

## Izbor i pravilno korišćenje motora (energetski menadžment motora)

Miloje M. Kostić

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Koste Glavinića 8a,  
11000 Beograd, Srbija  
[mkostic@ieent.org](mailto:mkostic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** Energetski menadžment motora uključuje: ispravan izbor snage motora, kontrolu i unapređenje kvaliteta električne energije, tj. kvaliteta napona (smanjenje nesimetrije i harmonijske distorzije) i kvalitetno održavanje. Za motore snaga od 5 kW do 20 kW, jedinična cena (po kW snage) je približno konstantna. Sa izborom motora adekvatne snage, ili pri eventualnoj zameni motora sa novim čija je snaga manja za 20%-50%, i manji motor će biti jeftiniji za 20%-50%. Kada je motor snage 22 kW zamenjen sa novim motorom snage 15 kW, uz nižu cenu za 36%, povećana je vrednost stepena iskorišćenja za 3.6% (Primer u radu). Na osnovu rezultata naših istraživanja je potvrđeno da postoje značajne mogućnosti za uštede energije sa podešavanjem vrednosti napona u opsegu ( $U_n \pm 5\%$ ), pošto više od 80% motora radi sa opterećenjima  $\leq 70\%$ , posebno motori malih i srednjih snaga ( $\leq 30$  kW)-

**Ključne reči:** Energetski menadžment motora, uštede energije, ispravan izbor snage motora, energetske klase motora, nesimetrija napona, viši harmonici naponu, podešavanje vrednosti napona.

### 1. Uvod

Elektromotori su najveći potrošač električne energije u industriji (sa oko 70%), gde se koriste u proizvodnim procesima, i komercijalnoj potrošnji (sa oko 40%). Pogoni sa motorima troše između 35% i 40% od celokupne proizvedene električne energije u svetu. Ukupni potencijali za uštede se procenjuju na 20-30% [1-2].

Energetski efikasni pogoni ne sadrže samo energetske motore. Naprotiv, radi se o energetske efikasnim sistemima u celini. Mnogi korisnici pogona daju prednost kupovini jeftinijih komponenti i manjim investicionim ulaganjima, u odnosu na energetske efikasnost. Da bi se postigla optimalna

ekonomičnost, izbor treba izvršiti na osnovu najmanjih ukupnih troškova-LLC, (LLC-skraćenice od engleske reči „Life Cycle Cost”), koji pored investicionih uvažavaju i troškove za utrošenu energiju tokom perioda eksploatacije, uz pravilan rad i kvalitetno održavanje. Analize pokazuju da troškovi za utrošenu električnu energiju čine više od 96% ukupnih troškova u toku veka eksploatacije motora, dok cena motora učestvuje samo sa 3%, a troškovi održavanja sa oko 1%. Očigledno, da mere za smanjenje potrošnje električne energije, po pravilu, donose pozitivan finansijski efekat.

Jedan od najvažnijih faktora za uštede energije je upotreba energetski efikasnih motora. Korišćenjem elektromotora sa povećanim vrednostima stepena iskorišćenja mogu se postići uštede od 5-6%, [1]. IEC je razvio Standard za klasifikaciju motora po nivoima vrednosti stepena iskorišćenja, IEC 60034-30, sa ciljem da se, na globalnom nivou, ujednače odgovarajući standardi za motora snaga između 0.75 kW i 375 kW. Definisane su četiri energetske klase motora, [2]:

- IE1, motori standardne efikasnosti (Standard efficiency);
- IE2, motori visoke efikasnosti (High efficiency), sa 18-25% manjim gubicima u odnosu na IE1;
- IE3, motori vrlo visoke efikasnosti (Premium efficiency), sa 15-20% manjim gubicima od IE2; i
- IE4, motori super efikasnosti (Super Premium efficiency), što se prezentira kao cilj kome se teži.

Prema Direktivi 2005/32/EC [3] primena motora navedenih energetskih klasa biće obavezna u zemljama Evropske Unije, i to:

- od 16. juna 2011, motori moraju biti najmanje klase IE2,
- od 1. januara 2015: (i) motori nominalnih snaga od 7,5-375kW moraju biti najmanje klase IE3, ili klase IE2 i opremljeni sa pretvaračima za regulaciju brzine (frekvencije); i
- od 1. januara 2017: (i) svi motori nominalnih snaga od 0,75-375kW moraju biti najmanje klase IE3, ili klase IE2 i opremljeni sa pretvaračima za regulaciju brzine ( frekvencije).

Ispravan izbor i pravilno korišćenje asinhronih motora uključuje sledeće:

- ispravan izbor motora po snazi i sinhronom broju obrtaja,
- Izbor motora više energetske klase (tj. veće vrednosti stepena iskorišćenja), kada je to ekonomski isplativo,
- zamenu starih motora sa niskim vrednostima stepena iskorišćenja,
- proveru i održavanje kvaliteta električne energije (posebno kvaliteta napona), i
- kvalitetno održavanje (podmazivanje, zamena ležajeva i slično).

## 2. Pravilan izbor motora po snazi i uštede energije

Motori često, samo zbog greške u izboru, rade i sa niskim prosečnim opterećenjima. Tako u SAD oko 40 % motora radi sa opterećenjima ispod 40% [4]. Prema istraživanjima u EU[1], srednja vrednost faktora opterećenja motora iznosi  $F_L = P_1/P_N = 0,55-0,60 > p = P/P_N = F_L / \eta_L \approx 0,50$ , gde je  $\eta_L$ -stepen iskorišćenja motora pri datom opterećenju. Naša istraživanja pokazuju da su srednje vrednosti opterećenja  $p = P/P_N = 35-55\%$ , za motore od 1-100 kW [5, 6], i time se poklapaju sa podacima datim u [1].

Rad predimenzionisanog motora, sa opterećenjima od 30-50%, dovodi do:

- manje promene aktivne snage ( $\pm 1\%$ ), ali i do
- značajnijeg povećanja reaktivne snage (50-70%),

Predimenzionisani motor je skuplji za 50-100%, a povećani troškovi za reaktivnu energiju premašuju cenu motora, pa posledice po ova dva osnova znatno premašuju efekte zbog promena aktivne snage ( $\pm 1\%$ ), iako se ovi zadnji češće navode u literaturi.

Krivac za grešku u proceni opterećenja je i u metodi da se relativna opterećenja motora sračunavaju tako što se izjednače sa relativnim opterećenjem motora po struji. Time se, na osnovu izraza  $p \approx I/I_N = (P/P_N) \cdot (\cos\varphi_N / \cos\varphi) (\eta_N / \eta)$ , dobijaju iznosi relativnog opterećenja koji su veći od stvarne vrednosti ( $p = P/P_N$ ) i do 10 %, . Postupak za određivanje relativnih opterećenja motora po korisnoj snazi,  $p = P/P_N$ , na osnovu izmerene struje opterećenja i kataloških podataka motora [7, 8], omogućava da se navedena greška izbegne.

## 3. Izbor odgovarajuće energetske klase motora

Izbor skupljeg motora više energetske klase, tj. veće vrednosti stepena iskorišćenja, je često ekonomski isplativ u odnosu na kupovinu jeftinijeg motora niže energetske klase i manje vrednosti stepena iskorišćenja. Tako je, po pravilu, isplativo umesto motora energetske klase IE1:

- kupiti motor klase IE2, ukoliko motor radi  $T_G \geq 2000$ h/god, sa opterećenjima  $P \geq 0,70P_N$ , tj. ako je  $PT_G \geq 1400$ , i
- kupiti motor klase IE3, ukoliko motor radi  $T_G \geq 4000$ h/god, sa opterećenjima  $P \geq 0,70P_N$ , tj. ako je  $PT_G \geq 2800$ .

Svi drugi slučajevi, sa različitim nivoom opterećenja i godišnjim fondom sati rada, se mogu svesti na navedene, na osnovu vrednosti proizvoda ( $PT_G$ ).

Poznato je da je nabavka motora klase IE2 obavezna od sredine 2011 u zemljama Evropske Unije, a motora klase IE3 od 2017, jer će to do tada postati isplativo s obzirom na očekivani rast cena električne energije, prvenstveno zbog povećanih troškova za proizvodnju (ekološki) „čiste“

energije. To praktično znači da i u Srbiji, već sada, treba stimulisati kupovinu motore klase IE2.

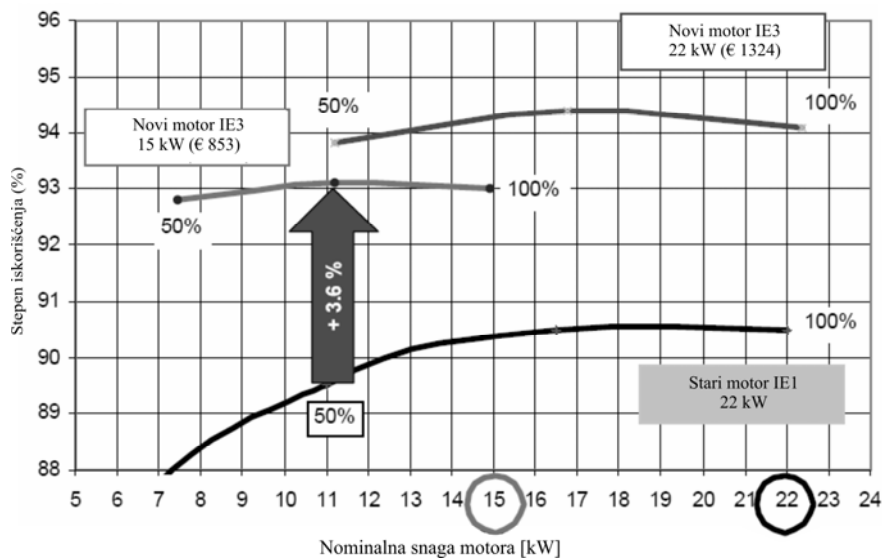
#### **4. Zamena starih motora niskog stepena iskorišćenja sa novim odgovarajuće energetske klase**

Motori posle premotavanja imaju povećane gubitke snage od 10-30%, tako da se nominalne vrednosti stepena iskorišćenja smanjuju za vrednost  $\Delta\eta=(0,1\div 0,3)\cdot(1-\eta)$ , ili za (1÷3)%, pa je, često, ekonomičnije, odlučiti se za kupovinu novog motora. Tako, po pravilu, troškovi remonta i premotavanja motora snaga ispod 15 kW premašuju troškove nabavke odgovarajućeg novog motora. Sa gubicima većim za oko 15% posle premotavanja, motor prelazi u nižu energetska klasu, npr. motor klase IE2→IE1. Na osnovu analiza, koje su slične onim u poglavlju 3, zaključuje se da:

- nije isplativo premotavati motore koji rade  $\geq 2000\text{h/god}$  i sa  $P \geq 0,70\text{PN}$ , tj. sa  $\text{PTG} \geq 1400$ , ako troškovi premotavanja prelaze 80% cene novog motora, i
- nije isplativo premotavati motore koji rade  $\geq 4000\text{h/god}$  i sa  $P \geq 0,70\text{PN}$ , tj. sa  $\text{PTG} \geq 2800$ , ako troškovi premotavanja prelaze 60% cene novog motora.

Ponekad je potrebno doneti odluku da li je uopšte isplativo zameniti stari motor, a potom treba odabrati najekonomičnije rešenje - izabrati motor odgovarajuće nominalne snage i energetske klase. Na sl. 1 su date zavisnosti stepena iskorišćenja od opterećenja, za tri motora:

- stari motor snage 22 kW, čija se zamena razmatra, zbog niske vrednosti stepena iskorišćenja (klasa IE1),
- novi motor snage 22 kW i visoke vrednosti stepena iskorišćenja (klasa IE3), i cene od 1324 Eura, i
- novi motor manje snage od 15 kW i niže cene (853 Eura), i visoke vrednosti stepena iskorišćenja (klasa IE3).



Slika 1. Efekti zamene starog motora sa motorom više energetske klase (IE3) i odgovarajuće – niže nominalne snage.

Ukoliko opterećenja ne prelaze 15 kW, najisplativije je nabaviti novi motor manje snage i klase IE3, zbog niže cene (853 Eura). Naime, cena motora snage 22 kW i klase IE3 je veća za 55 %. Tako povećani troškovi bi bili isplativi, ukoliko bi taj motor imao manje gubitke snage za  $\geq 30\%$ , pri opterećenju od 15 kW. Ti gubici su manji samo za 10 %, pa je isplativija nabavka motora snage 15 kW, klase IE3 i cene od 853 Eura (sl. 1).

## 5. Uticaj kvaliteta napona na potrošnju električne energije starih motora

Uštede u potrošnji električne energije u pogonu se mogu ostvariti unapređujući kvalitet električne energije u mreži potrošača. Pojam kvalitet električne energije, uglavnom podrazumeva kvalitet napona napajanja, koji treba da ispunjava propisane kriterijume u pogledu:

- vrednosti napona (dozvoljena odstupanja su u granicama  $U_N \pm 5\%$ ),
- dozvoljene harmonijske distorzije napona,  $THDu \leq 3-8\%$  (viša vrednost u mreže nižih nominalnih napona), i
- dozvoljene nesimetrije napona, koja treba da je manja od 2% (ili najviše 3%).

Naime, gubici snage i reaktivna opterećenja se dodatno povećavaju zbog nesimetrije napona i (ili) prisustva viših harmonika u naponu napajanja.

### 5.1. Uticaj viših harmonika u naponu napajanja na rad motora

Prisustvo viših harmonika u naponu napajanja, danas je sve češće zbog povećanja broja potrošača koji se napajaju preko ispravljača i invertora: regulisani pogoni, elektrotermički potrošači i slično. Kada su u naponu napajanja prisutni harmonici reda  $h=5,7,11,13,17,19, 23$  i  $25$ , amplitude  $U_h=5\%$  (tj. kada je harmonijske distorzija napona  $THDu=14\%$ ):

- dodatni gubici snage iznose  $\Sigma P_{Cu,h}=5\% P_{Cu,n}$ , kod motora srednje i veće snage, a

- dodatni gubici su manji za 3-4 puta, kada su u pitanju motori manjih snaga ( $\leq 10$  kW),

pa je uticaj viših harmonika relativno mali na efikasno korišćenje električne energije. Zato je dozvoljeno da najviša harmonijska distorzija bude  $THDu \leq 5-8\%$  (viša u mrežama nižih napona), kako se to ograničava u većini odgovarajućih propisa.

Kada se motor napaja sa naponom (teorijski) pravougaonog oblika (iz pretvarača frekvencije), tj. kada su harmonici reda  $h=5,7,11,13,17,19, 23$  i  $25$ , amplitude  $U_h=100/h\%$ , a harmonijske distorzija napona  $THDu \approx 30\%$ , pa je:

- povećanje gubitaka snage iznosi od  $10-30\% P_{Cu,n}$ , kod motora srednje i veće snage, i ne zavisi od nivoa opterećenja motora, a

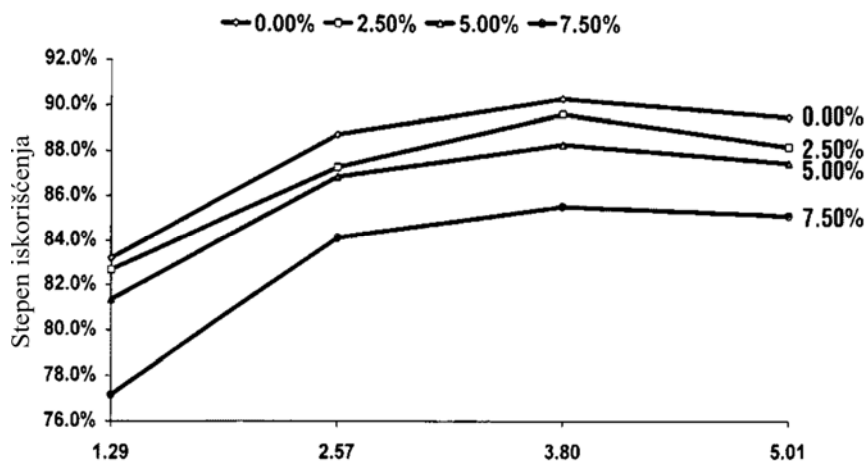
- povećanje gubitaka iznosi samo  $2-5\% P_{Cu,n}$ , kada su u pitanju motori manjih snaga ( $\leq 10$  kW), jer su povećanja vrednosti rezistanci zanemarljiva, tj.  $R_{sh} \approx R_s R_m \approx R_r$ , pošto je skin efekat neznatan.

Na osnovu toga se zaključuje da uticaj viših harmonika napona, na smanjenje stepena iskorišćenja motora sa frekventnom regulacijom brzine, nije veliki.

### 5.2. Uticaj nesimetrija napona na stepen iskorišćenja motora

Nesimetrija napona se može javiti zbog prisustva većih monofaznih potrošača ili nesimetrične kondenzatorske baterije sa oštećenim ili isključenim kondenzatorima zbog pregorevanja osigurača samo jedne faze. Sa povećanjem koeficijenta (procenta) nesimetrije napona ( $K_{NS} = 100U_{1,NS}/U_N$ ), stepen iskorišćenja motora se smanjuje pri svim nivoima opterećenja. Iako, po definiciji, koeficijent nesimetrije ( $K_{NS}\%$ ) predstavlja odnos napona inverznog sistema ( $U_{NS}$ ) i napona direktnog sistema ( $U_{DS}$ ), zbog pojednostavljenja, Standard NEMA MG1 (u SAD) propisuje da se koeficijent nesimetrije određuje tako što se prvo odredi srednja aritmetička vrednost linijskih napona (npr. za izmerene napone od 396V, 399V i 405V, srednja vrednost je 400V) a potom najveće odstupanje napona od srednje vrednosti ( $405V-400V=5V$ ), i na kraju koeficijent (procenat) nesimetrije napona kao količnik najvećeg odstupanje i srednje vrednosti, tj.  $K_{NS}\%=100(5/400)=1,25\%$ . Na sl.2 [10] su date

zavisnosti stepena iskorišćenja motora, redom, za nesimetrije napona od 0,00%, 2,50%, 5,00% i 7,50%.



Sl.2: Zavisnosti stepena iskorišćenja pri opterećenjima od  $0,25P_n$ - $P_n$ , pri nesimetriji napona od: 0,00%, 2,50%, 5,00% i 7,50%

Nesimetrija napona od 2%, izaziva povećanje gubitaka od 8-10% u motorima snaga  $\geq 150$  kW. Gubici snage u motoru se povećavaju sa kvadratom procenta nesimetrije napona. Kada su u pitanju motori snaga  $\leq 100$  kW, gubici zbog nesimetrije su upola manji. Na osnovu toga se zaključuje da je opravdano da dozvoljena nesimetrija bude  $\leq 2\%$ , kako je to u većini nacionalnih i međunarodnih standarda, pogotovu što struja u jednoj fazi može biti veća do 33%, i pri toj nesimetriji [11]. Ipak, kada su u pitanju motori snaga  $\leq 100$  kW, dozvoljena nesimetrija bi mogla biti do 3%.

Nesimetrija napona izaziva dodatno zagrevanje motora, kao i pojavu inverznog momenata koji dovodi do smanjenja polaznog i maksimalnog momenta motora, kao i do manjeg povećanje klizanja motora u radu. Kako se sa rastom nesimetrije napona povećavaju gubici snage i zagrevanje motora, to se dozvoljeno opterećenje motora smanjuje, i to tim više što je procenat nesimetrije veći. Tako pri nesimetriji napona od 2%, 3%, 4% i 5%, vrednosti koeficijenta dozvoljenog opterećenja ("derating factor"), redom, 0,95, 0,93, 0,87 i 0,81. Kada su u pitanju vrednosti koeficijenta nesimetrije napona  $U_{1,NS}/U_n > 5\%$ , one mogu izazvati znatnije pregrevanje rotora, čak i kada ukupni gubici snage u motoru ne prelaze nominalni iznos, pa se zato ne dozvoljava rad motora pri nesimetriji napona koja prelazi 5 %.

Potrošnja električne energije se nepotrebno uvećava zbog smanjenja stepena iskorišćenja motora, **pa održavanje niske nesimetrije napona ( $\leq 2\%$ ) predstavlja meru za efikasno korišćenje električne energije.** Iz navedenih razloga, uticaj nesimetrije napona (inverznih napona) je detaljnije razmotren u [8, 11] "gde se izlažu postupci za proračune i analizu

inverznih struja i odgovarajućih gubitaka snage, inverznih momenata motora, kao i procena vrednosti inverznih napona koji se mogu javiti u distributivnim mrežama i mrežama potrošača.

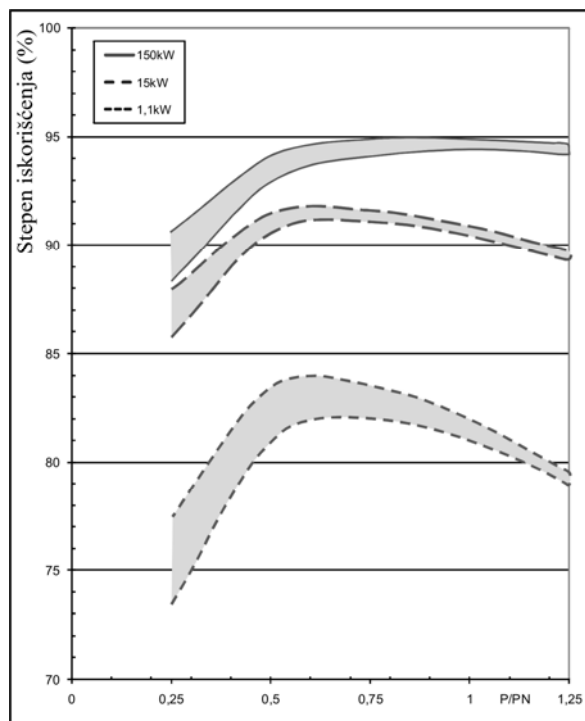
## **6. Smanjenje potrošnje električne energije podešavanjem vrednosti napona**

Iako je poznato da odstupanje napona izvan granica  $U_N \pm 5\%$  može dovesti do smetnji u radu motora, malo je poznato da se podešavanjem vrednosti, unutar granica  $U_N \pm 5\%$ , može uticati na smanjenje gubitaka snage i reaktivnih opterećenja delimično opterećenih (podopterećenih) motora.

### **6.1. Uticaj opterećenja na energetske karakteristike motora**

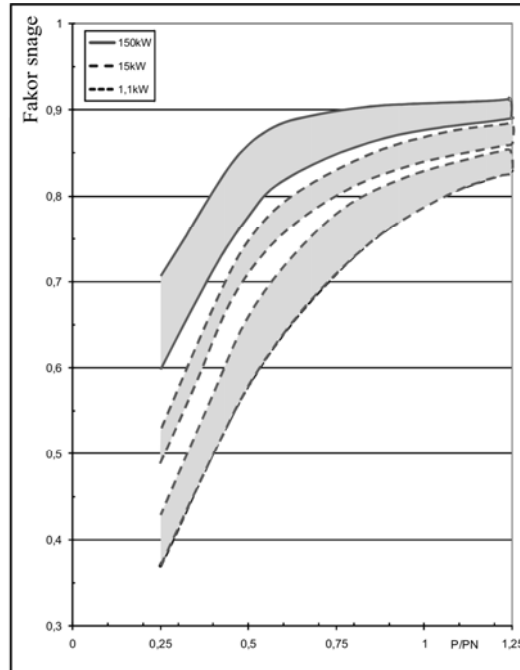
Kako u realnim uslovima asinhroni motori rade pri nižim vrednostima opterećenja, to je interesantno razmotriti zavisnosti stepena iskorišćenja i faktora snage od opterećenja. Na sl.3 su prikazane tipične zavisnosti stepena iskorišćenja od opterećenja za dvopolne ( $2p=2$ ) i četvoropolne ( $2p=4$ ) asinhronne motore snaga 1,1kW, 11kW i 150kW, koji reprezentuju niskonaponske motore [12]. Te zavisnosti pokazuju da se vrednosti stepena iskorišćenja smanjuju ukoliko motori rade pri nižim opterećenjima. Ta smanjenja su veća što su motori manjih nominalnih snaga.





Sl.3: Zavisnosti stepena iskorišćenja snage od relativne vrednosti opterećenja ( $P/P_N$ ), za dvopolne i četveropolne motore snaga 1,1kW, 11kW i 150kW [9]

Na sl.4 su prikazane tipične zavisnost faktora snage ( $\cos \varphi$ ) za dvopolne ( $2p=2$ ) i četveropolne ( $2p=4$ ) asinhronne motore snaga 1,1kW, 11kW i 150kW [13]. Te zavisnosti pokazuju da se vrednosti faktora snage značajnije smanjuju ukoliko motori rade pri nižim opterećenjima. Ta smanjenja su veća što su motori manjih nominalnih snaga. Sa smanjenjem vrednosti faktora snage rastu troškovi za reaktivnu energiju, i porast tih troškova je, po pravilu, veći od povećanja troškova zbog smanjenja vrednosti stepena iskorišćenja pri nižim opterećenjima [8,13].

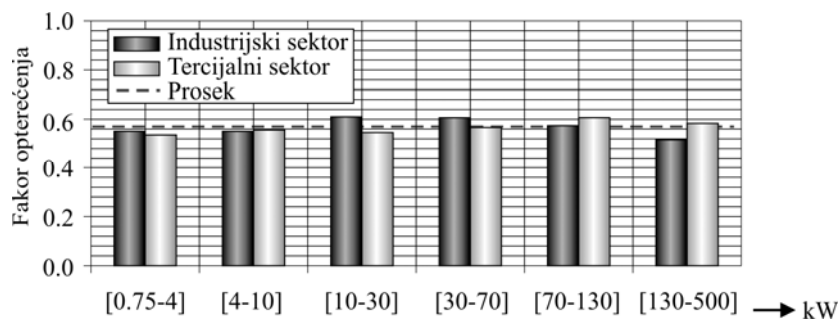


Sl. 4: Zavisnosti faktora snage ( $\cos \varphi$ ) od relativne vrednosti opterećenja ( $P/P_N$ ), za dvopolne i četvoropolne motore snaga 1,1kW, 11kW i 150kW [9]

## 6.2. Prosečna opterećenja asinhronih motora u pogonu

Detaljnija istraživanja pokazuju da:

- Oko 40 % motora u SAD radi sa opterećenjima  $P/P_n < 40\%$  [4],
- Srednja vrednost faktora opterećenja motora u EU[1]:  $F_L = P_1/P_N = 0,55-0,60 > p = P/P_N = F_L / \eta_L$ , sl.5.



Sl. 5. Faktor opterećenja ( $F_L$ ) motora datih snaga, u industriji i tercijarnom sektoru

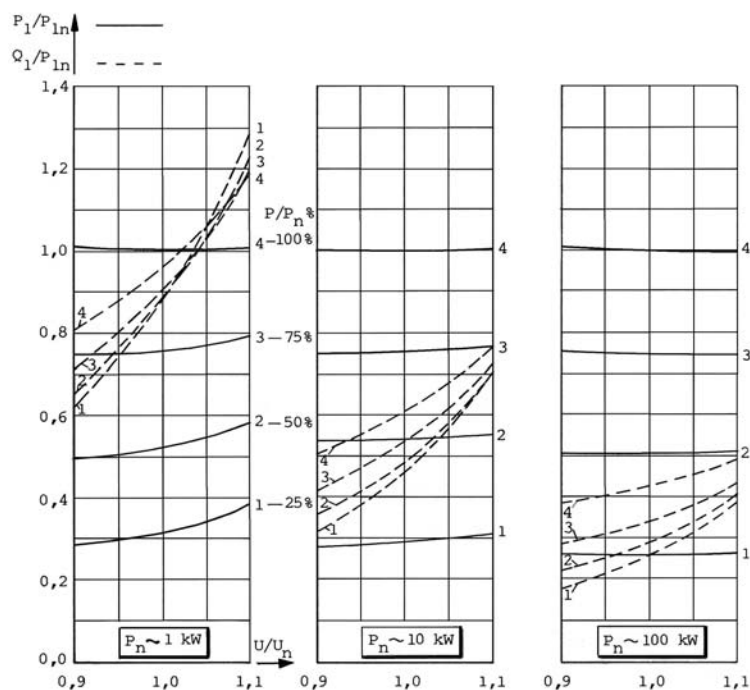
Naša istraživanja pokazuju da su srednje vrednosti opterećenja  $p=P/P_N=35-55\%$ , za motore od 1-100 kW [5, 6], i time se poklapaju sa podacima sa sl. 1.21. Autor je razvio postupak [7, 8] za određivanje relativnih opterećenja motora po korisnoj snazi,  $p=P/P_n$ , na osnovu izmerene struje opterećenja i kataloških podataka motora.

### **6.3. Uticaj vrednosti napona na gubitke snage i reaktivna opterećenja asinhronih motora u pogonu**

Uticaj (promena) vrednosti napona u konzumu sa motorima na opterećenja i potrošnju električne energije je veliki i različit. Za razliku od drugih potrošača, npr. termičkih, taj uticaj je različit u zavisnosti od strukture motora po vrsti, veličini i stepenu opterećenosti ( $p=P/P_n$ ). Podaci koji se daju u klasičnoj literaturi [14] su identični sa onima u starijoj literaturi [15], pa su samim tim i nedovoljno tačni za motore proizvedene u zadnjih 30 godina, a koji čine preko 90% svih motora u eksploataciji. Uz to su ovi podaci dati samo za opterećenja od 75% i 100%. Za opterećenja ispod 50% podaci se ne navode, iako su prosečna opterećenja, bar polovine motora, niža od 50%.

Već je, u dosadašnjim istraživanjima i proverama u praksi [16, 17], pokazano da je uticaj promena vrednosti napona na energetske karakteristike standardnih asinhronih motora (AM) novije konstrukcije (proizvedenih posle 1960. godine) znatno veći. Uz to je utvrđeno da se te promene kreću u širokim granicama, u zavisnosti od veličine motora - veća su kada su u pitanju motori manjih snaga. Osnovni razlog što je uticaj vrednosti napona na opterećenja i potrošnju energije u motorima veći, u odnosu na podatke iz klasične literature [14, 15] leži u činjenici da su promene struje praznog hoda i gubitaka u gvožđu veće kod savremenih motora ("U" ili "T" oblik krive magnećenja), u odnosu na starije motore koji se razmatraju u literaturi.

U novijoj literaturi postoje radovi koji pokazuju da je uticaj napona na iznose stepena iskorišćenja ( $\eta$ ) i faktora snage ( $\cos\varphi$ ) motora veći od onoga što se navodi u standardnim priručnicima. U novijim radovima [16, 18] se analizira uticaj napona na pojedine motore, i dobijeni podaci se približno poklapaju sa našim rezultatima [5, 6], uz nedostatak da ovi prvi obuhvataju samo deo motora i režima opterećenja koji su susreću u praksi. Takve analize su bile predmet višegodišnjih istraživanja autora ovog rada, a dobijeni rezultati su dati u [5, 6, 8]. Na sl.6 su date zavisnosti aktivnih ( $P_1/P_n$ ) i reaktivnih ( $Q_1/P_n$ ) opterećenja od relativnih vrednosti napona ( $U/U_n$ ), motora nominalnih snaga 1kW, 10 kW i 100 kW pri opterećenjima  $P/P_n=25\%, 50\%, 75\%$  i 100%, redom krive 1, 2, 3 i 4. Navedene zavisnosti pokazuju da je uticaj napona, na vrednosti reaktivnih opterećenja i gubitaka snage a time i aktivnih opterećenja, veći što su motori manjih snaga i što su relativna opterećenja motora ( $P_1/P_n$ ) niža.



Sl. 6. Zavisnosti aktivnih ( $P_1/P_n$ ) i reaktivnih ( $Q_1/P_n$ ) opterećenja od relativnih vrednosti napona ( $U/U_n$ ), motora nominalnih snaga 1kW, 10kW i 100kW, pri opterećenjima  $P/P_n=25\%$ ,  $50\%$ ,  $75\%$  i  $100\%$ , redom krive 1,2,3 i 4.

#### 6.4. Smanjenje gubitaka snage i reaktivnih opterećenja podešavanjem vrednosti napona u mreži

Kada su u pitanju neregulirani pogoni, primenom mere *podešavanje vrednosti napona u mreži potrošača, u granicama  $\pm 5\%$* , u cilju smanjenja gubitaka aktivne snage i potrošnje reaktivne energije u motorima i napojnim vodovima [5, 6, 8], ostvarene su značajne uštede u smanjenju potrošnje električne energije u pogonima sa motorima.

Sa smanjenjem napona, samo do 5 %, smanjuju se: gubici snage u gvožđu motora ( $P_{fe}$ ), struja magnećenja ( $I_m=I_0$ ) i gubici praznog hoda u namotaju statora ( $P_{Cu0}=R_s I_0^2$ ), a povećava se komponenta struje opterećenja ( $I_{1P}$ ) i komponenta gubitaka opterećenja ( $P_{VP}$ ). Ukupni gubici snage ( $P_V= P_{fe} + P_{Cu0}+ P_{VP}$ ) se smanjuju već pri opterećenjima motora  $\leq 70-80\%$ . Zbog smanjenja struja magnećenja, pri svim opterećenjima motora, dolazi do smanjenja vrednosti reaktivnih opterećenja ( $Q$ ) za 5-15%, što vodi smanjenju potrošnje reaktivne energije, kao i gubitaka snage u vodovima mreža i namotajima transformatora. Tako se podešavanjem pogodnih

vrednosti napona, u granicama  $\pm 5\%$ , mogu ostvariti značajne uštede u potrošnji aktivne energije:

- 0,5-2%, kada su u pitanju niskonaponski motori snaga od 1-300 kW, i
- 0,2-1%, kod visokonaponskih motora ( $\geq 6$  kV) snaga od 300-10000 kW,

ali i u potrošnji reaktivne energije:

- 12-20%, kada su u pitanju niskonaponski motori snaga od 1 – 300 kW, i
  - 5-14%, kod visokonaponskih motora ( $\geq 6$  kV) snaga od 300-10000 kW,
- i veće su od vrednosti koje se obično navode u starijoj literaturi [14,15].

### 6.5. Primeri sa podacima o uštedama ostvarenim podešavanjem vrednosti napona u mreži

U prvoj fazi (od 1986-1995) navedeni postupak je primenjen u nekoliko industrijskih preduzeća, tako što su vrednosti napona podešene (smanjene za 2.5% ili 5%) na sekundarnim sabirnicama transformatora 10/0,4 kV sa kojih su se napajali motori sa prosečnim opterećenjima od 30-50 %. Najveće uštede su ostvarene kod nekoliko većih potrošača (PRVI PARTIZAN-Užice, IKL Beograd, GRMEČ Beograd, Rudnik „REMBAS” Resavica). Procenjuje se da su time ostvareni energetske efekti po osnovu smanjenja potrošnje aktivne i reaktivne energije u vrednosti od oko 200 000 Eura/god.

Ipak, najveće uštede, po apsolutnim iznosima, ostvarene su u smanjenju sopstvene potrošnje električne energije termoelektrana Elektroprivrede Srbije (tabela 1), u periodu od 2003-2007, koje donose efekte oko 500 000 Eura/god. U pitanju je bio izbor i podešavanje vrednosti napona u mreži 6 kV sa motorima velikih snaga (300-6000 kW), [19-21].

**Tabela 1.** Smanjenje sopstvene potrošnje električne energije termoelektrana EPS-a

TERMoeLEKRANE:	Smanjenje snage		Smanjenje potrošnje energije	
	Aktivne $\Delta P$ (kW)	Reaktivne $\Delta Q$ (kvar)	Aktivne (kWh/god)	Reaktivne (kvarh/god)
1. NIKOLA TESLA "A"	460	4657	2 760 000	27 942 000
2. NIKOLA TESLA "B"	268	4559	1 608 000	27 354 000
3. KOLUBARA	110	2037	660 000	12 222 000
4. MORAVA	47	261	282 000	1 566 000
5. KOSTOLAC "B "	205	1074	1 230 000	6 444 000
5. KOSTOLAC "A "	102	1886	612 000	11 316 000
UKUPNO:	1 192	14 474	6 540 000	86 844 000

Iako je procenat ušteda manji, kada su u pitanju motori velikih snaga (300-6000 kW) koji rade na naponu 6 kV ili 10 kV, potencijali za uštedu u potrošnji električne energije su značajni, pogotovu kada su u pitanju višepolni motori sa sinhronim brzinom  $n_s \leq 1000$  ob/min. Naime kroz rad na izradi i realizaciji projekata za uštedu električne energije *podešavanjem vrednosti napona u mreži potrošača, u granicama  $\pm 5\%$* , u mrežama sopstvene potrošnje elektrana, registrovane su brojne povoljnosti za primenu ove mere, i to:

- ukupne instalisane snage motori su velike (od 10-100 MW), i učestvuju u strukturi potrošnje sa preko 95 %;
- velika zastupljenost sporohodnih motora ( $n_s \leq 1000$  ob/min) sa većim procentom gubitaka u gvožđu;
- prosečna opterećenja motora sopstvene potrošnje elektrana iznose oko 60%; i

pri nominalnom naponu na početku mreže ( $1,05U_n$ ), napon na motorima je uglavnom povišen ( $1,04U_n$ ).

#### 6.6. Podešavanje vrednosti napona na namotajima motora i uštede energije

Kada su u pitanju neregulisani pogoni, pored postupka podešavanje vrednosti napona u mreži potrošača, uštede u potrošnji električne energije se mogu ostvariti promenom napona na faznim namotajima- promenom sprege motora, tj:

- Prebacivanje manje opterećenih motora ( $\leq 30-40$  %) iz sprege trougao ( $\Delta$ ) u spregu zvezda (Y) [22];
- Premotavanje (izrada) namotaja motora za spregu dvostruka zvezda/trougao (YY/ $\Delta$ ), u cilju povećanje stepena iskorišćenja i faktora snage motora u sprezi  $\Delta$ , pri opterećenjima ( $\leq 60-80$  %), [22, 23].

Činjenica da je, pri opterećenjima koja su ispod 35-40 % nominalnog, **povoljnije da motor radi u sprezi zvezda (Y), tj. sa sniženim naponom na faznom namotaju,  $U_f=0.577U_n$**  umesto u sprezi trougao ( $\Delta$ ), tj. sa  $U_f=U_n$ ), pošto se tada smanjuju gubici snage u motoru i reaktivna opterećenja. Smanjenja reaktivnih opterećenja su najveća u režimu praznog hoda, i jednaka su smanjenju reaktivne snage praznog hoda, tj.  $\Delta Q_{1,\Delta-Y} = \Delta Q_{0,\Delta-Y} = Q_{0,\Delta} - Q_{0,Y}$ , dok su samo malo manja u režimu sa relativnim opterećenjima  $p=P/P_n \leq 0,3-0,4$ . Često su efekti ušteda zbog smanjenja reaktivne snage veći nego efekti zbog smanjenja gubitaka snage  $\Delta P_{\gamma\Delta-Y}$ .

## 7. Zaključak

U ovom radu se razmatra nekoliko najvažnijih mera za unapređenje energetske efikasnosti motora, tj. uvođenje programa "Energetski menadžment motora" koji uključuje:

- a) Korišćenje energetski efikasnih motora, motora energetske klase IE1, IE2 i IE3;
- b) Dimenzionisanje motora na osnovu procene opterećenja (i stepena iskorišćenja) sličnih motora u radu;
- c) Sprovođenje kvalitetnog održavanja, uz pravilnu eksploataciju pogona;
- d) Poboljšanje kvaliteta električne energije u mreži potrošača, tj. eliminisanje (ili smanjenje): nesimetrije napona i viših harmonika, kao i
- e) Podešavanje vrednosti napona u granicama  $U_N \pm 5\%$ , u cilju smanjenje gubitaka snage i reaktivnih opterećenja delimično opterećenih motora.

Jedan od najvažnijih faktora za uštede energije je upotreba energetski efikasnih motora. Korišćenjem elektromotora sa povećanim vrednostima stepena iskorišćenja mogu se postići uštede od 5-6%. IEC je razvio Standard za klasifikaciju motora po nivoima vrednosti stepena iskorišćenja, IEC 60034-30, sa ciljem da se, na globalnom nivou, ujednači klasifikacija motora snaga od 0,75 kW i 375 kW. Definisane su četiri energetske klase motora: IE1, E2, E3 i E4.

- Prema Direktivi 2005/32/EC primena motora navedenih energetskih klasa biće uskoro obavezna, u zemljama Evropske Unije, a sve više postaje obaveza i u drugim regionima sveta.

## Literatura

- [1] Aníbal, T. de Almeida Fernando J. T. E. Ferreira, João Fong, Paula Fonseca, *EUP Lot 11 Motors, Final Report, ISR-University of Coimbra*, December 2007.
- [2] Standard IEC 60034-30, 2010: Rotating electrical machines - Part 30: Efficiency classes of single speed three-phase cage induction motors.
- [3] *Direktiva 2005/32/EC, Commission of the European Communities with regard to ecodesign requirements for electric motors and their variable speed drives, Brussels 2005.*
- [4] *Improving Motor and Drive System Performance: A Sourcebook for Industry* was developed for the U.S. Department of Energy's (DOE) Industrial Technologies Program (ITP).
- [5] M. M. Kostić, "Uticao napona u mreži na opterećenja i potrošnju električne energije", knjiga - Monografija autora, Institut "Nikola Tesla", 1997, str. 176.

- [6] M. Kostić, "Smanjenje opterećenja i potrošnje energije podešavanjem vrednosti napona motora", *"Elektroprivreda"*, No. 3, 1998.g. str. 65-78.
- [7] M.Kostić, "Evaluation methods for load and efficiency of induction motor in the exploitation", 11<sup>th</sup> *International Symposium Ee 2001*, Novi Sad, Yugoslavia, pp.332-336.
- [8] Miloje M. Kostić, "Povećanje energetske efikasnosti elektromotora u pogonima", *"Elektrotehnički institute Nikola Tesla Beograd"*, 2010, str.325.
- [9] Conrad U. BrunnerA, Sustainable Energy Zurich Switzerland SEEEM, *International harmonization of motor standards saves energy, ACEP Workshop Beijing 3 December 2007 (revised July 2008)*.
- [10] A.H.Bonnett, An overview of how AC Induction motors performance has been affected by the October 24,1997 Implementation of the Energy policy act of 1992, *IEEE Transaction on Ind. Application*, Vol.36, No 1, 2000, pp. 242-256.
- [11] M. Kostić, A.Nikolić, "Negative Consequence of Motor Voltage Asymmetry and Its Influence to the Unefficient Energy Usage", *WSEAS TRANSACTION ON CIRCUITS AND SYSTEMS*, Issue 8, Volume 9, August 2010, pp. 547-556.
- [12] Standard IEC 6034-31 2010: Guide for selection and application of energy-efficient motors including variable-speed applications.
- [13] Miloje Kostić, "Efficiency classes induction motors and evaluation of efficiency economics", *International journal "Electronics", published by University of Banja Luka (Bosnia & Herzegovina)*, Volume 11, No 1-2, 2008, pp.25-30.
- [14] *Standard Handbook for Electrical Engineers, 11th Edition McGraw-Hill Book Company, 1983, New York, pp. 246.*
- [15] *Industrial Power Systems Handbook, McGraw-Hill Book Company, 1955, New York, Toronto, London, pp. 97.*
- [16] D.F. Bins, "Comparative Costs of Energy Losses Induction Motors", *IEE Proceedings*, Vol. 134, Pt. B. No.4, July 1987, pp 177-182.
- [17] J. L. Linders, "Effects of Power Supply Variations on AC Motors Characteristics", *IEE Trans. Ind. Applic.*, vol. IA-B, 1972, pp. 383-400.
- [18] P. S. Hamer, D. M. Love, S. E. Wallace, "Energy Efficient Induction Motors Performance Characteristic and Life-Cycle Cost Comparison for Centrifugal Loads", *IEE Trans. Ind. Applic.* No. 5, 1997, pp. 1312-1320.
- [19] M.M.Kostic I.A.Stanisavljevic, M.Stojković, Lj. Mihailović, "Smanjenje sopstvene potrošnje električne energije u Termoelektrani "Nikola Tesla" A", *"Elektroprivreda"*, No 4, 2008, str.63-74.



- [20] Racionalizacija potrošnje električne energije u Rudniku "Rembas" - Resavica, *Studija, projekat i realizacija, Institut "Nikola Tesla"*, Beograd, 1995. god, Rukovodilac M. Kostić.
- [21] Racionalizacija sopstvene potrošnje električne energije u TE "Kolubara", *Institut "Nikola Tesla", Studija, projekat i realizacija, 2005. godine* (Autor i Rukovodilac projekta Miloje Kostić).

**Abstract.** Motor energy management includes adequate sizing, control and improvement of electric energy quality, i.e. voltage quality (reducing voltage unbalance and harmonics distortion), and the proper maintenance. The specific motor price per kW is approximately constant for motors rated from 5 kW to 20 kW. By adequate sizing, or by proper replacement of the old motor with the new one, with rated output power reduced by 20% to 50% the smaller motor will be also cheaper by 20% to 50%. When the 22 kW motor is replaced with the new 15 kW that costs 64% of the price of a new 22 kW motor, the efficiency is increased by 3.6% (Example in paper). On the basis of our investigation results, it is confirmed that there are significant possibilities for energy savings by setting voltage values within the  $\pm 5\%$  voltage band ( $U_n \pm 5\%$ ), since more than 80% induction motors are under loaded ( $\leq 70\%$ ), especially small and medium rated power (1-30 kW) motors.

**Keywords:** Motor energy management, energy savings, adequate sizing, voltage unbalance, harmonics distortion, setting voltage values.

## **Adequate Sizing and Motor Exploitation (Motor energy management)**

Rad primljen u uredništvo 19.09.2011. godine  
Rad prihvaćen 30.09.2011. godine