

RACIONALIZACIJA SOPSTVENE POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE U TERMOELEKTRANI "MORAVA"

Ivan Stanisavljević, Vladimir Sovrlić, Miloje Kostić

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

Sadržaj: U radu je izložena metodologija za utvrđivanje zavisnosti opterećenja i gubitaka snage od vrednosti napona motor, kao i proračun opterećenja motora na osnovu izmerenih struja motora. Prikazani su i realizovani rezultati uštede električne energije sopstvene potrošnje u termoelektrani Morava. Izborom i podešavanjem (regulacijom) optimalnih vrednosti napona u mreži sopstvene potrošnje, moguće je smanjiti gubitke snage u motorima i reaktivna opterećenja, i time smanjiti sopstvenu potrošnju aktivne i reaktivne energije. Takođe, izvedeni su posebni zaključci o smanjenju broja mlinova u radu što će zavisiti od nivoa opterećenja generatora u TE Morava. Posebno je važno naglasiti da se navedene uštede realizuju, praktično, bez ikakvih ulaganja.

Ključne reči: racionalizacija, sopstvena potrošnje TE, reaktivna opterećenja motora, optimalni napon, ušteda električne energije

1. UVOD

Sopstvena potrošnja električne energije uobičajeno iznosi do 10% od ukupno proizvedene električne energije u odgovarajućoj termoelektrani. U TE Morava, pri uobičajenom radu agregata od oko 100 MW, opterećenje sopstvene potrošnje iznosi oko 8 MW. Oko 95% potrošnje otpada na elektromotorni pogon sa asinhronim motorima (AM), a pri tome između 88-90% otpada na visokonaponske motore napona 6.0 kV.

U ovoj analizi se polazi od strukture potrošača i režima i opterećenja, kao i podataka o potrošnji električne energije i strukturi te potrošnje (aktivne i reaktivne energije kao i maksimalnih opterećenja po snazi). Dalje se određuju karakteristike opterećenja celokupne sopstvene potrošnje i pojedinih delova iste i utvrđuju odgovarajući energetske bilansi potrošnje i gubitaka energije.

Na osnovu analiza: režima opterećenja, gubitaka snage i energetske bilansa konzuma i sastavnih delova (opterećenja po transformatorima iz kojih se napaja sopstvena potrošnja, tehnoloških podsistema i većih potrošača - motora), vrši se izbor mera koje treba da dovedu do racionalnijeg korišćenja električne energije. Potom se prelazi na energetske analize i izbor mera za racionalizaciju i izradu projekata na osnovu kojih se te mere realizuju. Optimalne vrednosti napona se utvrđuju na osnovu odgovarajućih proračuna i analiza na bazi kataloških podataka motora i eksperimentalnih proverama istih pri stvarnim režimima opterećenja tih potrošača.

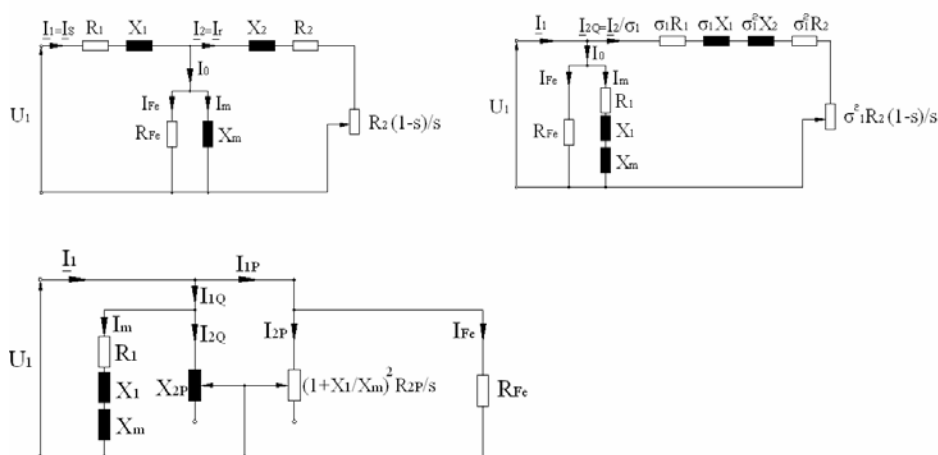
2. METODE ZA UTVRĐIVANJE ZAVISNOSTI OPTEREĆENJA I GUBITAKA SNAGE OD VREDNOSTI NAPONA MOTORA

Za razliku od većine drugih potrošača, opterećenja asinhronih motora najčešće odstupaju od nominalnih i promenljiva su u vremenu. Takođe je pokazano da (manje ili veće) promene napona, u odnosu na nominalnu vrednost, mogu dovesti do smanjenja gubitaka snage i reaktivnih opterećenja a time i potrošnje aktivne i reaktivne energije, kod motora sa opterećenjima ispod nominalnih. Kako većina motora radi sa opterećenjima od 30-70 %, to bi se ovi efekti mogli dobiti promenom vrednosti napona, bilo da se izabere i podesi vrednost napona napajanja u mreži potrošača, u raspoloživim granicama $\pm 5\%$, ili da se promenom sprege namotaja statora pojedinih motora promeni napon na faznim namotajima.

2.1. Energetske karakteristike asinhronih motora

Vrednosti faktora snage karakterišu relativne vrednosti reaktivnih opterećenja, dok nivo stepena iskorišćenja zavisi od relativnih iznosa gubitaka snage u motoru. Obično su daju nominalne vrednosti faktora snage ($\cos\phi$) i stepena iskorišćenja (η) u nominalnom režimu, na osnovu kojih se određuju nominalne vrednosti ukupnih reaktivnih opterećenja (Q_{1n}) i nominalnih gubitaka snage ($\Sigma P\gamma_n$). Za detaljnije proračune gubitaka snage i reaktivnih opterećenja potrebno je poznavati i vrednosti pojedinih komponenti nominalnih gubitaka snage i reaktivnih opterećenja, kao i metode za određivanjem istih.

Najveći relativni uticaj promene napona je na vrednosti promene ukupnih struja motora. Taj uticaj je složen i zavisi i od vrste veličine motora, kao i od njegovog relativnog opterećenja. Na osnovu ekvivalentnih šema na Sl. 1 proračuni promene aktivne i reaktivne struje motora, pri promeni opterećenja ili napona, su eksplicitniji.



Sl. 1: Ekvivalentne šeme asinhronog motora

2.2. Određivanje potrebnih kataloških podataka

U praksi često nisu dostupni svi potrebni podaci za energetske proračune motora. Uglavnom se dešava da za neke motore ne postoji ispitna lista i ogled praznog hoda odakle bi se očitale vrednosti o struji (I_{0n}) i snazi praznog hoda (P_{0n}). Ako se motor ne

može rasteretiti i izvršiti ogled, struju praznog hoda se može proračunati na osnovu vrednosti nominalne struje (I_{1n}), faktora snage ($\cos\varphi_n$) i odnosa maksimalnog i nominalnog momenta (M_n/M_{max}), pa je ([11]):

$$I_{0n}=I_{1n} \sin\varphi_n-0.5\cdot(M_n/M_{max})\cdot I_{1n}\cdot\cos\varphi_n \quad (1)$$

Kod motora snage do 1 kW, struja praznog hoda približno iznosi([5])

$$I_{0n}\approx I_{1n}\cdot\sin\varphi_n \quad (2)$$

Gubici snage praznog hoda (P_{0n}) se utvrđuju tako što se mere u praznom hodu pri nominalnom naponu, ili pri datom naponu u pogonu $P_0(u)$. Ukoliko se motor ne može rasteretiti, onda se vrednost gubitaka praznog hoda pri radnoj vrednosti napona $P_0(u)$ približno procenjuje na osnovu poznate vrednosti snage praznog hoda za nominalnu vrednost napona (P_{0n}). Ako se ne raspolaže ni sa nominalnim vrednostima gubitaka praznog hoda (P_{0n}), onda se oni procenjuju i, za motore sa $\eta=\eta_n$, približno iznose:

$$P_{0n}=0.5\Sigma P_{\gamma n} \quad (3)$$

dok se za motore, za koje je $\eta = \eta_{max}$ pri $P/P_n < 1$, određuju po izrazu (6):

$$P_{0n} = \Sigma P_{\gamma n} / (1 + (P_n / P_{\eta_{max}})^2) \quad (4)$$

Na osnovu izraza (4), za motore sa η_{max} pri $P=0.7P_n$, utvrđuje se da gubici praznog hoda iznose:

$$P_{0n}\approx(1/3)\Sigma P_{\gamma n} \quad (5)$$

Jedan od načina za dobijanja snage praznog hoda je izračunavanjem razlike ukupnih gubitaka snage u motoru ($P_{\gamma n}$) i gubitaka snage usled nominalnog opterećenja ($P_{\gamma P_n}$):

$$P_{0n} = P_{\gamma n} - P_{\gamma P_n} \quad (6)$$

2.3. Proračun opterećenja motora na osnovu izmerenih opterećenja po struji

Za određivanje vrednosti (komponenti) gubitaka opterećenja potrebno je raspolagati sa vrednostima opterećenja motora. Određivanje opterećenja motora po aktivnoj snazi, u apsolutnim (P) ili relativnim jedinicama (P/P_n), na osnovu izmerenih opterećenja po struji $I_1(u)$, se vrši po postupku opisanom u [6]. Naime, za motore u pogonu uobičajeno nije moguće meriti opterećenja po snazi (P, Q), pogotovu kod motora napona 6-20 kV. U tom slučaju se (približna) vrednost relativnog opterećenje motora ($p=P/P_n$) određuje na osnovu izmerenih vrednosti struje motora u radu (I_1), po izrazu:

$$P / P_n = \sqrt{(I_1^2 - I_{0n}^2) / (I_{1n}^2 - I_{0n}^2)}, p=P/P_n \leq 0.70 \quad (7)$$

Ukoliko je vrednost struje motora u radnom režimu (I_1) izmerena pri vrednosti napona $U \neq U_n$ onda je i odgovarajuća komponenta struje praznog hoda ($I_0 \neq I_{0,n}$). Tada se približna vrednost (prva aproksimacija) relativnog opterećenja motora $p_{(1)} = (P/P_n)_{(1)}$, umesto po izrazu (7), određuje po izrazu:

$$p_{(1)} = (P/P_n)_{(1)} = (U/U_n) \sqrt{(I_1^2 - I_0^2)/(I_{1n}^2 - I_{0n}^2)} \quad (8)$$

Ukoliko se motor ne može rasteretiti i izmeriti odgovarajuća struja praznog hoda $I_0 = I_0(u) \neq I_{0n}$ onda se ona izračuna na osnovu podatka o nominalnoj vrednosti struje praznog hoda (I_{0n}), koja je ili dobijena kao kataloški podatak ili izračunata prema izrazima (1) i (2). Drugim rečima, nalazi se funkcija struje praznog hoda u zavisnosti od promene napona po formuli:

$$I_0(u_i) = [1 + (\Delta i_0 / \Delta u_0) \cdot (u_i - 1)] \cdot I_{0n} \quad (9)$$

gde je $u_i = U_i/U_n$ - relativna vrednost napona. Koefficienat promene struje praznog hoda ($\Delta i_0/\Delta u$)= $f(U_i-U_n)$, u intervalu posmatranih promena napona (U_n-U_i) se utvrđuje iz karakteristike praznog hoda motora $I_0=f(U_0)$. Njegove vrednosti se kreću u granicama od 1.5 do 3, u zavisnosti od zasićenja magnetnog kola motora i odstupanja napona. Način određivanja ovih koefficienata prikazan je u sledećem poglavlju.

Kada je potrebno da se relativno opterećenje motora utvrdi sa greškom $\leq 2\%$, onda se izračunata vrednost izraza, (7) ili (8), uzima za prvu aproksimaciju, tj. $p_{(1)}=P/P_n$, na osnovu koje se određuje tačnija vrednost (druga aproksimacija) relativnog opterećenja motora $p_{(2)}$. Ona zahteva prethodno određivanje aktivne i reaktivne komponente struje opterećenja u prvoj iteraciji ($I_{2P(1)}$, $I_{1Q(1)}$) ([4], [5]):

$$I_{1Q(1)} = I_0(u) + I_{2Q_n} \cdot p_{(1)}^2 / u^3 \quad (10)$$

$$I_{2P(1)} = \sqrt{I_1^2 - I_{1Q(1)}^2} - (1 + 2 \cdot (u - 1)) \cdot \frac{P_{0n}}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (11)$$

Onda se druga aproksimacija relativnog opterećenja $p_{(2)}$ računa po izrazu:

$$p_{(2)} = (P/P_n)_{(2)} = (U/U_n) \sqrt{(I_1^2 - I_{1Q}^2)/(I_{1n} \cdot \cos \varphi_n)^2)} \quad (12)$$

i može se smatrati zadovoljavajuće tačnom. Ponekad se, u cilju veće tačnosti, sračunava i treća aproksimacija po istom postupku-jednačini (12).

Izračunavanje aktivne i reaktivne komponente struje opterećenja (koje su prikazane na ekvivalentnoj G šemi - Sl. 1) vrši se prema sledećim formulama:

$$I_{1P} = I_{2P(2)} + \left(1 + (2 \cdot (u - 1)) \cdot \frac{P_{0n}}{\sqrt{3} \cdot U} \right) \quad (13)$$

$$I_{1Q} = I_{1Q(2)} = I_0(u) + I_{2Q_n} \cdot \frac{P^{(2)}}{u^3} \quad (14)$$

gde su aktivna i reaktivna komponente struje opterećenja ($I_{2P(2)}$, $I_{1Q(2)}$) sračunate po izloženom postupku (jednačine (10) i (11)).

Na kraju su određene vrednosti aktivnih (P_1) i reaktivnih (Q_1) opterećenja po snazi prema sledećim izrazima:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot I_{1P} \cdot U \quad (15)$$

$$Q_1 = \sqrt{3} \cdot I_{1Q} \cdot U \quad (16)$$

Po prikazanom postupku, za izmerene vrednosti opterećenja motora po struji (I_1), određene su vrednosti aktivnih (P_1) i reaktivnih (Q_1) opterećenja po snazi, kao i odgovarajuće vrednosti relativnih opterećenja motora ($p=P/P_n$).

Najbolje je da se vrednosti stvarnih opterećenja motora po aktivnoj snazi, u apsolutnim (P_1) i relativnim (P/P_n) jedinicama, i opterećenja motora po reaktivnoj snazi (Q_1), utvrde na osnovu izmerenih opterećenja po struji pri nominalnom naponu, ili naponu koji je po vrednosti blizak nominalnom. Time bi se izbegao uticaj vrednosti (koeficijenta) promene struje praznog hoda ($di_0/du=f(U_i-U_n)$), već bi se samo proveravale i podešavale vrednosti osnovnih parametara motora I_n , $\cos\varphi$, M_{max}/M_n , I_0 , parametara motora u režimu praznog hoda - vrednosti struje (I_0) i gubitaka praznog hoda P_0 i odgovarajućih komponenti istih P_{Cu0} , P_{fw} , P_{Fe} dobijenih ili utvrđenih pomoću zavisnosti $I_0(U_{0i})$ i $P_0(U_{0i})$ iz ispitnih listova iz oglada praznog hoda motora.

2.4. Određivanje koeficijenata promene struje praznog hoda ($\Delta i_0/\Delta u$) i gubitaka u gvožđu ($\Delta p_{Fe}/\Delta u$) iz karakteristike praznog hoda motora

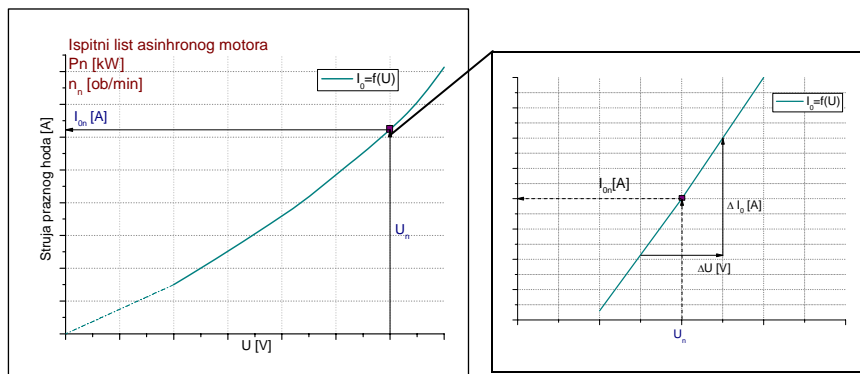
Očitavanjem vrednosti promena struje ΔI_0 za promenu napona ΔU sa grafika $I_0(u)$, dobijaju se vrednosti relativnih promena struje praznog hoda $\Delta i_0 = \Delta I_0/I_{0n}$ za promene napona $\Delta u = \Delta U/U_n$. Izračunavanjem odnosa ovih vrednosti dobija se koeficijent $\Delta i_0/\Delta u$ koji se za dati motor dalje koristi u proračunu. Na osnovu vrednosti sa Sl.2, za asinhroni motor, sledi:

$$k_I = \frac{\Delta i_0}{\Delta u} = \frac{\Delta I_0/I_{0n}}{\Delta U/U_n} \quad (17)$$

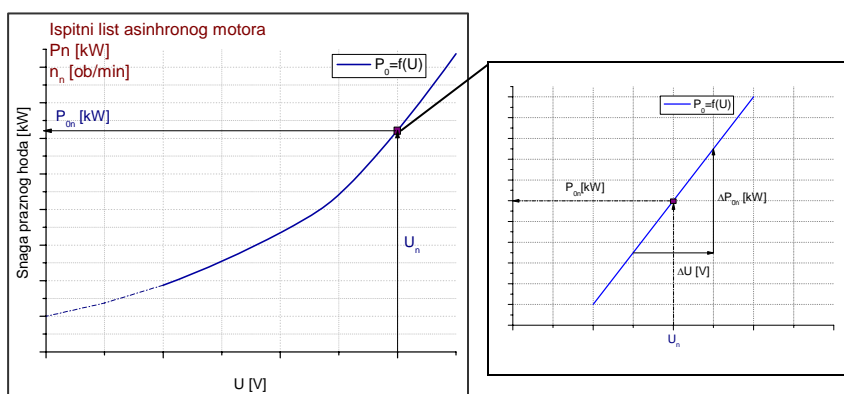
Na sličan način se određuje i koeficijent $\Delta p_{Fe}/\Delta u$ sa karakteristike snage praznog hoda (Sl. 3)

$$k_{Fe} = \frac{\Delta p_{Fe}}{\Delta u} = \frac{\Delta P_0/P_{Fe_n}}{\Delta U/U_n} \quad (18)$$

U Tab. 1. i Tab. 2. su dati podaci o konkretnim vrednostima k_I i k_{Fe} za dva VN motora sopstvene potrošnje TE Morava u oblasti promene napona $u=0.8-1.06$ [r.j.].



Sl. 2: Karakteristika struje praznog hoda



Sl. 3: Karakteristika snage praznog hoda

Tab. 1: Vrednosti koeficijenata za mlin $P_n=450$ [kW], $n_n=590$ [ob/min]

u [r.j.]	P_0 [A]	K_{Fe}	I_0 [A]	K_I
0.800	14.40		15.10	
0.900	16.48	1.62246	17.50	1.19522
0.955	17.68	1.70189	18.85	1.22238
0.970	18.03	1.82007	19.23	1.26162
0.985	18.40	1.92408	19.64	1.36122
1.000	18.82	2.18409	20.08	1.46082
1.015	19.26	2.28809	20.57	1.62683
1.030	19.72	2.39210	21.12	1.82603
1.045	20.21	2.54810	21.74	2.05843
1.060	20.73	2.70411	22.42	2.25764

Tab. 2: Vrednosti koeficijenata za ventilator svežeg vazduha $P_n=400$ [kW],
 $n_n=984$ [ob/min]

u [r.j.]	P_0 [A]	K_{Fe}	I_0 [A]	K_I
0.800	10.36		10.48	
0.900	12.36	1.78891	12.21	1.22348
0.955	13.58	1.98406	13.20	1.27298
0.970	13.93	2.08706	13.49	1.36728
0.985	14.30	2.20632	13.80	1.46157
1.000	14.68	2.26595	14.14	1.60302
1.015	15.07	2.32558	14.51	1.74446
1.030	15.47	2.38521	14.91	1.88590
1.045	15.88	2.44484	15.33	1.98020
1.060	16.34	2.74299	15.76	2.02735

Vrednosti koeficijenata su obično u granicama vrednosti $k_I=1.5-3$ i $k_{Fe}=2-3.5$. Vrednosti koeficijenata su određene za sve motore na 6 kV, koji su bili predmet projekta, i one su korišćene u daljim proračunima i analizama.

2.5. Uticaj vrednosti napona na gubitke snage i reaktivna opterećenja motora

2.5.1. Uvod

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 nivou opterećenosti ($p=P/P_n$). Podaci koji se daju u klasičnoj literaturi[7] su identični sa onima u starijoj literaturi[8], pa su samim tim i nedovoljno tačni za motore proizvedene u zadnjih 30 godina, a koji čine preko 90% svih motora u eksploataciji. Osnovni razlog što je uticaj vrednosti napona na opterećenja i potrošnju energije u motorima veći, u odnosu na podatke iz literature[7] 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. Za opterećenja ispod 50% podaci se ne navode, iako su prosečna opterećenja, bar polovine motora, niža od 50%[5].

Uticaj vrednosti napona na energetske karakteristike standardnih asinhronih motora (AM) novije konstrukcije (proizvedenih posle 1960. godine) je znatno veći, kako je utvrđeno u dosadašnjim istraživanjima i proverama u praksi. Uz to, utvrđeno je da se promene energetskih karakteristika kreću u širokim granicama, u zavisnosti od veličine motora - veće su kada su u pitanju motori manjih snaga.

U novijoj literaturi se konstatuje da je uticaj napona na iznose stepena iskorišćenja (η) i faktora snage ($\cos\phi$) motora veći od onoga što još uvek figuriše u standardnim priručnicima. U radu [9] se analiziraju uticaji napona na pojedine motore, i dobijeni podaci se približno poklapaju sa rezultatima u[4] i [5], ali oni obuhvataju samo deo motora i režima opterećenja koji su važni za praksu.

2.5.2. Zavisnosti gubitaka snage od vrednosti napona

Pri utvrđivanju zavisnosti ukupnih gubitaka snage $P_\gamma = f(u)$ od relativnih vrednosti napona ($u=U/U_n$), za opterećenja od praznog hoda do nominalnog, prvo se iz ogleada utvrđuje zavisnost snage praznog hoda $P_0(u)$:

$$P_0(u)=P_{Cu0}(u)+P_{Fe}(u)+P_{fW} \quad (19)$$

gde su P_{Cu0} , P_{Fe} i P_{fW} , redom, gubici u bakru, gubici u gvožđu i gubici na trenje i ventilaciju u režimu praznog hoda.

Komponenta gubitaka opterećenja ($P_{\gamma p}$) zavisi od relativnih vrednosti opterećenja ($p=P/P_n$) i napona ($u=U/U_n$):

$$P_{\gamma p}= P_{\gamma Pn} \cdot p^2/u^2 \quad (20)$$

gde je $P_{\gamma Pn} = P_{Cu1,Pn} + P_{Cu2,Pn} + P_{dod,n}$ - vrednost komponente gubitaka opterećenja u nominalnom režimu (P_n , U_n), koja se određuje i kao razlika vrednosti ukupnih nominalnih gubitaka snage ($P_{\gamma n}$) i snage praznog hoda pri nominalnom naponu (P_{0n}):

$$P_{\gamma Pn}= P_{\gamma n} - P_{0n} \quad (21)$$

$$P_{\gamma pn} = P_{\gamma n} - P_{0n} \quad (22)$$

Vrednosti ukupnih gubitaka snage, u apsolutnim i relativnim jedinicama, se sračunavaju po izrazima:

$$P_{\gamma}(p, u) = P_0(u) + P_{\gamma pn} \cdot p^2 / u^2 \quad (23)$$

$$p_{\gamma}(p, u) = p_0(u) + p_{\gamma pn} \cdot p^2 / u^2 \quad (24)$$

2.5.3. Zavisnosti reaktivnih opterećenja od vrednosti napona

Pri utvrđivanju zavisnosti reaktivnih opterećenja $Q(u)$ od relativnih vrednosti napona, za opterećenja od praznog hoda do nominalnog, prvo se utvrđuje zavisnost reaktivnih opterećenja praznog hoda, u apsolutnim ($Q_0(u)$) i relativnim ($q_0(u) = Q_0/P_n$) jedinicama:

$$Q_0(u) = \sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0(u) \quad (25)$$

$$q_0(u) = Q_0(u) / P_n \quad (26)$$

Vrednosti reaktivnih snaga (u grani) opterećenja u nominalnom režimu (Sl. 1), Q_{2n} i q_{2n} , se izračunavaju iz odnosa maksimalnog i nominalnog momenta $M_{\max}/M_n = m_{\max}$ tj:

$$Q_{2n} = 0.5 P_n / m_{\max} \quad (27)$$

$$q_{2n} = 0.5 / m_{\max} \quad (28)$$

i nešto su veće od vrednosti priraštaja reaktivnih opterećenja od praznog hoda do nominalnog opterećenja, u apsolutnim (ΔQ_n) ili relativnim ($\Delta q_n = \Delta Q_n / P_n$) jedinicama, zbog smanjenja reaktivne snage na grani magnećenja u nominalnom režimu ($\Delta q_{un} = (0.01-0.10)q_{on}$) u odnosu na režim praznog hoda. Zavisnosti ukupnih reaktivnih opterećenja, u apsolutnim i relativnim jedinicama, se sračunavaju po izrazima:

$$Q_1(u) \approx Q_0(u) + Q_{2n} \cdot p^2 / u^2 \quad (29)$$

$$q_1(u) \approx q_0(u) + q_{2n} \cdot p^2 / u^2 \quad (30)$$

Za proračun zavisnosti na osnovu izraza (23) i (29) potrebno je raspolagati sa:

- kataloškim podacima motora: nominalne snage (P_n), nominalne struje (I_n), stepena iskorišćenja (η), faktora snage ($\cos\varphi$), klizanja (s_n) i odnosa maksimalnog i nominalnog momenta (M_{\max}/M_n), na osnovu kojih se određuju vrednosti $P_{\gamma pn}$ i Q_{2n} , kao i
- karakteristikama praznog hoda motora $I_0(u)$, $Q_0(u)$, $P_0(u)$ i $P_{Fe}(u)$, u području ispitivanih vrednosti napona,

3. ENERGETSKI PRORAČUNI I ANALIZA SOPSTVENE POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE U TERMOELEKTRANI "MORAVA"

3.1. Proračun opterećenja motora sopstvene potrošnje

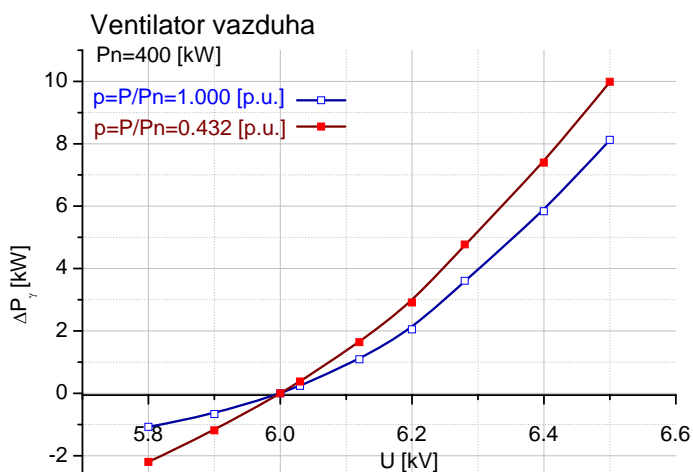
Na sekundarnim sabirnicama transformatora sopstvene potrošnje 110/6.3 kV su podešene vrednosti napona od 6.3 kV, dok su na priključcima motora niži za oko 0.5% u proseku, tj. nominalni (radni) napon u mreži sopstvene potrošnje je $U_{n,mreže}=6.27$ kV, dok je nominalni napon za motore $U_{n,M}=6$ kV. To znači da motori rade pri povišenom naponu od oko 5%, i zbog toga će na graficima posebno biti naznačeno smanjenje ukupnih gubitaka snage i reaktivnih opterećenja između nominalnog napona mreže ($U_{n,mreže}=6.27$ kV) i nominalnog napona motora ($U_{n,M}=6$ kV).

Za izmerene vrednosti opterećenja motora po struji (I_1), određene su vrednosti aktivnih (P_1) i reaktivnih (Q_1) opterećenja po snazi, kao i odgovarajuće vrednosti korisnih (mehaničkih) opterećenja motora u relativnim ($p = P/P_n$) i apsolutnim ($P = p \cdot P_n$) jedinicama za motore sopstvene potrošnje bloka (poglavlje 2.3).

Zaključak je da srednja vrednost relativnih opterećenja VN motora sopstvene potrošnje nije visoka, a pojedinih motora je, čak, i vrlo niska (srednje vrednosti relativnih opterećenja 6 kV-tnih motora sopstvene potrošnje, iznose $p_{\Sigma} \approx 0.621$).

3.2. Proračun i analiza gubitaka snage u zavisnosti od vrednosti napona

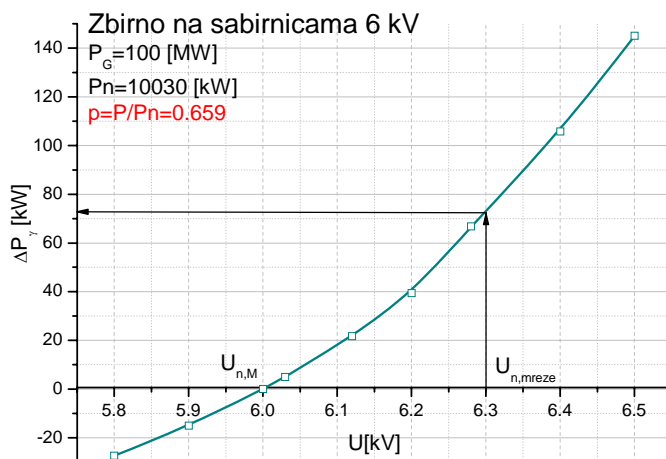
Promene ukupnih gubitaka snage $\Delta P_{\gamma} = P_{\gamma}(U_i) - P_{\gamma}(U_n)$, za sve motora sopstvene potrošnje sa datim opterećenjima, su takve da nižim vrednostima napona odgovaraju manje vrednosti ukupnih gubitaka snage P_{γ} . Pri smanjivanju napona na manje opterećenim motorima efekat smanjenja gubitaka snage je veći (dobar primer je ventilator svežega vazduha koji je u radnom režimu relativno opterećen $p=0.432$ [p.u.] - Sl. 4).



Sl. 4: Promene gubitaka snage (ΔP_{γ}) motora ventilatora svežeg vazduha za radna i nominalna opterećenja po snazi ($P_{\gamma}=21.505$ kW)

Proračunima su određene vrednosti gubitaka snage i odgovarajuće zavisnosti za sve VN motore kao i za posmatranu celinu - celokupna sopstvena potrošnja.

Tako pri smanjivanju napona od vrednosti $U=6.3$ kV do vrednosti $U=U_n=6.0$ kV, ukupni gubici snage za celokupnu sopstvenu potrošnju bloka se smanjuju za oko 75 kW (Sl. 5). Pri daljem smanjenju napona na vrednosti $U<6.0$ kV, to smanjenje gubitaka snage postaje sve manje (zavisi od srednje vrednosti opterećenosti motora).



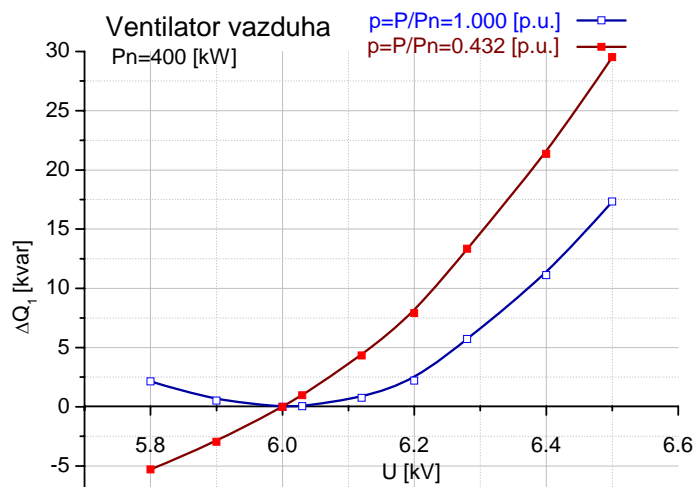
Sl. 5: Ukupne (zbirne) promene gubitaka snage ΔP_γ motora sopstvene potrošnje bloka pri radu svih mlinova (za radna opterećenja u režimu rada generatora sa snagom od 100 MW)

3.3. Proračun i analiza zavisnosti reaktivnih opterećenja motora od vrednosti napona

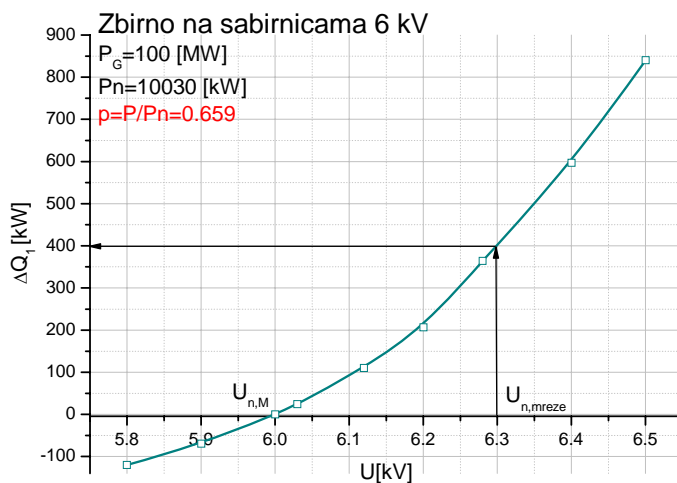
Kada su u pitanju reaktivna opterećenja motora (Q_1), ona se, po pravilu, uvek smanjuju sa sniženjem napona, pa se time ukupni efekti uvećavaju. Na Sl. 6 je prikazana razlika promena reaktivnih opterećenja u zavisnosti od napona jednog podopterećenog motora ($p=0.432$), u odnosu na slučaj kada bi taj isti motor bio nominalno opterećen.

Iz grafičke zavisnosti $\Delta Q_1=f(u)$, na Sl. 6, , vidi da se da bi, pri nominalnom opterećenju motora, minimum reaktivnih opterećenja bio dostignut već pri naponu od 6 kV. Sa daljim sniženjem napona reaktivno opterećenje motora bi se blago povećavalo, što znači da se udaljavamo iz područja optimalnih vrednosti napona sa aspekta reaktivnih opterećenja za ovaj motor. Razlog je u činjenici da ga karakterišu relativno visoke vrednosti odnosa nominalnih komponenti reaktivnih opterećenja (Q_{2n}/Q_{0n}).

Proračunima su određene vrednosti reaktivnog opterećenja i odgovarajuće zavisnosti za sve VN motore kao i za posmatranu celinu (Sl. 7) - celokupna sopstvena potrošnja.



Sl. 6: Promene reaktivnih opterećenja ($\Delta Q_1(u)$) ventilatora svežeg vazduha za radna i nominalna opterećenja po snazi ($Q_1=191.0$ kvar)



Sl. 7: Ukupne (zbirne) promene reaktivnih opterećenja $\Delta Q_1(u)$ motora sopstvene potrošnje bloka pri radu svih mlinova (za radna opterećenja u režimu rada generatora sa snagom od 100 MW)

Snizanjem napona u mreži sopstvene potrošnje sa vrednosti 6.3 kV na vrednost nominalnog napona za motore od 6 kV smanjila bi se reaktivna opterećenja sopstvene potrošnja celog bloka za $\Delta Q_1=400$ kvar (Sl. 7).

3.4. Smanjenje aktivnog i reaktivnog opterećenja sopstvene potrošnje isključenjem iz pogona jednog mlina

Proračuni smanjenja potrošnje aktivne i reaktivne energije su izvedeni pod pretpostavkom da je termoelektrana u pogonu prosečno 6000 h/god. Za procenu uštede isključivanjem jednog mlina iz pogona analiza je rađena da je TE Morava angažovana prosečno 4000 h/god sa 100 MW, a ostatak od 2000 h/god sa 80 MW.

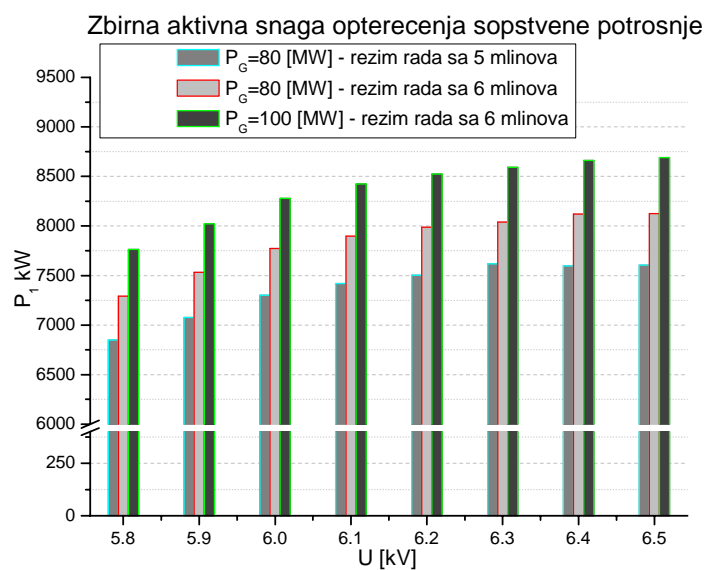
Tab. 3 je prikazano ukupno opterećenje sopstvene potrošnje u zavisnosti od režima rada generatora (tj. broja mlinova u pogonu) i vrednosti napona na sabirnicama sopstvene potrošnje. Uočljivo je da treba težiti radu sa jednim isključenim mlinom kad god termoelektrana ne radi sa maksimalnom snagom i kad to tehnološki postupak dozvoljava (osoblje u TE može proceniti kad je moguć rad sa 5 mlinova). Izmerene razlike u zbirnim aktivnim opterećenjima se ne mogu smatrati dovoljno tačnim zbog različitih uticaja (promenljivo opterećenje mlinova u vremenu, kvalitet uglja, temperatura kotlova, temperature vode za hlađenje i dr.). Korisno (mehaničko) opterećenje pojedinačnih mlinova se povećava u režimu rada sa pet mlinova, ali u manjoj srazmeri se povećava ulazna (električna) snaga pošto deo utrošene snage - gubici snage u motoru i radnoj mašini (mlin) ostaju praktično isti. Izmerene razlike u zbirnom reaktivnom opterećenju se mogu smatrati pouzdanijim pošto promene u opterećenjima mlinova (i do 20%) malo utiču na nivo reaktivnih snaga motora.

Proračuni smanjenja potrošnje aktivne i reaktivne energije su izvedeni pod pretpostavkom da je termoelektrana u pogonu prosečno 6000 h/god. Za procenu uštede isključivanjem jednog mlina iz pogona analiza je rađena da je TE Morava angažovana prosečno 4000 h/god sa 100 MW, a ostatak od 2000 h/god sa 80 MW.

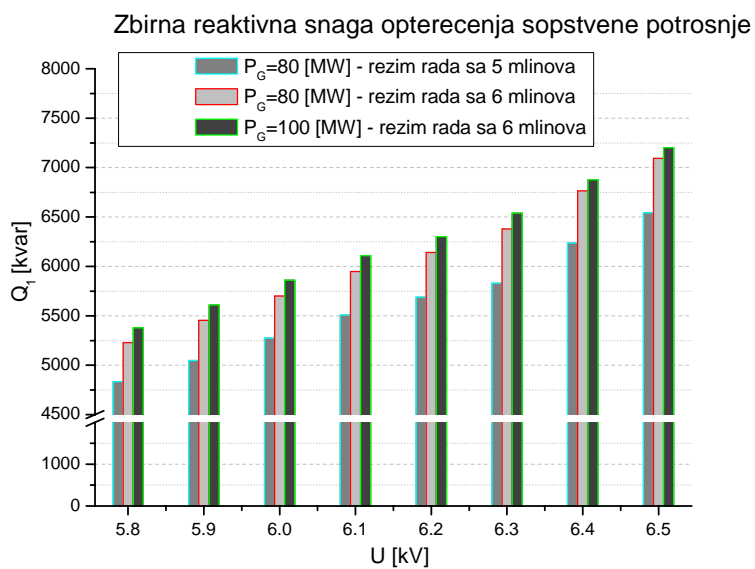
Tab. 3: Razlika ukupnih aktivnih i reaktivnih opterećenja sopstvene potrošnje u zavisnosti od broja mlinova u radu i vrednosti napona u mreži sopstvene potrošnje

Napon mreže	$P_G = 80$ MW u pogonu 6 mlinova		$P_G = 80$ MW u pogonu 5 mlinova		Razlika u pogonu jednog mlina	
	$P_1(u)$	$Q_1(u)$	$P_1(u)$	$Q_1(u)$	$\Delta P_1(u)$	$\Delta Q_1(u)$
[kV]	[kW]	[kvar]	[kW]	[kvar]	[kW]	[kvar]
5.80	7292	5228	6849	4835	442	393
5.90	7533	5454	7076	5046	457	408
6.00	7773	5699	7301	5275	472	424
6.03	7793	5753	7319	5326	474	427
6.10	7898	5949	7418	5509	480	439
6.20	7989	6140	7503	5689	486	451
6.30	8040	6379	7503	5828	538	550
6.40	8121	6765	7597	6236	523	530
6.50	8125	7092	7605	6542	520	550

Treba pomenuti da je razmatran uticaj smanjenja napona pri zaletanju motora sa stanovišta padova napona u mreži. Analiziran je slučaj kada se najveći motor po snazi (motor napojne pumpe) pušta u rad, a da pri tome još nije završeno zaletanje jednog od mlinova. Na osnovu rezultata odgovarajućih proračuna se pokazuje da bi predloženo smanjenje vrednosti napona u mreži sopstvene potrošnje moglo biti prihvatljivo i u tim režimima, pogotovu što su zaleti napojnih pumpi relativno retki i ne traju duže od 8 s.



Sl. 8: Komparativni prikaz promene aktivne snage opterećenja sopstvene potrošnje TE Morava u zavisnosti od režima rada



Sl. 9: Komparativni prikaz promene reaktivne snage opterećenja sopstvene potrošnje TE Morava u zavisnosti od režima rada

3.5. Energetski efekti primene mera racionalizacije potrošnje

Navedeno smanjenje napona dovodi do smanjenje u sopstvenoj potrošnji električne energije, tj. do:

- smanjenja ukupnih gubitaka snage od **69.0-46.8 kW** (u zavisnosti koliko mlinova rade), a time i potrošnje aktivne energije za $\Delta W_p=405\ 137\ \text{kWh/god}$, i
- smanjenja reaktivnih opterećenja za oko **385-260 kvar** (u zavisnosti koliko mlinova rade), a time i potrošnje reaktivne energije za oko $\Delta W_Q=2\ 227\ 162\ \text{kvarh/god}$.

Isključenje jednog mlina iz pogona dovodi do smanjenja potrošnje električne energije:

- smanjenja ukupnog aktivnog opterećenja od **472.4 kW pri smanjenom naponu na 6 kV**, a time i potrošnje aktivne energije za $\Delta W_p=944\ 752\ \text{kWh/god}$,
- smanjenja ukupnog reaktivnog opterećenja od **424.3 kvar pri smanjenom naponu na 6 kV**, a time i potrošnje aktivne energije za $\Delta W_Q=848\ 636\ \text{kvarh/god}$.

Primenom obe mere istovremeno dovodi do godišnjeg smanjenja potrošnje električne energije:

- smanjenja aktivne energije za $\Delta W_p=1\ 349\ 896\ \text{kWh/god}$
- smanjenja reaktivne energije za $\Delta W_Q=3\ 075\ 799\ \text{kvarh /god}$.

4. ZAKLJUČAK

Najvažniji je zaključak da srednje vrednosti relativnih opterećenja motora (P/P_n) celokupne sopstvene potrošnje nisu visoke, a da su pojedini motori veoma nisko opterećeni. Samim tim, sniženjem napona u mreži sopstvene potrošnje je moguće smanjiti ukupne gubitke snage (P_γ) u tako (pod)opterećenim motorima. Kad motori rade na sniženom naponu dobijaju se još veći efekti smanjivanjem reaktivnih opterećenja motora (Q_1).

Kad generator radi sa manjom snagom od nominalne, ušteda u sopstvenoj potrošnji električne energije se mogu ostvariti smanjenjem broja mlinova u radu.

Značajno je da smanjenje reaktivnog opterećenja sopstvene potrošnje može biti od velike važnosti kada su reaktivna opterećenja generatora visoka, jer se time dodatno smanjuju gubici u generatoru i blok transformatoru, a ujedno povećava (oslobađa), eventualno, potrebna rezerva u obrtnoj aktivnoj i reaktivnoj snazi bloka.

LITERATURA

- [1] Institut "Nikola Tesla", 1997, Racionalizacija sopstvene potrošnje električne energije u TE "Morava", Institut "Nikola Tesla", Studija, projekat i realizacija, 2004. godine.
- [2] Racionalizacija sopstvene potrošnje električne energije u TE "Nikola Tesla" B, Obrenovac, Institut "Nikola Tesla", Studija, projekat i realizacija, 2004. godine
- [3] Racionalizacija sopstvene potrošnje električne energije u Termoelektrani "NIKOLA TESLA" A, Institut "Nikola Tesla", Studija, projekat i realizacija, 2006. godine

- [4] M. Kostić, *Utjecaj napona u mreži na opterećenja i racionalnu potrošnju električne energije* - Monografija autora, Institut "Nikola Tesla", 1997, 173. str.
- [5] M. Kostić, "Smanjenje opterećenja i potrošnje energije podešavanjem vrednosti napona motora", *Elektroprivreda*, No. 3, 1998.g. str. 65-78.
- [6] M.Kostić, "Evaluation methods for load and efficiency of induction motor in the exploitation", *11th International Symposium Ee 2001*, Novi Sad, Yugoslavia, pp.332-336.
- [7] *Standard Handbook for Electrical Engineers*, 11th Edition McGraw-Hill Book Company, 1983, New York, pp. 2462
- [8] *Industrial Power Systems Handbook*, McGraw-Hill Book Company, 1955, New York, Toronto, London, pp. 972.
- [9] 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. Applications*, No. 5, 1997, pp. 1312-1320.
- [10] Podaci Naručioaca o karakteristikama motora-kataloški podaci, rezultati ispitivanja motora u praznom hodu, kratkom spoju i nominalnom režimu, kao i rezultati drugih ispitivanja motora pri isporuci i (ili) remontu motora.
- [11] M. Kostić, "Određivanje parametara Γ - šeme i energetske karakteristike asinhronih motora na osnovu kataloških podataka". *Tehnika*, br. 3/2000, str. E12-E18.

Abstract: In this paper a specific methodology for induction motor load and power losses dependence from supply voltage is proposed. Also, the motor load estimation based on measured motor currents is presented. Achieved results in consumed internal electric power reduction in the "Morava" steam power plant are expressed and explained. By proper choice of the optimal supply voltage in the internal medium voltage network it is possible to reduce power losses in motor drives as well as consumed reactive power. Specific conclusions regarding the necessary number of operating coal mills depending on synchronous generator load are also derived and thoroughly explained. It is very important to stress that the abovementioned savings can be realized without any additional investment.

Key words: optimization, internal power consumption, optimal voltage, reduction of electric energy

OPTIMIZATION OF INTERNAL ELECTRIC POWER CONSUMPTION IN "MORAVA" STEAM POWER PLANT

Ivan Stanisavljević, Vladimir Sovrlić, Miloje Kostić