

## Analiza viših harmonika napona i struje i opasnosti od rezonance u mreži sa kondenzatorima

Miloje Kostić<sup>1</sup>, Nikola Georgijević<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija  
[mkostic@ieent.org](mailto:mkostic@ieent.org)

<sup>2</sup> Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija

**Kratak sadržaj:** U radu je prikazana analiza rezultata merenja viših harmonika u mreži srednjeg napona (6 kV) RB Kolubara sa ciljem da se predvide eventualne opasnosti po instaliranju kondenzatora i kondenzatorskih baterija. Iako su izmerene vrednosti za većinu harmonika napona oko dva puta manje od najviših dozvoljenih vrednosti za mreže srednjeg napona, postoji potencijalna opasnost od rezonantnih pojava za pojedine harmonike. Pokazano je da rezonantne struje harmonika reda  $11 < h \leq 25$ , i pored povećanja za više od 10 puta nisu tolike da mogu dovesti do preopterećenja elemenata mreže, pošto su injektovane vrednosti struja tih harmonika relativno male. Ali struje tih harmonika mogu dovesti do preopterećenja, pa i do stradanja kondenzatora. Posebno je važno primetiti da su (kvazi)rezonantne pojave česte za harmonike reda  $11 \leq h \leq 25$ , i po pravilu se teško mogu izbeći bez preduzimanja odgovarajućih mera.

**Ključne reči:** mreža srednjeg napona, viši harmonici, rezonantne pojave, kompenzacija reaktivne energije, kondenzatori

### 1. Uvod

Osnovni cilj merenja i snimanja odgovarajućih karakterističnih režima opterećenja u mreži Površinskog kopa Kolubara bio je da se utvrde:

- vrednosti harmonijske distorzije napona i harmonijske distorzije struje, kao i
- maksimalne i 95% vrednosti pojedinih harmonika struje ( $HDI_{max}$  i  $HDI_{95\%}$ ) i harmonika napona.

Kako bi bili sigurni da su vrednosti harmonijske distorzije napona i harmonijske distorzije struje bile merene u režimima punih opterećenja ili (bar)

u režimima kada je angažovana oprema koja je najvećim delom uzročnik te distorzije, razmatrani su i odgovarajući dijagrami opterećenja po aktivnoj i reaktivnoj snazi, koji su dobijeni tokom jednovremenih merenja.

Posebno se razmatraju rezultati merenja opterećenja (vrednosti osnovnog harmonika struje,  $I_1$ ) i viših harmonika struje,  $I_n$ , i napona,  $U_n$ :

- na primarnoj i sekundarni strani transformatora TR2 i TR3 u transformatorskoj stanici TS 110/35 kV Vreoci
- na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora transformatorskih stanica TS 35/6 kV (TS 35/20 kV) koje se napajaju iz transformatorske stanice TS 110/35 kV Vreoci.

## **2. Rezultati merenja harmonika napona, struje i ukupne harmonijske distorzije napona u mreži TS 10/35 kV**

Navedena merenja [1] su sprovedena u konzumu TS 110/35 kV Vreoci, na lokacijama:

### 1.a U TS 110/35 kV Vreoci

- na primarnoj strani transformatora TR 2 110/35 kV, i
- na sekundarnoj strani transformatora TR 2 i TR 3 110/35 kV.

U električnoj mreži Površinskog kopa - Polje B i Polje D, koji se napaja iz TS 110/35 kV Vreoci, navedena merenja su sprovedena u transformatorskim stanicama 35/6 kV:

1b. U TS Zeoke 4 35/6 kV 1x8 MVA, na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora TR 35/6 kV, preko koga se napajaju motori napona 6 kV i motori napona 0.4 kV koji ulaze u sastav objekata i postrojenja Polja "B";

1c. U TS Zeoke 5 35/6 kV 2x8 MVA+1x4 MVA+2(3)x8 MVA, na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora TR2 35/6 kV preko kojih se napajaju motori napona 6 kV i motori napona 0.4 kV koji ulaze u sastav objekata i postrojenja Polja "D", kao i na sekundarnoj strani TR6 35/6 kV;

1d. U TS Zeoke 6 35/6 kV 2x12 MVA, na primarnoj strani transformatora TR1 35/6 kV i TR2 35/6 kV preko kojih se napajaju motori napona 6 kV i transformatori 6/0.4 kV za napajanje motora napona 0.4 kV, dok ova merenja nisu sprovedena na sekundarnim stranama;

1e. U TS Zeoke 7 35/20/6 kV, na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora TR 35/20 kV, preko koga se napajaju transformatori 20/0.4 kV za napajanje motora napona 0.4 kV i Glodar 9 sa frekventno regulisanim motorima (FRM) napona 0.69 kV, dok merenja na transformatoru TR35/6 kV nisu sprovedena;

1f. U TS Suva separacija 35/6 kV 1x8 MVA+3x4 MVA, merenja su sprovedena na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora

- TR3 35/6 kV 8 MVA, preko kojih se napajaju motori napona 6 kV i motori napona 0.4 kV koji ulaze u sastav II Ugljenog sistema Polja "D",
- TR1 35/6 kV 4 MVA, preko kojih se napajaju motori napona 6 kV i motori napona 0.4 kV koji ulaze u sastav pogona Sušare, i
- TR4 35/6 kV 4 MVA, preko kojih se napajaju motori napona 6 kV i motori napona 0.4 kV koji ulaze u sastav pogona Sušare.

Ranije su sprovedena merenja na primarnoj i sekundarnoj strani transformatorskih stanica 35/6 kV koje se napajaju iz TS 110/35 kV Vreoci, a pripadaju Površinskom kopu Tamnava, i to:

1g. U TS Separacija 35/6 kV 2x8 MVA+1(2)x8 MVA, merenja su sprovedena na primarnoj i sekundarnoj strani dve grupe transformatora:

- transformatora TR2 (TR1 i TR2 rade u paralelnom radu), i
- transformatora TR4 (TR4 radi samostalno ili u paralelnom radu sa TR3).

1h. U TS Montažni plac 35/6 kV 2x8 MVA, na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora TR1, koji radi u paralelnom radu sa identičnim transformatorom TR2;

1i. U TS Istočno polje 35/6 kV 2 (3)x8 MVA+1(2)x8 MVA, merenja su sprovedena na jednom, od dva transformatora u paralelnom radu.

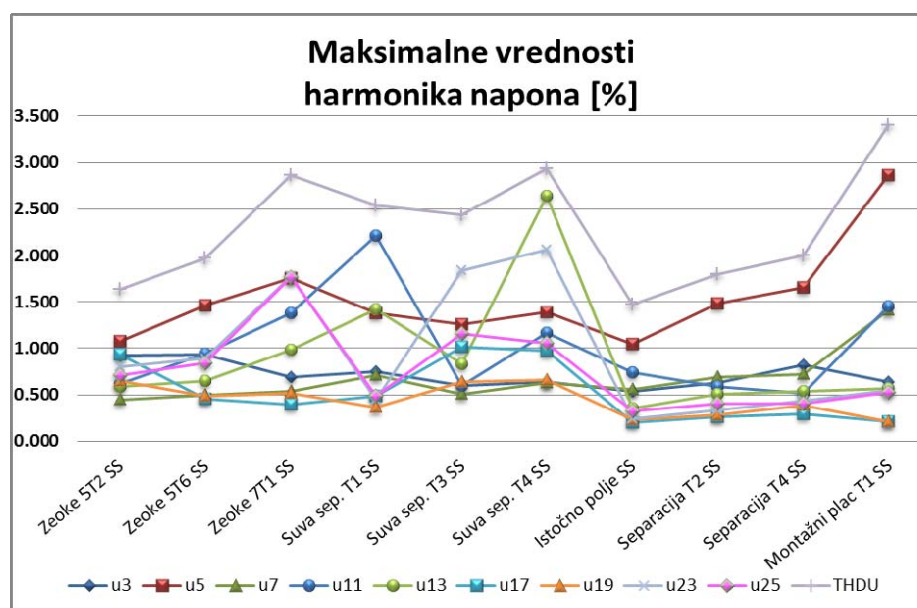
Na bazi rezultata merenja sastavljen je kompletan izveštaj. Ovaj izveštaj sadrži detaljne rezultate merenja, ali ne i odgovarajuće analiza tih rezultata. U ovom radu se vrši sistematizacija najvažnijih rezultata merenja i detaljnija analiza viših harmonika napona i struje.

Rezultati merenja viših harmonika napona i struje se prvo daju u tabelarnom prikazu vrednosti neparnih harmonika napona i struje, počev od 3. do 25. reda ), tj. harmonika reda 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 i 25. Navedene vrednosti su sistematizovane u odgovarajuće tabele, jedna tabela za transformatorsku stanicu 110/35 kV Vreoci i po jedna tabela za svaku od navedenih transformatorskih stanica 35/6 kV [1]. Prvo se daju tabele

- sa vrednostima harmonika napona ( $u_h\%$ ) i ukupne harmonijske distorzije napona ( $THD_U\%$ ) koje su izmerene na primarnoj (PS) i sekundarnoj strani (SS) transformatora svake od navedenih transformatorskih stanica, a potom
- izmerene vrednosti harmonika struje,  $i_h$  (A), koje su izmerene na primarnoj (PS) i sekundarnoj strani (SS) transformatora svake od datih transformatorsku stanica.

## 2.1. Izmerene vrednosti harmonika napona i ukupne distorzije na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora 110/35 kV i 35/X kV

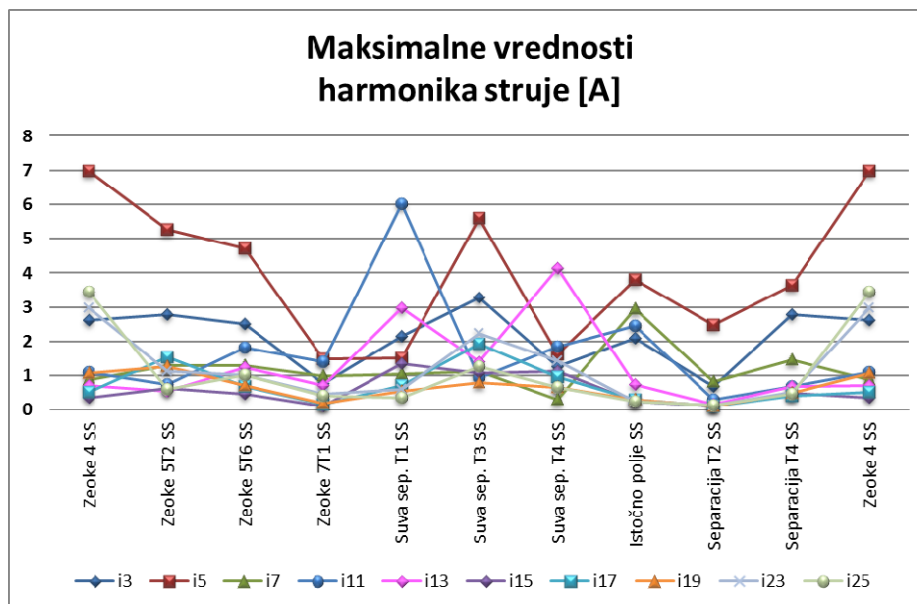
U vidu grafičkih zavisnosti na Slici 1 su dati rezultati merenja neparnih harmonika napona (reda 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 i 25) na sekundarnoj strani (SS) transformatora za sve transformatorske stanice 35/6 kV RB Kolubara koje se napajaju iz TS 110/35 kV Vreoci. Navedeni grafici su nacrtani na osnovu izmerenih maksimalnih (15-minutnih) vrednosti navedenih harmonika napona ( $u_h$  %) i ukupne harmonijske distorzije napona ( $THD_U$  %).



Slika 1. Maksimalne (15-minutne) izmerene vrednosti napona viših harmonika napona ( $u_h$  %) i ukupne harmonijske distorzije napona ( $THD_U$  %) u sekundarnoj mreži naznačenih TS 35/6 kV

## 2.2. Izmerene vrednosti harmonika struje ( $i_h$ ) na primarnoj (PS) i sekundarnoj strani (SS) transformatora 35/X kV

U vidu grafičkih zavisnosti na Slici 2 su dati rezultati merenja neparnih harmonika struje (reda 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 i 25) na sekundarnoj strani (SS) transformatora za navedene transformatorske stanice 35/6 kV RB Kolubara koje se napajaju iz TS 110/35 kV Vreoci [1]. Navedeni grafici su nacrtani na osnovu izmerenih maksimalnih (15-minutnih) vrednosti navedenih harmonika struje,  $i_h$  (A), na osnovu merenih vrednosti.



Slika 2. Maksimalne izmerene (15-minutne) vrednosti viših harmonika struje,  $i_h(A)$ ,  $i$  u sekundarnoj mreži naznačenih transformatorskih stanica 35/X kV

### 3. Analiza rezultata merenja harmonijske distorzije napona i struje u mreži 6 kV RB Kolubara

Detaljnija analiza rezultata merenja viših harmonika se sprovodi u sekundarnoj mreži relevantnih transformatorskim stanicama TS 35/6 kV. Razmatraju se maksimalne izmerene (15-minutne) vrednosti viših harmonika napona ( $u_h\%$ ) i ukupne harmonijske distorzije napona ( $THD_u\%$ ) na sekundarnim sabirnicama naznačenih transformatora 35/6 kV u datim transformatorskim stanicama TS 35/6 kV, Slika 1. U svrhu ove analize porede se izmerene vrednosti,  $u_h\%$  i  $THD_u\%$ , sa najvišim dozvoljenim vrednostima za mreže srednjeg napona, po St. IEEE 519 – 1992 [2] i po SRPS EN 50160 [3]. Naime, standardi [2]- [4] propisuju maksimalne dozvoljene vrednosti za pojedine harmonike napona ( $HD_u$ ) i ukupnu harmonijsku distorziju napona ( $THD_u$ ), za mreže datih naponskih nivoa, pri čemu su najviše dozvoljene vrednosti najmanje po [2]. Iako su izmerene vrednosti [1] za harmonika napona oko dva puta manje od najviših dozvoljenih, postoji potencijalna opasnost od pojave previsokih rezonantnih struja za pojedine harmonike.

Naime, uglavnom dolazi do značajnijeg povećanja harmonika struje i napona za harmonik koji je najbliži rezonantnoj učestanosti ( $h_r=f_r/f_1$ ), kao i za dva susedna harmonika, reda  $h_r-1$  i  $h_r+1$ . Struje rezonantnog harmonika se mogu povećati i za 10 puta, a struje susednih harmonika do 5 puta, ali to ipak retko dovodi do bitnijeg povećanja (udvostručenja) ukupne harmonijske

distorzije struje i napona. Izuzetak su rezonance onih harmonika za koje su prvobitne vrednosti harmonika napona i struje relativno najveće – po pravilu su to struje 5. i 7. harmonika, a u novije vreme i 11. 13. harmonika zbog prisustva frekventno regulisanih motora (FRM). I pored toga što bi i u rezonantnim režimima došlo do umerenog povećanja gubitaka snage u transformatorima i vodovima mreže, prvenstveno treba povesti računa da se pogodnim dimenzionisanjem kompenzacije izbegnu rezonantne pojave, zbog kondenzatora koji se mogu preopteretiti strujama viših harmonika, pa i stradati kada one u principu bilo koji nivo zastupljenosti kondenzatora u mreži dovodi do rezonantnih ili bar kvazirezonantnih pojava za određeni harmonik, i to [5] - [8]:

- ako su ukupne snage kondenzatora manje, rezonanca se dešava za harmonike viših redova, i obrnuto
- ako su ukupne snage kondenzatora veće, rezonanca se dešava za harmonike nižih redova.

Iz navedenih razloga, opasnost od rezonantnih i kvazirezonantnih pojava se razmatra u narednom poglavlju postanu prekomerne.

#### 4. Procena i analiza opasnosti od rezonantnih pojava u mreži sa kondenzatorima za 6kV

Postoji mogućnosti rezonantnih pojava za skoro sve harmonike, od najnižeg do najvišeg reda. Opasnosti od rezonantnih harmonika zavise od vrednosti injektovanih struja ( $I_h$  i  $\sum I_h$ ), kao i od vrednosti faktora pojačanja. Vrednosti faktora pojačanja u rezonantnim i (kvazi)rezonantnim režimima su u direktnoj vezi sa maksimalnim vrednostima faktora pojačanja u rezonantnim režimima,  $F_{rez-h} = F_{max-h}$ , ali se u praksi računa sa nešto nižim vrednostima:

- vrednosti faktora pojačanja u rezonantnim režimima [5] - [8]

$$F_{rez-h} = (0.95 \div 1.0)F_{max-h}, \text{ za } 0.975f_{rez} \leq f_{(kvazi) rez} \leq 1.025f_{rez} \quad (1)$$

- vrednosti faktora pojačanja u kvazirezonantnim režimima

$$F_{(kvazi)rez-h} = (0.60 \div 0.9)F_{max-h}, \quad (2)$$

$$\text{za } 0.8f_{rez} \leq f_{(kvazi) rez} \leq 0.95 \text{ i } 1.05f_{rez} \leq f_{(kvazi) rez} \leq 1.20f_{rez}$$

Za tačnije utvrđivanje maksimalnog (rezonantnog) faktora pojačanja u konkretnim slučajevima,  $F_{max-7}$  i  $F_{max-11}$ , potrebno je što tačnije utvrditi vrednosti rezistancije transformatora koja reprezentuje dodatne gubitke snage u transformatorima, odnosno vrednosti odgovarajućih komponenti tih gubitaka [11].

Na osnovu proračuna se zaključuje da maksimalne vrednosti faktora pojačanja ( $F_{h-max}$ ) mogu biti relativno visoke, i da se kreću u granicama od 6-15 za tipične električne mreže. Tako se:

- vrlo visoke vrednosti,  $F_{h-max}=10-15$ , dobijaju za harmonike reda  $11 \leq h \leq 19$ , dok se
- niže vrednosti  $F_{h-max}=6-10$ , dobijaju za harmonike reda  $3 \leq h \leq 7$ .

Pri tome vrednosti  $F_{h-max}$  zavise i od tačke u koju se injektuju struje harmonika:

- veće su ukoliko struje harmonika dolaze direktno u sekundarnu mrežu transformatora sa kondenzatorima, dok su:
- manje ukoliko one dolaze sa primarne strane transformatora, na čijoj su sekundarnoj strani instalirani kondenzatori.

Zaključuje se da pri punoj rezonanci dolazi do vrlo visokog povećanja struje i napona rezonantnog harmonika. Kako su, po pravilu, veće vrednosti injektovanih struja nižih harmonika to su opasnije rezonance harmonika 5. i 7. reda, i mogu dovesti do preopterećenja kondenzatora ali i odgovarajućih transformatora i vodova. Rezonantne struje harmonika reda  $11 < h \leq 19$ , i pored povećanja za više od 10 puta nisu tolike da mogu dovesti do preopterećenja elemenata mreže, pošto su injektovane vrednosti struja tih harmonika znatno manje. Ali struje harmonika reda  $11 < h \leq 19$  mogu dovesti do preopterećenja, pa i do stradanja kondenzatora. Posebno je važno primetiti da su (kvazi)rezonantne pojave česte za harmonike reda  $11 \leq h \leq 25$  i po pravilu se teško mogu izbeći bez preduzimanja odgovarajućih mera.

Da bi se izbegle navedene opasnosti od pojave rezonance viših harmonika, često je potrebno promeniti konfiguraciju i strukturu kondenzatorskih baterija, ugraditi sekcije kondenzatora sa filterskim prigušnicama, pa i ograničiti ukupnu snagu kondenzatora u datoj galvanski jedinstvenoj mreži (npr. u sekundarnoj mreži svakog od transformatora 35/X kV).

U sekundarnoj mreži transformatora 35/X kV registrovana je umerena harmonijska distorzija napona (oko 3%) i struje, Slika 1 i Slika 2. Međutim iako su vrednosti svih harmonika napona ispod dozvoljenih, ipak se mogu javiti opasnosti od povećanja struja pojedinih harmonika iznad dozvoljenih vrednosti u rezonantnim režimima. Posebno je realna opasnost od rezonantnih pojava za harmonike 11, 13; 17, 19; 23. i 25. reda, pošto se one dešavaju pri relativno malim ukupnim snagama uključenih kondenzatora u sekundarnoj mreži TR 5/6 kV, npr. pri pojedinačnoj kompenzaciji (PK) motora. Pomenute rezonance često je teško izbeći, npr:

- a) ukoliko je rezonantna učestanost  $f_r=17f_1$  ili  $f_r=19f_1$ , onda se javljaju rezonantne pojave za 17. ili 19. harmonik, sa povećanjem struja i napona tog harmonika za oko  $F_{p-rez} = F_{p-max} = 10-12$  puta,
- b) kada je rezonantna učestanost  $f_r \approx 18f_1$ , kvazirezonantne struje 17. i 19. harmonik su veće za 7-8 puta, pa zbirni učinak može biti ravan povećanju struje i napona 17. ili 19. harmonika u rezonantnom režimu. Slično važi i za (kvazi)rezonantne struje 23. i 25. harmonika kada je  $f_r \approx 24f_1$ , ali
- c) rezonantne pojave za harmonike 11. i 13. reda su, po pravilu, česte i opasne pošto su injektovane vrednosti struja tih harmonika relativno

Rezonantne struje pomenutih harmonika kroz kondenzatore mogu da budu  $\geq 50\%$  struje osnovnog harmonika ( $I_{Ch} \geq 50\% I_{C1}$ ) kada su vrednosti napona tih harmonika, redom,  $U_{11} \geq 4.5\%$  i  $U_{13} \geq 3.8\%$ ,  $U_{17} \geq 2.85\%$  i  $U_{19} \geq 2.7\%$ . Navedene vrednosti se u (kvazi)rezonantnim režimima dostižu i pri relativno niskim vrednostima napona harmonika u osnovnom režimu bez kondenzatora, tj. pri vrednostima koje su od 5-10 puta manje od datih iznosa. Zbog toga se pri sprovođenju kompenzacije (ugradnje kondenzatora) moraju izbeći navedene opasnosti koje su, najverovatnije, uzrok dosadašnjeg stradanja najvećeg dela ranije ugrađenih kondenzatora. Opasnost od harmonika 11. i 13. reda, kao i harmonika 23. i 25. reda se povećava sa povećanjem udela frekventno regulisanih motora (FRM). Iz navedenih razloga, biće posebno razmotrena kompenzacija reaktivnih snaga u sekundarnoj mreži svakog od transformatora TR 35/6 kV.

Treba primetiti da najčešće ne postoji opasnost od pojave visokih kvazirezonantnih struja harmonike reda  $7 < h < 11$  ( $h=8, 9$  i  $10$ ) pošto su vrednosti napona tih harmonika, po pravilu, dovoljno niske. Na toj činjenici se zasnivaju i rešenja [9, 11] za izbegavanje previsokih kvazirezonantnih i rezonantnih struja harmonika u mreži sa kondenzatorima, odnosno na svođenje opasnosti od harmonika u mreži na bezbedan nivo.

## 5. Smanjenje opasnosti od rezonantnih pojava i primena postupak za formiranje antirezonantnih filtara

Potpuna primena patenta "Postupak za formiranje antirezonantnih filtara u električnim mrežama srednjeg napona", [9, 10], je moguća kroz sprovođenje mešovite kompenzacije u sekundarnoj mreži TR 35/6 kV Rudarskog basena Kolubara. U razmatranoj varijanti mešovite kompenzacije u sekundarnoj mreži transformatora 35/6 kV zajedničko je da se ona formira:

- od kondenzatora za pojedinačnu kompenzaciju dela motora na 6 kV, ukupne zbirne snage  $\sum Q_{C-PK, i}$
- od sekcije fiksno uključenih kondenzatora u sekundarnoj mreži transformatora 35/6 kV, snage  $Q_{FK}$ .

Snage sekcije fiksno uključenih kondenzatora  $Q_{FK}$  (kvar) konkretizuje projektant, u zavisnosti od:

- vrednosti napona kratkog spoja ( $U_k$ ) transformatora i nominalne snage transformatora ( $S_{nt}$ ), npr.  $Q_{FK} = 1000 \text{ kvar} \pm 15\%$ , za  $S_{nt} = 8 \text{ MVA}$  i  $U_k = 6\%$ ,
- date ukupne snage kondenzatora za pojedinačnu kompenzaciju motora 6 kV ( $\sum Q_{C-PK}$ ), ali i



- od ukupne snage projektovanih (potrebnih) kondenzatora za mešovitu kompenzaciju u sekundarnoj mreži transformatora 35/6 kV konzuma,  $\sum Q_{C-MK} = Q_{FK} + \sum Q_{C-PK}$ .
- Osnovna prednost ovog rešenja je u tome što omogućava da se izbegnu rezonantne pojave za harmonike reda  $h \geq 11$ . Najveće teškoće mogu, ipak, izazvati struje 7. harmonika koje su zastupljene u mrežama srednjeg napona RB Kolubara. Apsolutne i procentne vrednosti struja 7. harmonika u rezonantnom ( $h_{rez-p} \approx 7.0$ ) i kvazirezonantnom režimu ( $h_{rez-p} = 7.5 \div 8.0$ ), zavise direktno od vrednosti maksimalnog (rezonantnog) faktora pojačanja, koji može imati vrednosti u širokim granicama  $F_{max-7} = F_{rez-7} = 6 \div 15$ .

Tačnije utvrđivanje maksimalnog (rezonantnog) faktora pojačanja,  $F_{max-7}$ , je najviše otežano zbog teškoća u određivanju rezistancije transformatora koje reprezentuje dodatne gubitke snage u transformatorima, odnosno komponenti tih gubitaka [11]

- prve komponente koja potiče od vrtložnih struja i
- druge komponente koja potiče od dodatnih gubitaka zbog flukseva rasipanja.

Zbog navedenih (a i drugih) složenosti, Autor patenta ne može preuzeti odgovornost za eventualne negativne posledice primene istog pri izradi i realizaciji projekta za kompenzaciju reaktivnih snaga. Ta odgovornost se podrazumeva, ukoliko Autor direktno bude rukovodio izradom i realizacijom odgovarajućeg projekta. Sugeriše se da se realizaciju projekta podeli na 3 sukcesivne i pogodno razdvojene celine - faze, i po realizaciji svake od faza treba sprovesti merenja viših harmonika za novo stanje mreže sa kondenzatorima.

Navedeni pristup je neophodan, čak i kada bi se u mreži izvodila kompenzacija sa filterskim sekcijama kondenzatora. Poznat je slučaj stradanja kondenzatora u mreži napona 6 kV sa izvedenim filterskim prigušnicama za 5. harmonik - kondenzatori su stradali od kvazirezonantnih struja 3. harmonika. Znači nema apsolutne sigurnosti, iako bi obrazloženi pristup uz primenu navedenog patentiranog rešenja mogao predstavljati optimalno rešenje, zbog sledećih razloga:

- po sigurnosti ne zaostaje za filterskom kompenzacijom - samo bi mogla biti nešto sigurnija kompenzacija sa 100% filterskim sekcijama kondenzatora,
- jeftiniji je za skoro 2 puta od pomenute filterske kompenzacije, pogodniji je i jednostavniji za izvođenje - zahteva skoro duplo manje prostora za smeštaj opreme.

## 6. Zaključak

U radu su prikazani rezultati merenja viših harmonika napona i struje i ukupne harmonijske distorzije napona na primarnoj (PS) i sekundarnoj strani (SS) transformatora 35/6 kV koji se napajaju iz TS 110/ 35 kV Vreoci. Detaljnije se analiziraju vrednosti neparnih harmonika struje i napona u mreži 6 kV, i pokazuje se da postoje opasnosti od rezonantnih pojava u mreži sa kondenzatorima. Ukazuje se na mogućnost smanjenja tih rizika sa izvođenjem kompenzacije reaktivne energije uz primenu patenta "*Postupak za formiranje antirezonantnih filtera u električnim mrežama srednjeg napona*".

## Literatura

- [1] Studija "Idejni projekat racionalizacije potrošnje električne energije kompenzacijom reaktivne snage u mreži Rudarskog basena Kolubara", Elektrotehnički institut Nikola Tesla, 2013. godine.
- [2] ANSI/IEEE Std 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [3] St. SRPS EN 50160, "Karakteristike napona isporučene električne energije iz javnih električnih mreža", 2012. godine.
- [4] IEC/TR 61000-3-6 Ed.2.0, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems, 2008.
- [5] R.C. Dugan, M.F.McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, "*Electrical Power Systems Quality*", McGraw-Hill, Second Edition, 2004.
- [6] J.Ariillaga, D.A.Bradley, P.S.Bodger, "*Power Systems Harmonics*" John Wiley Sons, 1985.
- [7] George J. Wakileh, *Power Systems Harmonics / Fundamentalils, Analysis and Filter Design*, Speringerverlag Berlin -New York, 2001, pp. 576.
- [8] R.Rob, I.Sora, C.Panoiu, M.Panoiu, „Harmonic Filters Influences Regarding the Power Quality on High Frequency Electrothermal Installation with Electromagnetic Induction”, *WSEAS Transactions on Systems, Issue 1, Volume 9, January 2010*, pp.72-81.
- [9] Patent "Postupak za formiranje antirezonantnih filtera u električnim mrežama srednjeg napona". *Glasniku intelektualne svojine* broj 02/2013 , Ispravu o patentu broj 52496
- [10] M.M. Kostić, "Novi postupak za formiranje antirezonantnih filtera u električnim mrežama srednjeg napona", *31. Savetovanje JUKO CIGRE*, 2013. godine, Referat R B3-06.
- [11] M. Kostić, "Smanjenje prenosne (nominalne) snage transformatora u električnim mrežama sa višim harmonicima", *8.JUKO CIGRE*, Referee R-2.8, Vrnjačka Banja, Srbija, Septembar 2012.

**Abstract:** The purpose of the analysis of measurement results of harmonics presented in this paper is to predict the potential dangers after installation of capacitor banks in a medium-voltage (6 kV) network of the Kolubara open pit mine. Although the measured values for most of the harmonic voltages are lower than the maximum allowed values for medium-voltage networks, there is a risk of resonant occurrences of certain harmonics. It is shown that the resonant harmonic currents of the 11<sup>th</sup> to 25<sup>th</sup> orders can increase up to 10 times. These increases in harmonic currents could not overload network elements, but they could lead to overload and outage of the power capacitors. It is particularly important to note that the (quasi-) resonant phenomenon, which is common for harmonics between the 11<sup>th</sup> and the 25<sup>th</sup> order, is difficult to avoid without performing additional measures.

**Keywords:** MV network, higher harmonics, resonance phenomena, power factor correction

## **Analysis of Voltage and Current Harmonics and the Risk of Resonance in a Network with Power Capacitors**

Rad primljen u uredništvo 20.11.2013. godine

Rad prihvaćen 12.09. 2014. godine

