrđene su optimalne vrednosti (ili optimalna područja) napona za određena opterećenja (ili područja opterećenja), tj. naponi pri kojima su odgovarajući gubici snage najmanji. Razlika između ukupnih gubitaka snage, za dato opterećenje (p), pri nominalnom naponu ($u=1$)

$$P_{\gamma}(p, 1) = P_o(1) + P_{\gamma p_n} \cdot p^2 \quad (12)$$

i gubitaka snage pri datom (optimalnom naponu) (u)

$$P_{\gamma}(p, u) = P_o(u) + P_{\gamma p_n} \cdot p^2 / u^2 \quad (13)$$

reprezentuje efekat (idealnog) regulatora napona po osnovu smanjenja gubitaka snage, u apsolutnim (ΔP_{γ}) i relativnim ($\Delta p_{\gamma} = \Delta P_{\gamma} / P_{\gamma n}$) jedinicama

$$\Delta P_{\gamma} = P_{\gamma}(p, 1) - P_{\gamma}(p, u) \quad (14)$$

$$\Delta p_{\gamma} = p_{\gamma}(p, 1) - p_{\gamma}(p, u) \quad (14a)$$

Na sličan način su određeni i efekti (idealnog) regulatora napona u pogledu smanjenja reaktivnih opterećenja motora. Prvo je utvrđena zavisnost reaktivnih opterećenja (iz oglada) praznog hoda

$$Q_o = f(U/U_n) \quad (15)$$

$$q_p = Q_o / P_{1n} \quad (15a)$$

dok je priraštaj reaktivnih opterećenja od praznog hoda do nominalnog opterećenja, u apsolutnim (ΔQ_n) ili relativnim ($\Delta q_n / P_{1n}$) jedinicama

$$\Delta Q_n = Q_n - Q_o \quad (16)$$

$$\Delta q_n = \Delta Q_n / P_{1n} \quad (16a)$$

Vrednosti reaktivnih opterećenja, u apsolutnim (Q) i relativnim (q) jedinicama, se utvrđuju po izrazima

$$Q = Q_o(u) + \Delta Q_n \cdot p^2 / u^2 \quad (17)$$

$$q = q_o(u) + \Delta q_n \cdot p^2 / u^2 \quad (17a)$$

Razlika između reaktivnih opterećenja za dato opterećenje (p) pri $U = U_n$:

$$Q(p, 1) = Q_o(1) + \Delta Q_n \cdot p^2 \quad (18)$$

i reaktivnih opterećenja pri datom optimalnom naponu (u)

$$Q(p, u) = Q_o(u) + \Delta Q_n \cdot p^2 / u^2 \quad (19)$$

Reprezentuje efekat (idealnog) regulatora napona po osnovu smanjenja reaktivnih opterećenja.

$$\Delta Q = Q(p, 1) - Q(p, u) \quad (20)$$

$$\Delta q = q(p, 1) - q(p, u) \quad (21)$$

4. ASINHRONI MOTORI SA PROMENOM VEZE(NAPONA) POLUNAMOTA STATORA

Radi se o motorima čiji su fazni namotaji statora izvedeni iz dva polunamota čijih je svih 12 krajeva izvedeno na priključnu ploču motora, tj. o motorima sa

mogućnošću promene veze (napona) polunamota. Polunamoti vezani u dvostruku zvezdu () su pod nominalnim (projektovanim) naponom, ali oni dolaze pod snižen napon ($\sqrt{3}U_n/2$) pri sprezi faza u trougao i rednoj vezi polunamota. To dovodi do smanjenja stalnih gubitaka praznog hoda za 13% $P_{\gamma n}$ (tabela 3, pod 3b za $P/P_n=0$), i povećanja nominalnih gubitaka opterećenja za 20% $P_{\gamma n}$ a time i ukupnih gubitaka $P_{\gamma n}$ za 7% $P_{\gamma n}$. Najznačajnija korist primene ovih motora, sa vezom u Δ ($0,866 U_n$), je u tome da su: ukupni gubici niži za 13%÷1,7% $P_{\gamma n}$ za opterećenja od 0-75% uz smanjenja reaktivnih opterećenja od 20%-17% P_{in} . Motori se prevezuju u YY ($U=U_n$) pri opterećenjima $P/P_n>80\%$, da ne bi došlo do povećanih gubitaka snage (tabela 3). Interesantno je, po energetske efikasnosti, uporediti standardni motor iz klase eff2 sa prespojivim motorom (YY/ Δ) iz klase eff3. Pokazuje se (tabele 3 i 4) da motor eff3 (YY) ima manje gubitke snage za opterećenja $P/P_n\leq 40\%$, a ukoliko se računaju i manja reaktivna opterećenja on je energetski efikasniji sve do opterećenja $P/P_n\leq 60\%$. Ukoliko se uzmu u obzir i povećani troškovi (odgovaraju povećanju gubitaka snage od 20% i radu 2000h/god.), onda primena eff2 motora postaje isplativa tek pri opterećenjima $P/P_n\geq 90\%$ i radu iznad 2000h/godišnje.

4.1. Efekti primene veze (napona) polunamota statora na smanjenje gubitaka snage

Uticao promene veze (napona) faznih polunamota statora iz dvostuke veze zvezde YY(U_n) u trougao $\Delta(0,866U_n)$, na smanjenje gubitaka snage se mogu približno proračunati po postupku koji je izložen u poglavlju 3, izrazi (9)-(14). Efekti primene **motora sa prevezivim namotajem statora**, pri vezi Δ za snižen napon Δ ($0,866 U_n$) na faznim polunamotima, na smanjenje gubitaka snage je utvrđen kao razlika gubitaka snage pri nominalnom ($u=U/U_n=1$) i sniženom naponu ($u=0,866$):

$$\Delta P_{\gamma} = P_{\gamma}(p,1) - P_{\gamma}(p,0.866) \quad (23)$$

$$\Delta p_{\gamma} = p_{\gamma}(p,1) - p_{\gamma}(p,0.866) \quad (23a)$$

pri čemu se vrednosti $P_{\gamma}(p,1)$ i $P_{\gamma}(p,0.866)$, odnosno odgovarajući relativni iznosi $p_{\gamma}(p,1)$ i $p_{\gamma}(p,0.866)$ određuju po izrazima (12) i (13). Tako utvrđene vrednosti, u procentima, $\Delta P_{\gamma}/P_{\gamma n}$ (%) su date u tabeli 3, pod 3b za opterećenja od 0-112,5%. Kako se pri opterećenjima $P_n\geq 80\%$, motor treba vezati u YY ($U=U_n$), kako bi se izbegli negativni efekti (povećanje gubitaka). Na isti način su utvrđeni iznosi smanjenja opterećenja, pri vezi faznih polunamota redno a tako formiranih faznih namota u Y ($U=0,5 U_n$) i dati u tabeli 3, pod 3c. Zaključuje se da ta veza ima preimućstvo, u odnosu na vezu Δ , samo pri niskim opterećenjima (<30%), pa će u daljim razmatranjima motora sa prevezivim namotajem statora biti analizirane samo energetske karakteristike za vezu Δ .

Odgovarajuća smanjenja reaktivnih opterećenja se određuju kao razlika istih pri nominalnom ($u=1$) i sniženom ($u=0,866$) naponu.

$$\Delta Q = Q(p,1) - Q(p,0.866) \quad (24)$$

$$\Delta q = q(p,1) - q(p,0.866) \quad (24a)$$

pri čemu se vrednosti $Q(p,1)$ i $Q(p,0.866)$, odnosno $q(p,1)$ i $q(p,0.866)$ izračunavaju pomoću izraza (17) i (17a). Tako utvrđeni iznosi u relativnim jedinicama, po izrazu (24a), su dati u tabeli 4, pod 3b.

Na sličan način su utvrđena smanjenja reaktivnih opterećenja, za vezu namotaja statora u Y ($u=0,5 U_n$), i data su u tabeli 4, pod 3c.

U okviru rada na projektu [4], u Ispitnoj stanici fabrike motora "Sever" Subotica, izvršena su standardna merenja u cilju utvrđivanja stepena iskorišćenja i faktora snage za 6 karakterističnih opterećenja od 0-150%, za motore snaga 2.2 kW, 3 kW i 5.5 kW, pri nominalnom (U_n) i sniženom ($0.866U_n$) naponu. Dobijeni rezultati za gubitke snage i reaktivna opterećenja se, u procentnim iznosima, približno poklapaju sa vrednostima koje su izračunate i date u tabelama 3 i 4 i prikazane zavisnostima datim na sl.3 i 4 pošto se učešća stalnih gubitaka snage u ukupnim gubicima pri punom i sniženom naponu praktično ne razlikuju u oba razmatrana slučaja.

Navedeni podaci (tabele 3 i 4) i sprovedena kraća analiza pokazuju da prespojivi motori eff3 (YY/ Δ) mogu imati veću tehnoekonomsku opravdanost, u odnosu na primenu skupljih eff2 motora manjih i srednjih snaga koji rade ispod 2000-3000h/godišnje.

5. KRATKA TEHNOEKONOMSKA ANALIZA

Radi se o motorima koji su u konstrukcionom i proizvodnom smislu identični sa asinhronim motorima za dva napona i čija bi proizvodna cena mogla biti viša za 5-10% u odnosu na standardne asinhronne motore, zbog jedine razlike u tome da im je namotaj statora podeljen u dva dela čijih je 12 krajeva izvedeno na priključnu ploču motora i eventualne prigradnje grebenastog prekidača za promenu (izbor) veze namotaja.

Pri opterećenjima čija je srednja vrednost u granicama od 80-100% nominalnog opterećenja, namotaj statora se na priključnoj ploči motora vezuje u dvostruku zvezdu i, u energetskom smislu, radi kao standardni asinhroni motor. Kada su srednje vrednosti opterećenja $\leq 80\%$, namotaj statora se vezuje u trougao i fazni polunamoti statora dolaze pod snižen napon ($0,866 U_n$) a gubici praznog hoda se smanjuju za oko 30%, dok gubici opterećenja rastu, ali je rast ovih drugih manji od smanjenja prvih gubitaka, i to tim više ukoliko su opterećenja motora manja. Tako, pri radu motora od 5,5 kW u vezi trougao, ukupni gubici snage se smanjuju:

- za 2%, pri opterećenjima od 75%,
- za 10%, pri opterećenjima od 50% i
- za 12%, pri opterećenjima od 25%.

Ekonomski efekti primene ovih motora se, ovde, utvrđuju na primeru navedenog reprezentativnog motora snage 5,5 kW i za prosečnu vrednost srednjih opterećenja od 50%.Odgovarajuće smanjenje gubitaka snage iznosi oko 0,1 kW. Za povraćaj povećanih troškova, za oko 50 DM, za nabavku ovog motora, u odnosu na standardni motor, potrebno je uštedeti 500kWh

(500kWh-0,1DM/kWh) električne energije. Za to je potrebno vreme korišćenja motora:

- od 1 godine, ako motor radi 5000 h/godišnje
- od 2 godine ako motor radi 2500 h/godišnje

Kada se uračunaju efekti od smanjenja reaktivnih opterećenja od oko 1kvar po ceni od 0,01DM/kvarh, ukupni efekti su dvostruko veći, pa rok povraćaja sredstava za povećanu cenu motora iznosi samo 1 godinu, i pri radu od 2500 h/godišnje. **Po proceni, od 100 ovakvih motora, najmanje njih 80 radi sa srednjim opterećenjima nižim od 80%, pa povraćaj dodatnih troškova za celokupnu seriju motora, iznosi oko 3125h rada ili 1,25 godina ukoliko navedeni motori rade 2500 h/godišnje u proseku.**

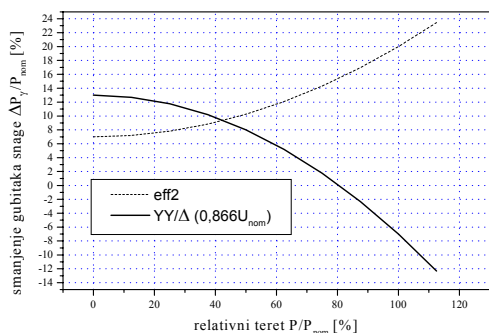
Interesantno je navesti da, pri datim prosečnim vrednostima srednjih opterećenja do 50÷60%, predložena serija motora po vrednostima stepena iskorišćenja i faktora snage dostiže energetski efikasne motore klase eff2 (Evropska komisija je 1998. definisala tri klase: eff1, eff2, eff3) iako je utrošak aktivnih materijala, gvožđa i bakra, manji. S obzirom da ovi motori imaju manje gubitke za oko 15%, što približno iznosi oko 1,5% nominalne snage motora, to bi godišnja serija ovih motora ukupne snage od 100MW mogla doneti uštede u potrošnji električne energije od 5000MWh/godišnje. Smanjenje u potrošnji reaktivne energije je 50.000 Mvarh/godišnje.

Tabela 3:

Optereć. P/P _n %	0	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	100	112,5
Vrsta motora	Gubici snage 100 $P_{\gamma} / P_{\gamma n}$ (%)									
1.eff3 (U _n)	40	40,9	43,7	48,4	55,0	63,4	73,7	85,9	100	115,9
	Smanjenje gubitaka snage 100 $\Delta P_{\gamma} / P_n$ (%)									
2.eff2 motor	7,0	7,2	7,8	8,8	10,2	12,1	14,3	17,9	20,0	23,5
3.prespoji vi eff3										
3a.U=U _n (YY)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3b.U=0,86 U _n (Δ)	13,0	12,7	11,7	10,2	8,0	5,2	1,7	-2,3	-7,0	-12,3
3c.U=0,5 U _n (Y)	19,1	16,3	7,8	-6,2	-25,9					

Tabela 4:

Optereć. P/P _n %	0	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	100	112,5
Vrsta motora	Reaktivna opterećenja 100 Q / P_n (%)									
1.eff3 (U _n)	50,0	50,2	51,0	52,2	54,0	56,2	59,0	62,2	66,0	70,2
	Smanjenje reaktivnih opterećenja 100 $\Delta Q / P_{\gamma n}$ (%)									
2.eff2 motor	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
3.prespoji vi eff3										
3a.U=U _n (YY)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3b.U=0,86 U _n (Δ)	19,7	19,6	19,4	19,0	18,4	17,6	16,7	15,6	14,4	15,0
3c.U=0,5 U _n (Y)	29,9	29,1	26,9	23,1	17,9					



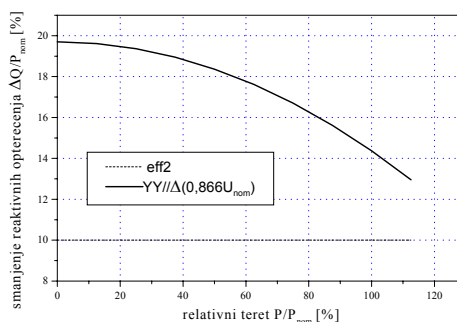
Sl. 3. *Smanjenje gubitaka snage u funkciji Relativnog tereta.*

Rezultati ovog projekta se mogu koristiti pri premotavanju oštećenih asinhronih motora tako što će namotaj biti izveden iz dva polunamota čiji će krajevi biti vezani u trougao, ukoliko je srednja vrednost opterećenja ispod 80%. Procena je da bi to moglo biti primenjeno na 70-80% premotavanih motora. Time bi bilo omogućeno da ovi motori poboljšaju svoje energetske karakteristike, u odnosu na slučajeve da se premotaju prema originalnoj verziji namotaja statora. Pod pretpostavkom da se na ovaj način izvrši premotavanje motora ukupne snage 60÷70MW/godišnje, to bi moglo doneti uštede od oko 1 MW u aktivnoj i od oko 10 Mvar u reaktivnoj snazi, ili na godišnjem nivou uštede u aktivnoj i reaktivnoj energiji od 3 000 MWh i 30 000 Mvarh.

6. ZAKLJUČAK

U radu su izvršene računске i eksperimentalne provere opravdanosti primene asinhronih motora sa promenom veze (napona) faznih polunamota statora (veza YY/Δ). Na primeru ispitanih motora snaga od 1-7,5 kW utvrđena je značajna korist od primene ovih motora. Tako su pri sniženom naponu od 0,866Un (odgovara vezi polunamota statora u Δ), pri opterećenjima od 0-75%, gubici snage nizi za 13-1,7% a reaktivna opterećenja niža za oko 1/3 (ili za 20-17%Pn). Pri opterećenjima ≥80%, motor se koristi u vezi YY (ili za Un), kako ne bi došlo do povećanih gubitaka snage. S obzirom da više od 4/5 motora snaga od 1-7,5kW radi u području opterećenja od 25-75%(ili u proseku sa opterećenjima od 50%), to je opravdana izrada i primena odgovarajuće serije YY/Δ motora.

U nastavku istraživanja [4] biće definisana konstrukcija i postupak za promenu veze namotaja statora, i kriterijum za izbor jedne od dve moguće veze (YY/Δ), zavisno od nivoa prosečnih opterećenja motora.



Sl. 4. *Smanjenje reaktivnih opterećenja u funkciji relativnog tereta.*

7. LITERATURA

- [1] "National Electrical Manufacturer's Association", Motors and Generators", MG1-1993, MG3-1974.
- [2] European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics (CEMEP), European Commission (EC), "Electric motor Efficiency", 1999.
- [3] M.V.Cistelean, G.Ciumbulea, E.Demeter, "High efficiency general purpose small power induction motors: design and development", ICEM 2002, Paper No.418
- [4] "Standardni asinhroni motori za dva napona kao energetski efikasni motori", Projekat Instituta "Nikola Tesla" Beograd i Fabrike "Sever" Subtica, u okviru NPEE koje finansira RMZNT Vlade Republike Srbije od 202-2004. godine.

THE INDUCTION MOTORS WITH VARIABLE WINDINGS INTERCONNECTION AND INCREASED EFFICIENCY

Abstract: In this paper it is presented the theoretical analysis and experimental results of the investigation of the possibility to increase the efficiency and power factor of induction motors by changing the stator windings interconnection from "double star" to "delta". By testing induction motors in power range from 1 kW up to 7,5 kW the significant space for savings is discovered. Under reduced supply voltage (0,866 Un, what corresponds to windings connected in "delta" connection) and under load levels up to 75%, the measured power losses are reduced for 13%-1,7% and reactive power consumption is reduced for one third. At load levels higher than 80% of nominal, the motor is used in connection "delta" to avoid the increased power losses. Regarding that more than 80% of installed induction motors are light loaded, the proposed change of connection would give power savings.

Key Words: increased efficiency, induction motor, windings interconnection.