

IZBOR KARAKTERISTIKE RADA REGULATORA NAPONA PRI OTEŽANIM USLOVIMA RADA I LOŠIM FAKTOROM SNAGE U MREŽI SREDNJEG NAPONA

Svetislav MILORADOVIĆ, Termoelektrana i kopovi Kostolac, Srbija
Tomislav RAJIĆ, Univerzitet u Beogradu-Elektrotehnički fakultet, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Praktična primena standarda SRPS EN ISO 50001:2012 - Sistem menadžmenta energijom, moguća je, ukoliko bi se koristila naprednija tehnička rešenja regulatora napona. Tada bi moglo da se ostvari održavanje napona napajanja konzuma u optimalnim granicama. Na taj način smanjili bi se gubici snage u prenosu i na konzumu. U radu je opisan izbor najpovoljnije linearne karakteristike postojećeg regulatora srednjeg napona za konkretan problem u transformatorskoj stanici „Rudnik 2“ 110/6,3 kV/kV na Površinskom kopu „Drmno“. Napon je potrebno regulisati u granicama propisanih vrednosti na potrošaču ($\pm 5\%$) za otežane uslove rada, a da se pri tome ne prekorače dozvoljene temperature namotaja motora. U radu nije analiziran uticaj distorzije napona i struje pri tim uslovima. Cilj je i da se regulacija napona obavlja sa što manjim brojem ciklusa i na taj način produži period između dva uzastopna servisa teretne sklopke.

Naveden je primer pravilnog održavanja napona energetskog transformatora sa postojećom opremom, kako bi motori za eksploataciju mineralnih sirovina mogli nesmetano da rade. Problemi regulacije napona u sredjenaponskim postrojenjima, koja napajaju velike privredne centre, razlikuju se od onih koji su u distributivnim transformatorskim stanicama. U distributivnim transformatorskim stanicama faktor snage je blizak jedinici, što nije slučaj za velike privredne centre. Kod starih pogona, kao što je na pomenutom konzumu, motori su dimenzionisani za teške uslove rada. Posledica toga je upotreba motora kod kojih je izabrana snaga skoro dva puta veća nego što je potrebno. Takvi uslovi rada dovode do lošeg stepena iskorišćenja i malog faktora snage. Mnogi autori se bave ovim problemom, ali ne uzimaju u obzir mali faktor snage, teške polaske mašina i nizak stepen iskorišćenja pogona.

Ključne reči: regulator napona, srednji napon, faktor snage, transformatorska stanica.

SUMMARY

Practical application of the standard SRPS EN ISO 50001: 2012 - Energy Management System, is possible if more advanced technical solutions of the voltage regulator were used. In that case we could maintain the supply voltage of the consumer at optimal limits. This would reduce the transmission and consumption losses. This paper describes the selection of the optimal linear characteristic of the medium voltage regulator for a specific problem in the transformer station "Rudnik 2" 110/6,3 kV / kV at the PK "Drmno" PD "Thermal Power Plants and Mines Kostolac". The voltage must be regulated within the limits of the prescribed values for the consumer ($\pm 5\%$) for difficult operating conditions, without exceeding the allowed winding temperature of the motor. The effect of distortion of voltage and current under these conditions is not analyzed in this paper. The aim is also voltage regulation within the few cycles, thus the period between two consecutive freight coupling services is extended.

Further, an example is given of the proper maintenance of the voltage for energy transformer with the existing equipment, so that the motors for the exploitation of mineral raw materials can run smoothly. The problem of voltage regulation in the networks of medium voltage is specific in regard to the character of distribution consume. In distribution substations, the power factor is almost one, which is not the case for large commercial centers. In the case of old drives, such as the mentioned consume, the motors are dimensioned for severe operating conditions. Consequently, the use of motors with a selected power is almost twice as high as needed. Such operating conditions lead to poor utilization and a small power factor. Many authors wrote about this problem, but they did not take into account the small power factor, the heavy duty machine and the low efficiency of the motors.

Keywords: voltage regulator, medium voltage, power factor, substation.

UVOD

Problem regulacije napona u mrežama srednjeg napona je specifičan u odnosu na karakter konzuma. Za potrošače kod kojih je $\cos\varphi$ blizak jedinici, karakteristika regulatora je skoro linearna pa su greške pri regulaciji male. Regulacija napona za konzum koji ima manji faktor snage, nije tako jednostavna, ali je olakšana primenom naprednijih rešenja. U ovom radu biće objašnjen način regulacije napona na P.K. „Drmno” i transformatorskoj stanici „Rudnik 2“ 110/6,3 kV/kV. Kod starih pogona motori su dimenzionisani za teške uslove rada koji dovode do izbora motora koji je skoro dva puta veći nego što je potrebno. Takvi uslovi dovode do lošeg stepena iskorišćenja i malog $\cos\varphi$ pri radu. Pojedinačnom kompenzacijom motora srednjeg napona može se pokriti reaktivna energija samo do struje praznog hoda tj. pri tome je potrebno u svim slučajevima proveriti da maksimalna struja kondenzatora ne prevazilazi 90% struje magnećenja neopterećenog motora odnosno da ne dođe do samo – pobuđivanja motora, Požar (1) i Dolonc (2). Drugo rešenje je grupna automatska paralelna kompenzacija na samom izvoru napajanja tj. u transformatorskoj stanici „Rudnik 2“ 110/6,3 kV/kV, koja postoji u tri stepena. Sa ovom kompenzacijom se može regulisati napon napajanja na izvoru, ali zbog velikih prenapona prilikom tih procesa pri teškim polascima motora, može doći do pregorevanja kondenzatora. U literaturi se mogu pronaći predlozi za rešavanje operativnim upravljanjem potrošnje električne energije, Kostić (3).

U ovom radu su prikazana dva različita primera podešavanja regulatora napona (4) sa linearnom karakteristikom. Prvi primer ukazuje na mogućnost korišćenja zahtevane linearne karakteristike regulatora u opsegu koji ne bi izazvao veliki broj ciklusa rada teretne sklopke. Suprotno, drugim primerom prikazano je podešavanje regulatora sa kojim se postiže veći broj ciklusa jer je pri tim uslovima u mreži skoro uvek razlika zadane i promenjive merene vrednosti napona veća od 1.5% (minimalni korak regulacije). Do ovih razlika ne bi došlo tj. do nastale sistemske greške, ukoliko bi se sada nova nelinearna karakteristika regulatora preklapila sa izlaznom karakteristikom transformatora što je slučaj kod naprednijih regulatora napona.

Novija rešenja (5), kao što je upotreba frekventnih regulatora, dovode do većih stepena iskorišćenja i većeg $\cos\varphi$ pogona. Kod ovih pogona, sa kvadratom povećanja ukupni faktor izobličenja (THD²) proporcijalno se povećava faktor snage pogona. Za ove svrhe mogu se koristiti motori sa velikim stepenom iskorišćenja i oznakom EFF2, ili motor EFF3 bez frekventnog regulatora, koji bi takođe bili isplativi, jer bi ukupan stepen iskorišćenja pogona bio veći u poređenju sa klasom EEF1.

TEHNIČKE KARAKTERISTIKE ENERGETSKOG TRANSFORMATORA 16MVA, 110/6,3 kV/kV

Potrošnja, koja je pretežno induktivnog tipa, ima faktor snage koji je značajno manji od jedan. Razlog za to je veliki broj motora. Transformator koji napaja potrošnju je prenosnog odnosa 110/6,3 kV/kV, nominalne snage 16 MVA. U Tabeli 1 pregledno su dati parametri transformatora:

TABELA 1 - PARAMETRI ENERGETSKOG TRANSFORMATORA

Energetski transformator 110/6,3 kV/kV	
Sprega	Yd5
Snaga [MVA]	16
Nominalna primarna struja [A]	84
Nominalna sekundarna struja [A]	1 466
Gubici u bakru [W]	78 604
Gubici u gvožđu [W]	15 800
Struja praznog hoda [%]	0,216
Napon kratkog spoja [%]	11,2

Teretna sklopka za regulaciju pod opterećenjem i bez prekidanja struje ima mogućnost regulacije $10 \times 1,5 U_n$ %.

Ovaj transformator je izveden kao trostubni i primarno vezan u zvezdu bez nultog voda. Jasno je da nema magnetno povratnog puta. Njegov uticaj u mreži se objašnjava na sledeći način: kako fluks trećeg harmonika nema povratni put

kroz gvožđe, nego se zatvaraju kroz vazduh, te će treći harmonik struje, zbog velikog magnetnog otpora u vazduhu od jarma do jarma zatvoriti slab treći harmonik fluksa. Konstruktor je na taj način smanjio gubitke u gvožđu a delimično povećao uticaj 3. harmonika.

MIKROPROCESORSKI AUTOMATSKI REGULATOR NAPONA SA LINEARNOM KARAKTERISTIKOM REGULACIJE

Automatski regulator napona sa linearnom karakteristikom koristi se za regulaciju napona energetskih transformatora sa regulacionom sklopkom. Može se regulisati napon dva transformatora u pojedinačnom i paralelnom radu. Ovde će biti objašnjen slučaj sa jednim transformatorom jer je samo ta situacija od interesa (4).

Regulator napona daje komandu za podizanje napona ako je zadovoljen uslov (1):

$$U_m < U_n + (K_i \cdot \frac{I_m}{I_n}) - N_n \quad (1)$$

Ako je

$$U_m > U_n + (K_i \cdot \frac{I_m}{I_n}) - N_n \quad (2)$$

regulator daje komandu za spuštanje napona.

U prethodnim jednačinama promenljive su:

- U_m i I_m -izmerene vrednosti napona i struje,

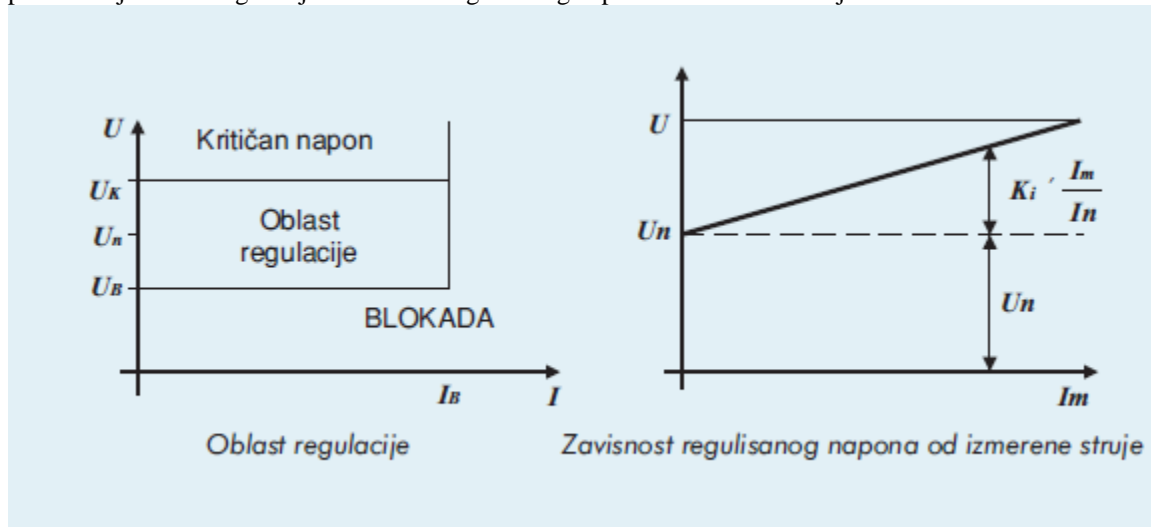
- U_n -zadata vrednost napona,

- K_i - konstanta strujne kompenzacije koja definiše procenat povećanja zadate vrednosti napona za nominalnu struju i

- N_n -zadata naponska neosetljivost releja.

Na osnovu tehničke karakteristike teretne sklopke i mogućnosti transformatora da reguliše napon po 1,5% U_n , potrebno je da minimalna vrednost naponske neosetljivosti releja bude 1,5% U_n .

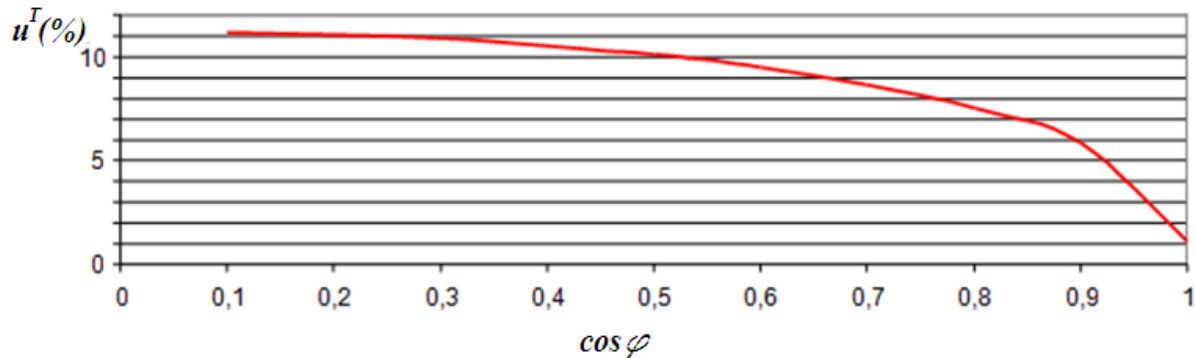
Ako je mereni napon veći od kritičnog napona izolacije opreme, svake četiri sekunde zadaje se impuls za spuštanje napona u trajanju od dve sekunde. Kada je mereni napon manji od napona blokade U_B , ili kada je izmerena struja veća od struje blokade releja I_B , regulator napona prestaje sa regulacijom i daje signal blokade (4). Na Slici 1 prikazana je oblast regulacije i zavisnost regulisanog napona od izmerene struje.



Slika 1. Oblast regulacije i zavisnost regulisanog napona od izmerene struje

PRIMENA KARAKTERISTIKE REGULATORA NAPONA NA SREDNJE NAPONSKOJ MREŽI 6,3 kV

Pošto pomenuti transformator ima mogućnost regulacije napona u granicama $\pm 15\% U_n$, jasno je da se u datoj situaciji može primeniti automatski regulator napona koji je objašnjen u prethodnom poglavlju. Glavni nedostatak ove regulacije najbolje se može objasniti grafički (kriva je dobijena računskim putem).



Slika 2. Zavisnost procentualnog pada napona $\Delta u[\%]$ na transformatoru od pretežno induktivnog faktora snage i relativnom odnosu struja opterećenja od $I_2/I_{2n} = 1$

Ovaj grafik se dobija korišćenjem sledeće zavisnosti (izrazi (3) i (4) napisani su samo iz razloga da bi se dobio kraći oblik jednačine (5):

$$a = u_r \cdot \cos \varphi + u_x \sin \varphi \quad (3)$$

$$b = u_x \cdot \cos \varphi + u_r \sin \varphi \quad (4)$$

$$u^T = \frac{S}{S_n} \cdot a + \frac{S}{S_n} \cdot \frac{b^2}{200} \quad (5)$$

gde su:

$\frac{S}{S_n}$ - relativno opterećenje transformatora,

u_x - relativni reaktivni napon pri kratkom spoju,

u_r - relativni aktivni napon pri kratkom spoju,

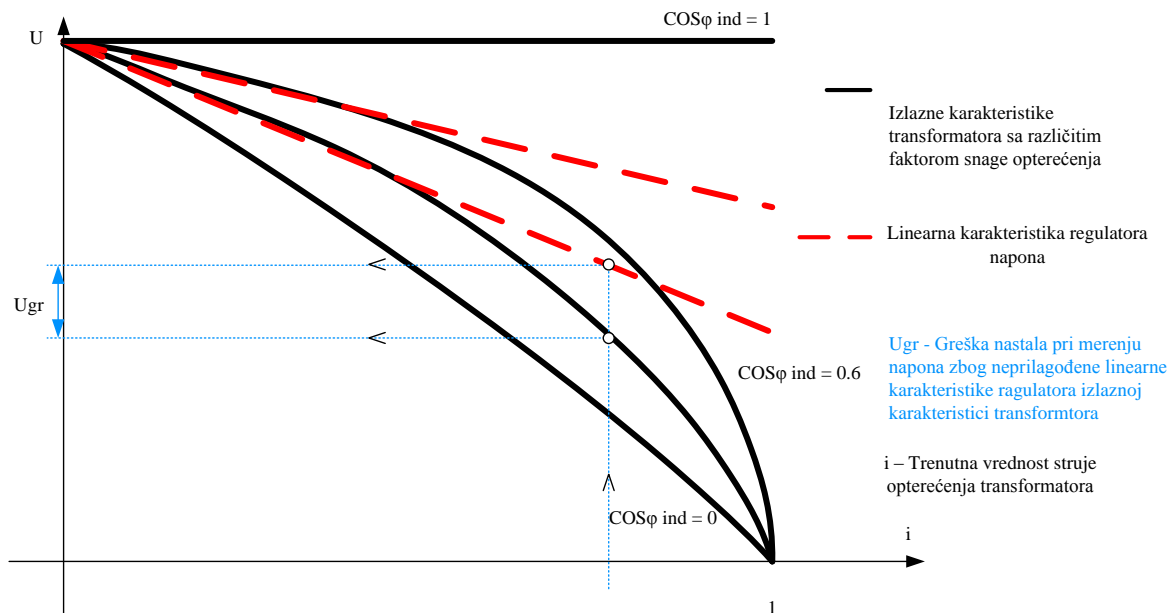
u^T - relativni pad napona na sekundaru transformatora.

Ako je $\cos \varphi$ jednak jedinici onda jednačina (5) ima oblik:

$$u^T = \frac{S}{S_n} \cdot \left(u_r + \frac{u_x^2}{200} \right) = \frac{S}{S_n} \cdot const \quad (6)$$

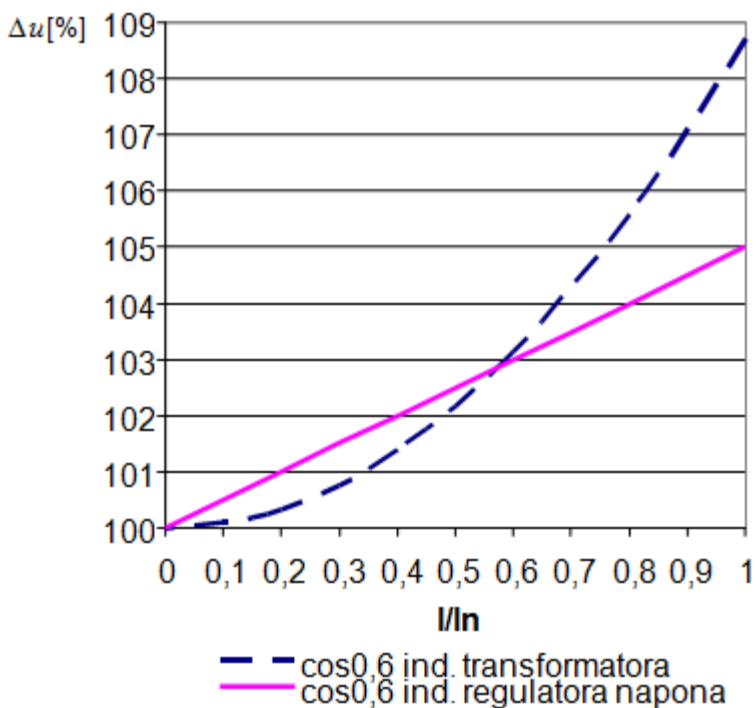
tj. ona predstavlja linearnu zavisnost u odnosu na opterećenje transformatora.

Sa Slike 2 može se uočiti da je najveći pad napona pri $\cos \varphi = 0$ do $\cos \varphi = 0,3$ ali je promena pada napona mala, oko 0,5%. Od $\cos \varphi = 0,3$ do $\cos \varphi = 0,85$, pri $I_2/I_{2n} = 1$, promena pada napona je velika i to oko 4% i nije linearna. Od $\cos \varphi = 0,85$ do $\cos \varphi = 1$ promena pada napona je velika i to oko 6% ali je skoro linearno zavisna. Zbog ove linearnosti pada napona pri $\cos \varphi = 0,85$ do $\cos \varphi = 1$ karakteristika regulatora preklapljena je sa karakteristikom transformatora za pomenuti opseg pa se može primeniti linearna funkcija regulatora napona opisana jednačinama (1) i (2). Ova analiza je predstavljena na Slici 3.



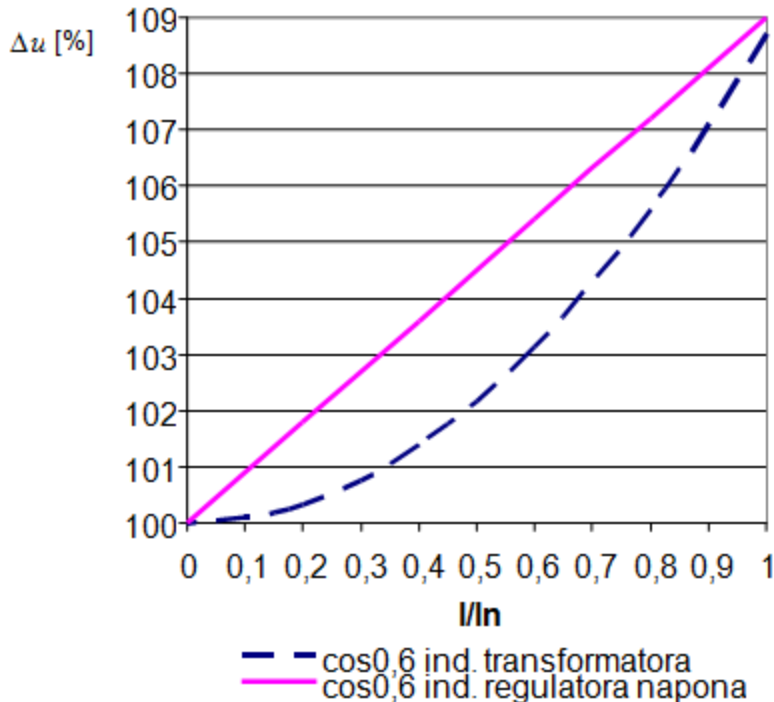
Slika 3. Karakteristike regulatora napona, izlazna karakteristika transformatora i greške pri merenju za različite faktore snage i različita relativna opterećenja

Međutim, kada je faktorom snage u opsegu $\cos\varphi=0,3$ do $\cos\varphi=0,85$ onda se javlja greška kao posledica nepreklapanja karakteristika regulatora napona i karakteristike pada napona na transformatoru. Ovaj problem je grafički predstavljen na Slici 4. Sa slike se vidi da je zadana vrednost karakteristike regulatora ispod stvarne vrednosti karakteristike transformatora u opsegu opterećenja transformatora od $(1-0,5) I/I_n$. To znači da će regulator u tom opsegu stalno težiti da spušta napon transformatora prema zadatoj vrednosti. Obrnuto je za slučaj u granicama od $(0-0,5) I/I_n$.



Slika 4. Poređenje linearne karakteristike regulatora napona sa izlaznom karakteristikom transformatora, faktorom snage opterećenja od 0,6 i koeficijentom strujne kompenzacije $K_f=5$

U ovom slučaju, mogla bi se iskoristiti naponska neosetljivost regulatora kao opcija za poboljšanje karakteristike regulacije tj. smanjenje ciklusa rada sklopke ako bi se usvojilo da ona iznosi $1,5 U_n$ ($N_n=1,5\% U_n$). Ako bi se povećao koeficijent strujne kompenzacije na 9 dobila bi se karakteristika regulatora kao što je prikazano na Slici 5, za isti faktor snage 0,6.



Slika 5. Poređenje linearne karakteristike regulatora napona sa izlaznom karakteristikom transformatora, faktorom snage opterećenja od 0,6 i koeficijentom strujne kompenzacije $K_f=9$

U ovom slučaju bi se dobile male greške pri vrednostima struje blizu nominalnoj struji transformatora, a velike duž celog opsega regulacije. Sa Slika 4 i 5 vidi se da transformator radi u nadpoptuženom stanju i da je stvarna vrednost napona manja od zadate za oko $2\% U_n$ po celom opsegu regulacije. Ova vrednost je veća od zadate naponske neosetljivosti na regulatoru od $1,5\% (N_n)$ te će regulator stalno težiti da je eliminiše. Međutim, problem nadpoptuženog transformatora ubrzava cikluse rada teretne sklopke što skraćuje vek trajanja iste, pa time i povećava oscilacije napona u mreži. Pri nominalnom opterećenju može se uočiti da će teretna sklopka biti na poziciji -6, da bi napon na sabirnicama bio 6,3 kV. Drugim rečima, pad napona pri punom opterećenju transformatora i pri kritičnim uslovima za $\cos\varphi = 0,6$ je oko $-9\% U_n$. Znak minus ukazuje da je pomenuta sklopka skratila namotaje primara, da bi se za toliko povećao napon (da bi indukcija u jezgru transformatora ostala nepomenjena). Znači, napon blokiranja regulatora napona bi trebalo podesiti uzimajući u obzir naglo rasterećenje transformatora u trenutku kada ukupna vrednost pada napona na transformatoru ($-9\% U_n$) i kada u mreži (110kV) pad napona iznosi $-6\% U_n$, a da napon na sekundaru transformatora bude nominalan (promenljiva indukcija u jezgru $\rightarrow B=B_n$; promenljiva temperatura transformatora $\rightarrow \Theta=\Theta_n$). Drugim rečima, napon blokade rada regulatora napona tj. rada teretne sklopke, nastaje kada je pad napona na rasterećenom transformatoru $+9\% U_n$ i kada je napon u mreži 110kV $-6\% U_n$, da bi tada napon na sekundaru iznosio $+3\% U_n$. Zato je brojčana vrednost napona blokade rada regulatora $-6\% U_n$. ($B_n=\text{const}$, $U_k>9\% U_n$).

Ove promene napona se na regulatoru mogu kontrolisati vremenom prorade T_p u različitim vremenskim intervalima i to od 30 s do 300 s. Ukoliko napon padne ispod donje karakteristike regulacije onda regulator ulazi u blokadni režim tj. posle 2 s daje nalog za dizanje napona a posle 10 s opet je spreman da podigne napon. Drugim rečima dolazi do forsiranja dizanja napona u intervalu od 12 s (period jednog stepena regulatora).

Ako bi iz bilo kojih razloga na sredjenaponskoj mreži došlo do povišenja struje usled smanjenja napona napajanja pri nominalnom opterećenju onda bi se javila struja blokiranja rada regulatora napona I_B (slučaj: $B>B_n$; $\Theta>\Theta_n$) koja zaustavlja rad regulatora ili isključuje deo opterećenja. Kako pri daljem snižavanju napona napajanja transformatora u mreži 110kV sa $-6\% U_n$ (na desetom poslednjem položaju $(-6\% - 9\% = -15\%) U_n$ teretne sklopke) na $-10\% U_n$

(čija je vrednost dozvoljena u mreži 110kV) i pri nominalnom opterećenju, dolazi do porasta indukcije u jezgri i njegovog povećanog zagrevanja. U našem slučaju ta vrednost sekundarne struja je $1,04 \cdot 5 = 5,20$ A na regulatoru napona. Takođe, blokadu rada regulatora napona će izazvati i kratkospojne zaštite transformatora podešena na vrednost 2700 A, 2 s.

Posebno treba voditi računa o naponskom transformatoru za merenje koji treba da bude za naponski nivo od 6,3kV a ne od 6 kV, zato što je nominalni napon transformatora 110/6,3kV. Konzum čine motor i transformatori čiji je nominalni napon 6 kV, s tim da transformatori imaju mogućnost regulacije. Takođe treba voditi računa i o opterećenju naponskih i strujnih transformatora i razdaljini do mesta priključka jer to dovodi do greške pri merenju. Ovaj regulator ima potrošnju ulaznih veličina do 1 VA, a potrošnja napajanja je od 20 VA. Da bi greška pri merenju bila što manja najbolje je da se napajanje priključi nezavisno od naponske grane tj. na poseban izvor. Regulacija se obavlja u stepenu od 1,5 % pa sva merenja mogu da budu do 0,5 % odnosno klase 0,5 za strujne i 1 za naponske transformatore. Klasa tačnosti strujnog transformatora zavisi od opterećenja i $\cos\phi$. Na primer za klasu tačnosti 1 strujna greška je 1 % za opterećenje od $(1-1,2) I_n$, a za manja opterećenja greška je veća i ide do 2 %, pri $\cos\phi=0,8$. Kod naponskog transformatora klasa tačnosti jednaka je naponskoj greški u procentima pri naponu koji je u granicama $(0,8-1,2) U_n$. Pri većim opterećenjima greška raste sa povećanjem opterećenja, pa za na primer dvostruko opterećenje može dostići i tri puta veću grešku. Potrebna nazivna snaga određuje se prema instrumentima i relejima koji će biti priključeni na sekundarnu stranu naponskog transformatora. U našem slučaju se radi o veoma maloj potrošnji i to oko 1 VA. Ako bi koristili uređaj za regulaciju napona kao autonoman, onda bi morali da povedemo računa o potrošnji uređaja koja je 20 VA. Iz tih razloga koristi se odvojeno napajanje ulaznih krugova napona i struje od izvora napajanja. Takođe, za ovu mrežu je propisan faktor napona V_f naponskog induktivnog transformatora a njegova vrednost iznosi $1,9 U_n/8$ h.

ZAKLJUČAK

U radu je objašnjen način regulisanja napona uz pomoć regulatora sa linernom karakteristikom kada je faktor snage značajno niži od jedan. Objašnjena su dva različita primera podešavanja regulatora napona sa linearnom karakteristikom. Prvi primer ukazuje na mogućnost korišćenja zahtevane linearne karakteristike regulatora u opsegu koji ne bi izazvao veliki broj ciklusa rada teretne sklopke, dok drugi primer prikazuje podešavanje regulatora sa kojim se postiže veći broj ciklusa. Oba primera, zadržavajući uslov da teretna sklopka ima što manji broj ciklusa rada, neće precizno održavati optimalni napon napajanja konzuma (optimalni opseg regulisanog napona) i stvoriti uslove za smanjenje gubitaka aktivne snage i potrošnje reaktivne energije u motorima i napojnim vodovima na konzumu. Ovaj uslov se može uspešno ostvariti primenom naprednijeg rešenja regulatora napona, što je pokazano u transformatorskoj stanici sličnog konzuma tj. Transformatorska stanica „Rudnik 3“ 2x16 MVA. Upravo se taj vremenski raskorak između potreba i mogućnosti, kao i problemi koji evidentno postoje, mogu prevazići ponuđenim prikazanim praktičnim rešenjima kako bi se sprovedli (implementirali) opšti zahtevi standarda SRPS EN ISO 50001:2012. i standarda SRPS EN50160:2012 u cilju operativnog upravljanja potrošnjom električne energije na konzumu.

LITERATURA:

1. Požar H, 1990, “Visokonaponska rasklopna postrojenja”, “ Tehnička knjiga”, Zagreb
2. Dolonc A, 1960, “Transformatori”, Zagreb
3. Kostić M, 1997, “Poboljšanje kompezacije reaktivne snage postupkom za povećanje korišćenja kondezatora”, Beograd
4. Minel automatika, “Mikroprocesorski automatski regulator napona MPZ-ARN“, internet-stranica: www.minel-automatika.co.rs.
5. ABB, 2010, “Transformer protection RET 650”, Product Guide, internet stranica: https://library.e.abb.com/public/46d19de7ec4c30dbc12576c7005dd9f9/1MRK504110BEN_A_en_Product_Guide_Transformer_protection_RET650