

## STUDIJA OPTIMALNE KOMPENZACIJE REAKTIVNE SNAGE U 11 kV MREŽI – DOHA, KATAR

### STUDY OF OPTIMAL REACTIVE POWER COMPENSATION IN 11 kV NETWORK – DOHA, QATAR

Jovan VUKOVLJAK, Energoprojekt Entel a.d., Beograd, Srbija

#### KRATAK SADRŽAJ

Kako je većina potrošača reaktivne energije induktivnog tipa (motori, fluo svetiljke, itd.), postoji značajna količina reaktivne energije u mreži, usled čega se ispoljavaju njeni negativni efekti, kao što su: smanjenje kapaciteta, povećani gubici i padovi napona.

U ovom radu je, na primeru studije koja je rađena za distributera električne energije (Kahramaa) u Dohi, Katar, prikazana analiza relevantnih aspekata za kompenzaciju reaktivne snage u 11 kV mreži, za različite tipove opterećenja. Kao rezultat analize, prikazane su preporuke za izbor snage, kao i broj i veličine regulacionih stepena kondenzatora. Ukupna snaga kondenzatorskih baterija određena je na osnovu stvarnih profila opterećenja i faktora snage, dok je broj i veličina regulacionih stepena određena uzimajući u obzir nekoliko faktora, kao što su profil opterećenja, broj sklopnih operacija, potreban prostor i cena.

Upotreba kondenzatorskih baterija u mreži može imati i negativne efekte, kao što su dodatna izobličenja napona i udarna struja koja se javlja pri uključenju kondenzatorskih baterija, a koja može da ošteti postojeću opremu. U drugom delu studije prikazana je analiza uticaja kondenzatorskih baterija na mrežu i date su preporuke za umanjene negativnih uticaja.

U studiji su razmatrana četiri karakteristična slučaja, na osnovu sledećih tipova opterećenja: 2x40 MVA – distributivna trafostanica; 2x40 MVA – trafostanica za laku industriju; 3x40 MVA – distributivna trafostanica; 4x40 MVA – distributivna trafostanica

Kao ulazni podaci za analizu korišćeni su podaci (aktivna i reaktivna snaga, udeo viših harmonika i vrednost faktora THD) dobijeni merenjem u tipskim trafostanicama. Kako merenja nisu vršena u periodu maksimalnih opterećenja, poslužili su i podaci o satnom opterećenju trafostanica koji su dobijeni od Kahramaa-e.

Kao konačan rezultat studije prikazana su konkretna rešenja za kompenzaciju reaktivne snage u tipskim distributivnim trafostanicama.

**Ključne reči:** kompenzacija reaktivne snage, harmonici, udarna struja, distributivna trafostanica.

#### ABSTRACT

The majority of electrical equipment (motors, fluorescent lamps, etc.) has an inductive characteristic. This creates a reactive load on the supply network, with several negative impacts like capacity reduction, additional losses and voltage drop.

In this paper, an example of a study provided for a power distribution company (Kahramaa) in Doha, Qatar, presents a comprehensive analysis of relevant aspects for compensation of reactive power, focused on compensation at 11kV voltage level, for different load types. As a result of the study, recommendations regarding capacitor bank sizing and determination of the step size required for proper compensation of reactive power are presented. Total reactive power of capacitor bank was determined based on the actual load profile and power factor, while the size and number of steps were determined based on actual load profile and power factor, the optimal number of switching operation, space availability for capacitor bank installation and price required for different number and size of the steps.

The implementation of the capacitor banks in the network can also have negative impacts like additional harmonic distortion and also considerable inrush current which can damage the equipment. The second part of the study presents an analysis of the impact of capacitor banks on the network and provides recommendations for reducing the negative impacts.

Four cases were considered in the study, based on the following load types: 2x40 MVA – distribution substation; 2x40 MVA – substation for light industry; 3x40 MVA – distribution substation; 4x40 MVA – distribution substation

The data (active and reactive power, harmonics content and THD factor value), obtained by the measurements in typical substations, were used as input data for the analysis. Since the measurements are done during the off-pick load conditions, available hourly loading data, obtained by Kahramaa, were also used for accurate estimation of the capacitor bank size.

As a final result of the study, concrete solutions for reactive power compensation in typical distribution substations are presented.

**Key words:** reactive power compensation, harmonics, inrush current, distribution substation.

Bulevar Mihaila Pupina 12, 11070 Novi Beograd, tel. 011/440 7570, e-mail: [jvukovljak@ep-entel.com](mailto:jvukovljak@ep-entel.com)

## UVOD

Kao posledica naglog razvoja industrije i porasta broja stanovnika u zemljama Bliskog istoka, javlja se sve veći broj induktivnih potrošača električne energije, što direktno utiče na povećanje učešća reaktivne električne energije u mreži. Kako bi se smanjio udeo reaktivne električne energije, a time i umanjio negativan uticaj koji njeno prisustvo ima na mrežu, primenjuje se kompenzacija reaktivne snage.

Zadatak studije bio je da se sprovede analiza kompenzacije reaktivne snage u 11 kV mreži, sa krajnjim ciljem da se predlože preporuke za izbor snage i broja i veličine regulacionih stepena kondenzatorskih baterija, u zavisnosti od opterećenja, zadatog faktora snage, optimalnog broja sklopnih operacija, potrebnog prostora i cene. Ukupna snaga kondenzatorskih baterija određena je tako da se faktor snage uvek drži iznad zadate vrednosti, koja iznosi 0,95. Pored toga, pre davanja konačnih preporuka za izbor, u studiji je analiziran i negativan uticaj koji bi uključivanje baterija moglo da ima na mrežu, odnosno izvršena je analiza izobličenja napona i pojava udarne struje, koja se javlja pri uključivanju kondenzatorskih baterija. Nakon toga, date su preporuke za umanjivanje negativnih uticaja koje kompenzacija reaktivne snage može da ima.

U studiji su razmatrana četiri karakteristična slučaja, odnosno četiri tipske trafostanice naponskog nivoa 66/11 kV i snage: 2x40 MVA – distributivna trafostanica; 2x40 MVA – trafostanica za laku industriju; 3x40 MVA – distributivna trafostanica; 4x40 MVA – distributivna trafostanica

## IZBOR SNAGE I BROJA I VELIČINE REGULACIONIH STEPENA KONDENZATORSKIH BATERIJA

Proračun potrebne snage kondenzatorskih baterija izvršen je na osnovu podataka o stvarnom opterećenju i faktoru snage, koji su dobijeni merenjem u tipskim trafostanicama. Pored toga, u proračunima su korišćeni i podaci o satnom opterećenju trafostanica koji su dobijeni od distributera električne energije Kahramaa-e.

Uzimajući u obzir stvarno opterećenje i faktor snage, proračun potrebne snage kondenzatorskih baterija koje je potrebno instalirati kako bi se postigao željeni faktor snage 0,95 računat je na osnovu sledeće formule:

$$Q_c = Q - P \cdot \tan \varphi_{spec} \quad (1)$$

Gde je  $Q_c$  potrebna snaga kondenzatora,  $Q$  ukupna reaktivna snaga na sabirnicama na kojima se vrši komenzacija,  $P$  - ukupna aktivna snaga na sabirnicama na kojima se vrši komenzacija,  $\varphi_{spec}$  – zadati faktor snage.

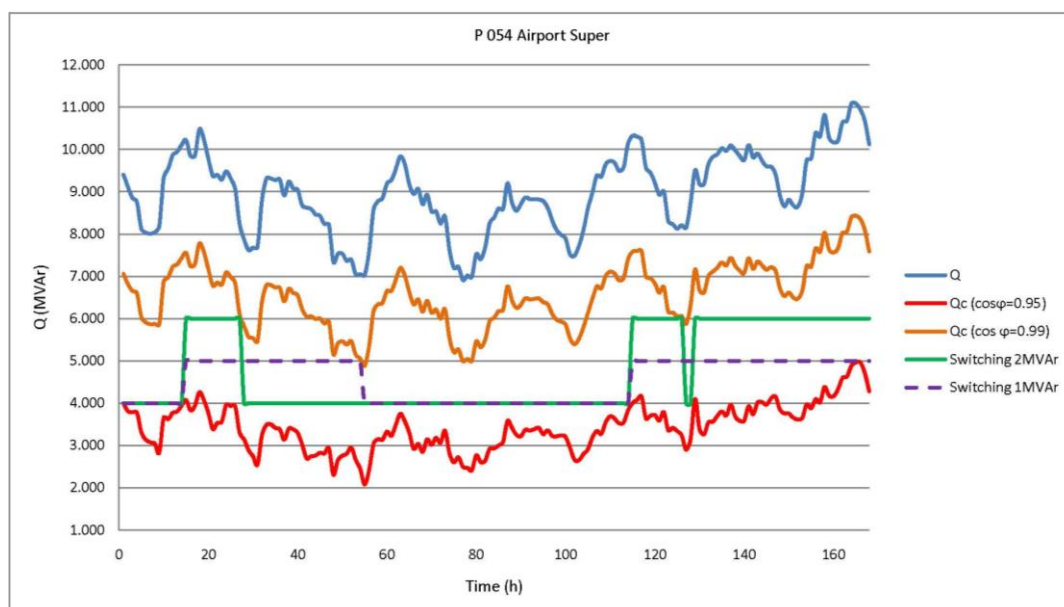
U tabeli ispod dati su rezultati proračuna potrebne snage kondenzatorskih baterija:

TABELA 1 – USVOJENA SNAGA KONDENZATORSKIH BATERIJA

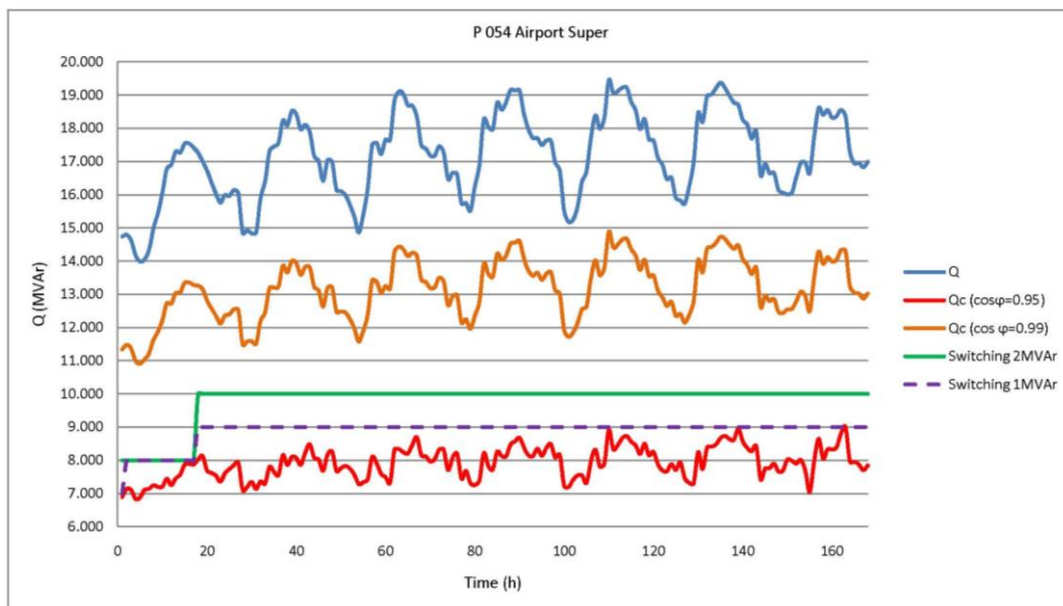
Tip trafostanice	Usvojena snaga kondenzatorske baterija [MVar]
2x40 MVA – distributivna trafostanica	2x6
2x40 MVA – trafostanica za laku industriju	2x8
3x40 MVA – distributivna trafostanica	3x8
4x40 MVA – distributivna trafostanica	4x6

Kako se opterećenje transformatora menja tokom vremena (dana, meseca, godine), menja se i reaktivna snaga baterije potrebna za postizanje željenog faktora snage, te je poželjno instalirati kondenzatorske baterije sa određenim brojem regulacionih stepena. Veličina regulacionih stepena određena je na osnovu sledećih parametara: stvarnog opterećenja, broja sklopnih operacija, potrebnog prostora i cene.

Izbor broja i veličine regulacionih stepena prikazan je na primeru distributivne trafostanice 2x40 MVA, sa kondenzatorom 6 MVar. Razmatrane su dve veličine stepena: 1 MVar i 2 MVar. Razmatranja su vršena za period od jedne nedelje (168 sati), i to za jednu nedelju u zimskom i jednu nedelju u letnjem periodu. Uslov za isključenje jednog regulacionog stepena je da je faktor snage dostigao vrednost od 0,99. Na slikama br. 1 i br. 2 prikazani su grafici ukupne reaktivne snage koju je potrebno kompenzovati kako bi se postigao faktor snage između 0,95 i 0,99, kao i dijagram sklopnih operacija za regulacione stepene veličine 1 MVar i 2 MVar.



SLIKA 1 – REAKTIVNA SNAGA KOJU JE POTREBNO KOMPENZOVATI ZA POSTIZANJE  $\cos\phi=0,95\div0,99$  I DIJAGRAM SKLOPNIH OPERACIJA ZA REGULACIONE STEPENE OD 1 MVAR I 2MVAR U ZIMSKOM PERIODU

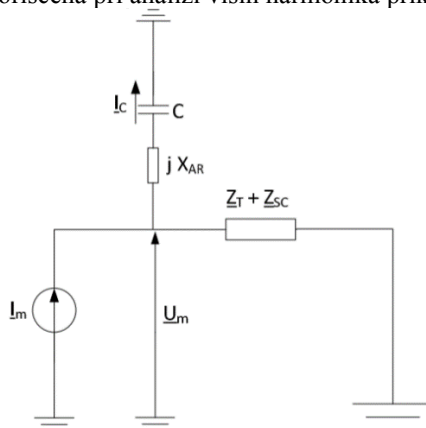


SLIKA 2 – REAKTIVNA SNAGA KOJU JE POTREBNO KOMPENZOVATI ZA POSTIZANJE  $\text{COS}\varphi=0,95-0,99$  I DIJAGRAM SKLOPNIH OPERACIJA ZA REGULACIONE STEPENE OD 1 MVAR I 2MVAR U LETNJEM PERIODU

Sa slike br. 1 i br. 2 može se videti da ne postoji velika razlika u broju sklopnih operacija za različite regulacione stepene. Ovde treba napomenuti da se pravilnom konfiguracijom upravljačkog sistema mogu izbeći pojedine sklopne operacije i time postići još efikasnija kompenzacija reaktivne snage. Sa druge strane, veći broj regulacionih stepena zahteva veći prostor za smeštaj kondenzatorskih baterija. Kondenzatorska baterija u konfiguraciji 1x6 MVar je okvirnih dimenzija  $D \times V \times \mathring{S}=9,5\text{m} \times 2,3\text{m} \times 2,2\text{m}$ , dok je baterija u konfiguraciji 3x2 MVar okvirnih dimenzija  $D \times V \times \mathring{S}=6,2\text{m} \times 2,3\text{m} \times 2,2\text{m}$ . Pored toga, treba napomenuti da veći broj regulacionih stepena predstavlja veću investiciju od baterije sa manjim brojem stepena. Imajući u vidu cenu, i činjenicu da su trafostanice smeštene u gradskom jezgru, i da prostor neophodan za instalaciju predstavlja značajan faktor, jasno je da je manji broj stepena prihvatljiviji.

## ANALIZA VIŠIH HARMONIKA

Uprošćena zamenska šema koja je korišćena pri analizi viših harmonika prikazana je na slici br. 3.



SLIKA 3 – UPROŠĆENA ZAMENSKA ŠEMA ZA ANALIZU VIŠIH HARMONIKA

Na slici br. 3, oznake imaju sledeće značenje:  $I_m$  – merena vrednost i-tog harmonika struje opterećenja,  $U_m$  – merena vrednost i-tog harmonika napona na sabirnicama 11 kV,  $Z_T + Z_{SC}$  – zbir impedansi transformatora i mreže za i-ti harmonik,  $I_c$  – i-ti harmonik struje kondenzatora,  $C$  – kapacitivnost kondenzatora,  $X_{AR}$  – reaktansa prigušnice.

Impedansa  $Z_T + Z_{sc}$  je pretežno induktivna, te je radi lakše analize pretpostavljeno da je  $Z_T + Z_{sc} \approx j\omega L_g$ . U slučaju kada nema prigušnice, ekvivalentna impedansa kondenzatorske baterije i sistema transformator-mreža je:

$$Z_{ekv} = \frac{1}{\frac{j\omega C}{1 - \omega^2 L_g C} + j\omega L_g} = \frac{j\omega L_g}{1 - \omega^2 L_g C} \quad (2)$$

Na osnovu prethodno napisane formule, vidi se da je pri anti-rezonantnoj frekvenciji ( $f_{AR}$ )  $\omega_{AR}^2 L_g C = 1$ , pa je ekvivalentna impedansa beskonačno velika. U toj situaciji, ukoliko postoji viši harmonik struje opterećenja  $I_m$  sa frekvencijom  $f_{AR}$ , pojaviće se i visoka vrednost višeg harmonika napona  $U_m$  sa istom frekvencijom. Kao posledica toga, doći će do pojave višeg harmonika struje kondenzatorske baterije, koja će prouzrokovati dodatno grejanje kondenzatora, kao i do pojave viših harmonika u mreži, uzrokujući smanjenje kvaliteta električne energije.

U opštem slučaju, kompenzaciju reaktivne snage moguće je vršiti samo upotrebom kondenzatorskih baterija, međutim, preporučljivo je da se, čak i kada analize pokažu da udeo viših harmonika u mreži neće premašiti dozvoljene vrednosti nakon kompenzacije, koriste prigušnice vezane na red sa kondenzatorskom baterijom. Jedan od razloga za primenu ovakvog pristupa je i mogućnost da posle kompenzacije, ukoliko se izvrši priključenje nekih novih nelinearnih potrošača na mrežu, dođe do povećanja udela viših harmonika napona, što bi kao direktnu posledicu imalo pojavu viših harmonika struje kroz kondenzatorsku bateriju, uzrokujući njeno dodatno zagrevanje.

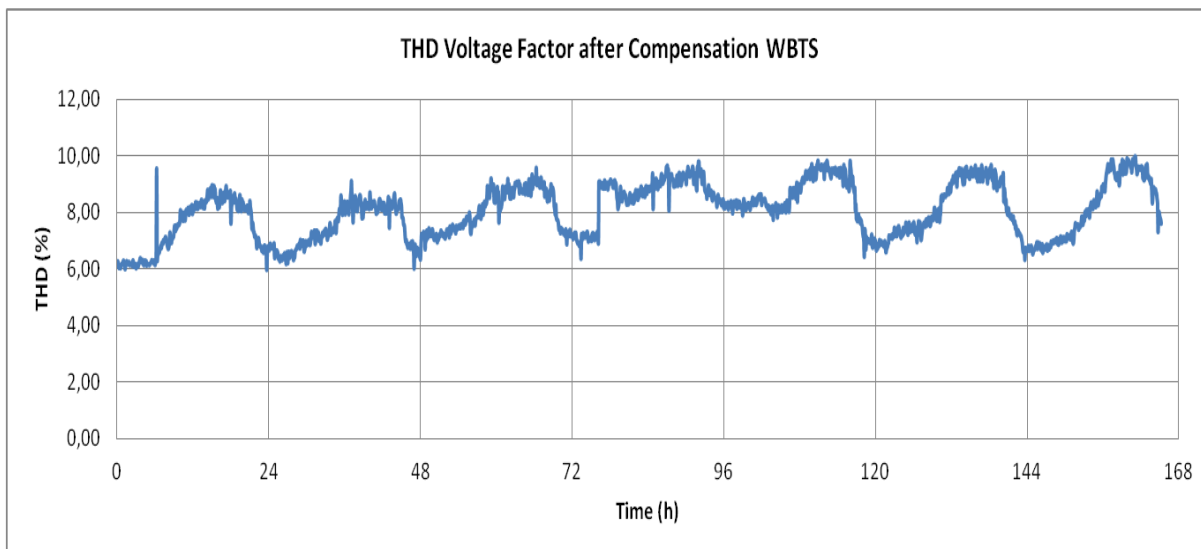
Kako bi se sprečila pojava anti-rezonancije, vrši se priključenje prigušnice na red sa kondenzatorskom baterijom. Pravilo koje se koristi pri izboru prigušnice je da frekvencija prigušnice treba da bude niža od frekvencije harmonika koji se želi filtrirati. Naime, za frekvencije iznad izabrane rezonantne frekvencije, sistem kondenzatorska baterija-prigušnica se ponaša kao induktivna impedansa. Ukupna impedansa paralelne veze sistema kondenzatorska baterija-prigušnica i sistema transformator-mreža će biti manja od impedanse sistema transformator-mreža. Kako se nelinearno opterećenje ponaša kao strujni izvor, niža ukupna impedansa vodi ka nižem sadržaju viših harmonika napona. Na osnovu toga, zaključujemo da će doći do prigušenja svih harmonika napona na sabirnicama čija je frekvencija viša od izabrane frekvencije. Takođe, za očekivati je da ukupno izobličenje napona u slučaju kada je izvršena kompenzacija reaktivne snage sa kondenzatorom i prigušnicom bude niže od ukupnog izobličenja napona koje se ima pre kompenzacije reaktivne snage, što se može videti iz vrednosti THD faktora prikazanog u Tabeli 2.

U praksi, tipično se koriste prigušnice za sledeće frekvencije: 134 Hz, 189 Hz i 210 Hz. Upoređujući prigušnice za frekvencije 189 Hz i 210 Hz, jasno je da će obe filtrirati peti harmonik, međutim, razlika između ove dve prigušnice je u tome što će prigušnica za 189 Hz imati veći opseg filtriranja. Za filtriranje trećeg harmonika, koristi se prigušnica za frekvenciju 134 Hz, međutim ova prigušnica je znatno skuplja od prve dve, i dimenziono najveća.

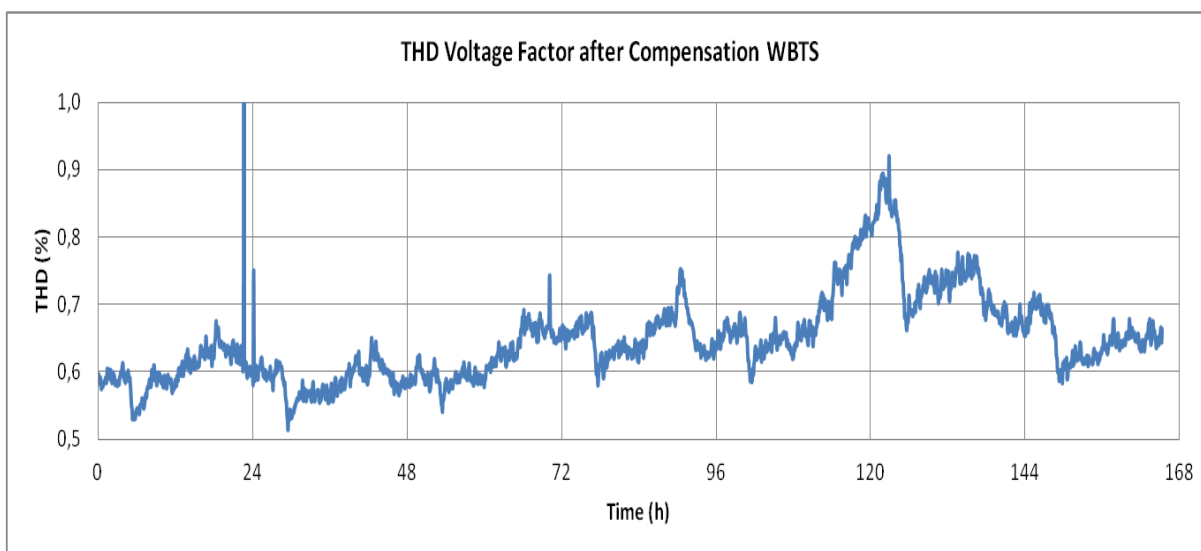
U tipskim trafostanicama koje su bile predmet studije, usvojena je prigušnica za frekvenciju 189 Hz. U tabeli 2 prikazane su maksimalne i minimalne vrednosti viših harmonika napona i THD faktora za sledeća tri slučaja: pre kompenzacije, kompenzacija bez prigušnice i kompenzacija sa prigušnicom. Pored toga, na slikama br. 4 i br. 5 grafički je prikazan THD faktor za kompenzaciju sa i bez prigušnice za 189 Hz u tipskoj trafostanici 3x40 MVA, sa kondenzatorskom baterijom 3x8 MVar.

TABELA 2 -VREDNOSTI VIŠIH HARMONIKA I THD FAKTORA NAPONA SABIRNICA U TIPSKOJ TRAFOSTANICI 3X40 MVA

Red višeg harmonika		5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	THD
Pre kompenzacije	Min	0.84	0.89	0.15	0.28	0.11	0.60	0.06	0.02	0.06	0.03	1.35
	Max	1.47	1.62	0.45	0.58	0.25	0.19	0.16	0.13	0.16	0.13	2.19
Kompenzacija bez prigušnice	Min	1.74	5.4	0.10	0.11	0.02	0.009	0.001	0.005	0.004	0.002	5.97
	Max	3.03	9.82	0.29	0.23	0.05	0.029	0.011	0.013	0.01	0.007	9.96
Kompenzacija sa prigušnicom	Min	0.51	0.64	0.11	0.21	0.08	0.04	0.007	0.04	0.04	0.02	0.91
	Max	0.89	1.15	0.34	0.43	0.19	0.14	0.090	0.1	0.11	0.09	1.49



SLIKA 4 – THD FAKTOR NAKON KOMPENZACIJE – BEZ PRIGUŠNICE ZA 189 HZ



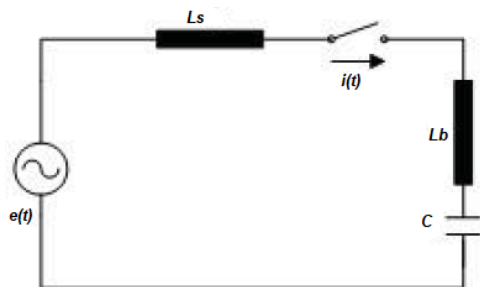
SLIKA 5 – THD FAKTOR NAKON KOMPENZACIJE – SA PRIGUŠNICOM ZA 189 HZ

Na slikama iznad vidi se da dolazi do značajnog povećanja udela sedmog harmonika napona, kao i da se THD faktor povećava do vrednosti od 10% nakon kompenzacije bez prigušnice. Kada je kompenzacija izvršena uz upotrebu prigušnice za 189 Hz, dolazi do smanjenja THD faktora, čija maksimalna vrednost sada iznosi približno 0,9%.

## UDARNA STRUJA

Priključenje kondenzatorske baterije na napon uklapanjem sklopnog aparata uzrokuje uklopnu struju koja je funkcija mrežnog napona, kapaciteta i otpora kola, vrednosti i mesta induktiviteta u mreži, naboja baterije u trenutku kada se zatvori kolo, i posredno prigušenja prelazne pojave. Ta struja može dostići vrlo visoku amplitudu, veliku strminu porasta i biti vrlo visoke frekvencije, što može da izazove znatna naprezanja sklopnih aparata i kondenzatorskih baterija.

Kod uključenja kondenzatora na mrežu, razlikuje se slučaj u kome se kondenzator uključuje kada u mreži nema drugih uključenih kondenzatora, i slučaj kada se baterija uključuje kada u mreži već postoji jedna ili više priključenih baterija. Prema standardu IEC 60781, udarna struja se poredi sa nominalnom strujom kondenzatora. Kada odnos udarne struje i nominalne struje pređe vrednost 100, potrebno je vezati prigušnicu na red sa kondenzatorskom baterijom, kako bi se umanjila vrednost udarne struje.



SLIKA 6 – EKVIVALENTNA ŠEMA ZA PRORAČUN STRUJE UKLJUČENJA KONDENZATORA

U prvom slučaju, pri uključenju prvog stepena kondenzatorske baterije, trenutne vrednosti struje u vreme prelaznog procesa, s obzirom na ispunjenost uslova  $\omega_0 \gg \omega$ , menjaju se po zavisnosti:

$$i(t) = \omega C E_{max} \left( \sin \omega t + e^{-t/T_0} \left( \frac{\omega_0}{\omega} \right) \sin \omega_0 t \right) \quad (3)$$

Gde je  $E$  fazni napon mreže, a  $C$  kapacitivnost kondenzatora po fazi. Prvi sabirak u formuli (3) odgovara struji kondenzatora koja se održava i u stacionarnom stanju, dok drugi sabirak predstavlja komponentu struje slobodnog stanja, koja u realnim uslovima mora da bude prigušena. Kako je uticaj prvog člana relativno mali ( $\omega_0 \gg \omega$ ), vrednost struje uključenja određena je drugim članom:

$$i(t) = I_{udmax} \sin \omega_0 t \quad (4)$$

Gde je:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} = \omega \sqrt{X_C/X_L} = \omega \sqrt{S_{SC}/Q_C} \quad (5)$$

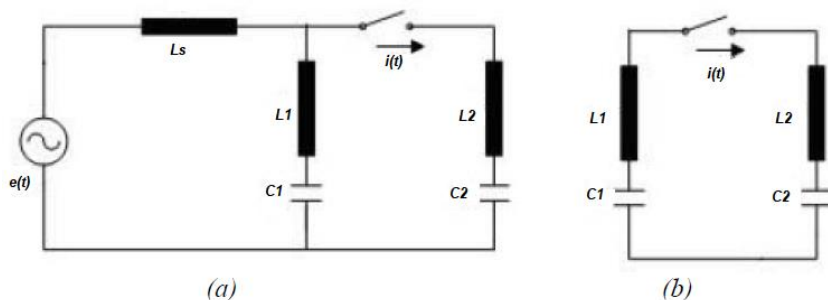
$$I_{udmax} = I_{Cn} \sqrt{2} \left( \sqrt{X_C/X_L} \right) = I_{Cn} \sqrt{2} \left( \sqrt{S_{SC}/Q_C} \right) \quad (6)$$

odnos udarne i nominalne struje računa se na osnovu sledećeg izraza:

$$\frac{I_{udmax}}{I_{Cn}} = \sqrt{\frac{2S_{SC}}{Q_C}} = \sqrt{\frac{2x\sqrt{3}x11x10^3x31.5x10^3}{2x10^6}} = 24.48 \quad (7)$$

Gde je  $I_{udmax}$  udarna struja,  $I_{Cn}$  nominalna struja kondenzatorske baterije,  $S_{SC}$  snaga kratkog spoja u tački u kojoj se povezuje kondenzatorska baterija,  $Q_C$  reaktivna snaga kondenzatorske baterije,  $X_L$  reaktansa na mestu priključka kondenzatorske baterije i  $X_C$  reaktansa kondenzatora. Odnos od 24,48 ima se u svim trafostanicama, jer su sve kondenzatorske baterije sa usvojenim regulacionim stepenima veličine 2 MVAR. Pored toga, treba napomenuti da je ovde prikazan najkritičniji slučaj jer je korišćena vrednost maksimalne struje kratkog spoja u 11 kV mreži od 31,5 kA. Kako je odnos od 24,48 manji od standardom propisane vrednosti 100, jasno je da nema potrebe za instaliranjem dodatne prigušnice na red sa kondenzatorskom baterijom.

U drugom slučaju, kada se kondenzatorska baterija priključuje paralelno sa već priključenim baterijama, udarna struja javlja se jer se već uključene baterije u tom trenutku ponašaju kao izvori napona koji preko relativno malih induktivnosti napajaju kondenzator koji se uključuje.



SLIKA 7 – EKVIVALENTNA ŠEMA (a) I UPROŠĆENA ŠEMA (b) ZA PRORAČUN STRUJE UKLJUČENJA KONDENZATORA NA MREŽU SA JEDNOM UKLJUČENOM BATERIJOM

Uprošćeno kolo dobija se eliminisanjem izvora napajanja  $e(t)$ , koji zbog relativno velike induktivnosti ( $Ls \gg LI$ ), stvara komponentu struje uključenja, znatno niže vrednosti i niže sopstvene učestanosti u odnosu na onu koja potiče od susednog kondenzatora  $C_1$ , i koja se zbog toga može zanemariti, pa je udarna struja:

$$I_{udmax} = \sqrt{2}I_{Cn2} \frac{X_{C2}}{X_C} \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{X_L X_C}} \quad (8)$$

Gde je  $e(t)$  fazni napon mreže,  $I_{udmax}$  udarna struja,  $U$  fazni napon,  $L$  i  $X_L$  ukupna induktivnost i induktivna reaktansa kola,  $C_2$  i  $X_{C2}$  su ukupna kapacitivnost i kapacitivna reaktansa kondenzatora koji se uključuje,  $Q_{C1}$  reaktivna snaga stepena koji je potrebno uključiti,  $Q_{C2}$  reaktivna snaga već priključenih stepena,  $C$  i  $X_C$  ukupna kapacitivnost i ukupna kapacitivna reaktansa kola koja se računa na osnovu sledećeg izraza:

$$X_C = 3U^2 \left( \frac{1}{Q_{C1}} + \frac{1}{Q_{C2}} \right) 10^{-6} \quad (9)$$

U tabelama 3 i 4 prikazani su rezultati proračuna udarne struje. Pretpostavljeno je da se kondenzatorska baterija priključuje na 11 kV mrežu preko kabla reaktanse  $0,09 \Omega/km$  i dužine 15 m. Razmatrani su slučajevi kada je uključeno 2 MVar, 4 MVar ili 6 MVar i kada se dodatno uključuje 2 MVar.

TABELA 3 – REZULTATI PRORAČUNA UDARNE STRUJE PRI UKLJUČENJU DODATNOG STEPENA KONDENZATORSKE BATERIJE

Qc1 (MVar)	Qc2 (MVar)	Ic1 (A)	Ic2 (A)	x (ohm/km)	L (m)	Xl (ohm)	U (V)	XC (ohm)	IS (A)	IS/Ic1	IS/Ic2
2.00	2.00	104.97	104.97	0.09	15.00	0.0027	6350.85	121.00	15713.48	149.69	149.69
4.00	2.00	209.95	104.97	0.09	15.00	0.0027	6350.85	90.75	18144.37	86.42	172.85
6.00	2.00	314.92	104.97	0.09	15.00	0.0027	6350.85	80.67	19245.01	61.11	183.33

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli iznad, vidi se da je odnos udarne i nominalne struje kondenzatorske baterije veći od 100 u svim slučajevima, što znači da je potrebno vezati prigušnicu na red sa kondenzatorskom baterijom kako bi se ograničila vrednost udarne struje. U tu svrhu, upotrebiće se prigušnica od 0,1 mH.

TABELA 4 - REZULTATI PRORAČUNA UDARNE STRUJE PRI UKLJUČENJU DODATNOG STEPENA KONDENZATORSKE BATERIJE SA PRIGUŠNICOM VEZANOM NA RED

Qc1 (MVar)	Qc2 (MVar)	Ic1 (A)	Ic2 (A)	x (ohm/km)	LR (mH)	XR (ohm)	U (V)	XC (ohm)	IS (A)	IS/Ic1	IS/Ic2
2.00	2.00	104.97	104.97		0.10	0.03	6350.85	121.00	4606.59	43.88	43.88
4.00	2.00	209.95	104.97		0.10	0.03	6350.85	90.75	5319.23	25.34	50.67
6.00	2.00	314.92	104.97		0.10	0.03	6350.85	80.67	5641.90	17.92	53.75

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 4, vidi se da je odnos udarne i nominalne struje smanjen, i da je manji od 100.

Proračun urađen sa prigušnicom predstavlja kritičniji slučaj od onog koji će se imati u praksi, obzirom da se prema analizi viših harmonika na red sa kondenzatorskom baterijom vezuje prigušnica čija je induktivnost značajno veća od 0,1 mH.

## ZAKLJUČAK

U radu je prezentovana metodologija za izbor kondenzatorskih baterija namenjenih za kompenzaciju reaktivne snage u 11 kV mreži, sa ciljem da se faktor snage drži iznad vrednosti od 0,95. Prikazani su principi za izbor ukupne snage baterije, kao i za izbor broja i veličine regulacionih stepena, i na osnovu toga date su preporuke za kompenzaciju reaktivne snage u tipskim trafostanicama 66/11 kV.

Pored toga, analizirani su i negativni efekti priključenja kondenzatorskih baterija na mrežu i date su preporuke za prigušenje viših harmonika i ograničenje udarne struje koja se javlja pri uključanju svakog regulacionog stepena kondenzatorske baterije.



## LITERATURA

1. EPE-KM-LTC-622-2012-0021 – Capacitor banks – Optimizations
2. EPE-KM-LTC-622-2012-0016 – Distribution System Development – Operating Philosophy
3. EPE-KM-LTC-622-2012-0019 – Method statement for Measurement
4. EPE-KM-LTC-622-2012-0020 – Measurement Report
5. IEEE 519 – Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
6. IEC 61000-2-2 – Elektromagnetna kompatibilnost (EMC) -Deo 2-2: Okruženje – Nivoi kompatibilnosti za kondukcione smetnje na niskim frekvencijama i prenos signala u javnim niskonaponskim sistemima za napajanje
7. EN 50160 – Karakteristike napona isporučene električne energije iz javnih električnih mreža
8. IEC 60871-1 – Paralelno vezani kondenzatori za energetske sisteme naizmenične struje naznačenog napona iznad 1000 V – Deo 1: Opšte
9. Vuković G, Milojević V i Đurišić Ž, 2011, „Naprezanje kondenzatorske baterije pri kompenzaciji reaktivne snage”, INFOTEH-JAHORINA Vol 10, Ref. D-23,382-386.