

Kompenzacija reaktivne energije u trafostanicama

Velemir Gavrilović
d.o.o. "Elmont" Dvorovi
Bijeljina, BiH
velemirgavrilovic@yahoo.com

Aleksandar Simović
Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Istočnom Sarajevu
Istočno Sarajevo, BiH
aleksandar.simovic@etf.unssa.rs.ba

Sažetak— U industriji i domaćinstvu postoji veliki broj potrošača koji zahtijevaju reaktivnu energiju. Takvi potrošači sadrže elektromotorne pogone sa asinhronim mašinama, transformatore ili prigušnice. Napajanje reaktivnom energijom iz mreže povlači niz negativnih efekata (povećano strujno opterećenje svih elmenata u distributivnom sistemu i instalacijama do mjesta potrošnje, povećani padovi napona, povećani gubici aktivne energije). U ovom radu opisana je kompenzacija reaktivne energije u trafostanicama. Takođe su opisani načini kompenzacije i svi elementi potrebni za kompenzaciju. Dat je primjer kompenzacije u trafostanici vodovoda i kanalizacije u Bijeljini.

Ključne riječi—trafostanica; reaktivna energija; kompenzacija reaktivne energije u trafostanicama

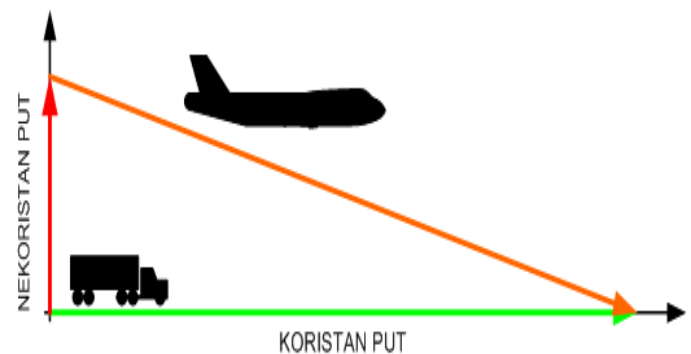
I. UVOD

Veći dio reaktivne energije može se dobiti ekonomičnije, upotrebom kondenzatorskih baterija. Pri tome kondenzatorske baterije treba ugraditi neposredno uz velike potrošače reaktivne energije ili što bliže mjestu potrošnje. Kompenzacijom reaktivne energije smanjuje se prividna snaga, odnosno struja u priključnim vodovima potrošača. Na taj način rasterećuju se generatori, transformatori i vodovi od proizvodnje, odnosno prenosa reaktivne energije, a industrija znatno smanjuje troškove za prekomjerno preuzetu reaktivnu energiju, jer su je pomoću kompenzacionih baterija kondenzatora proizveli u svom postrojenju [1]. Prekomjerna kompenzacija stvara slične negativne efekte kao i podkompenzovana potrošnja, jer se samo mijenja smjer toka reaktivne energije. Iz tog razloga potrebno je optimizovati kapacitet baterije kondenzatora, a u slučaju varijabilne potrošnje reaktivne energije koriste se sistemi za dinamičku kompenzaciju [2]. Kondenzatori se široko primjenjuju u elektroenergetskim sistemima za kontrolu napona, korekciju (opravak) faktora snage, filtriranje i kompenzaciju reaktivne energije. Sa ekspanzijom nelinearnih opterećenja i širenjem viših harmonika, mogućnost paralelne i redne rezonanse između sistema i kondenzatora na harmonijskim frekvencijama je postala briga za mnoge inženjere elektrotehnike [3].

II. REAKTIVNA ENERGIJA

Reaktivna energija je dio utrošene energije koji se ne pretvara u koristan rad. Na primjer, da biste se prevezli avionom od jednog mjesta do drugog, avion mora da uzleti,

dostigne neku visinu na kojoj leti, i da konačno sleti na aerodrom (Sl. 1). Koristan put bi bio dužina pravca u kome se avion kretao, a sa stanovišta putnika, nekoristan onaj dio puta aviona dok se penjao na zadata visinu leta, i sa nje se spuštao do zemlje. Poznato je da avion mora da leti na određenoj visini i to je neizbježna činjenica [1].



Slika 1. Koristan i nekoristan put

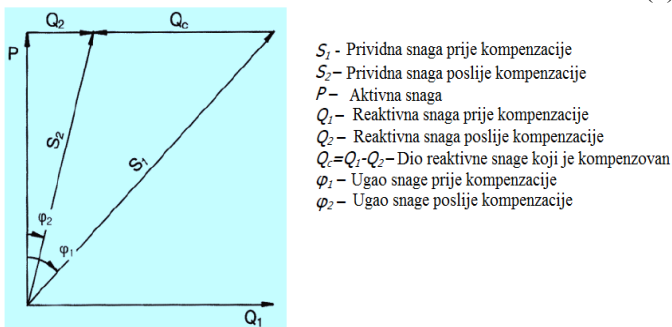
U oblasti potrošnje električne energije, osim potrošnje aktivne energije postoje potrošači koji za svoj normalan rad koriste i reaktivnu energiju. Najpoznatiji potrošači reaktivne energije su elektromotori i transformatori. Sa druge strane postoje i uređaji koji koriste reaktivnu energiju suprotnog smjera koji poništavaju (kompenzuju) prethodno pomenutu reaktivnu energiju. Najpoznatiji uređaji takvih osobina su kondenzatorske baterije koje se instaliraju lokalno (na mjestu potrošača), tako da se potrošači snabdijevaju potrebnom reaktivnom energijom za rad npr. motora, ali se ona i kompenzuje kondenzatorom tako da reaktivna energija ne ide dalje od potrošača, tj. ne prolazi kroz brojilo električne energije.

III. KOMPENZACIJA REAKTIVNE ENERGIJE

Baterijom kondenzatora vrši se kompenzacija dijela reaktivne energije koja potiče od osnovnog harmonika struja i napona (reaktivna energija), ali ona takođe utiče i na tokove snaga viših harmonika. U klasičnom proračunu kompenzacije reaktivne energije cilj je određivanje instalisane snage baterije, njene lokacije (ako se ne radi o centralnoj kompenzaciji) i određivanju koraka uključivanja pojedinih stepeni ako se vrši dinamička kompenzacija. Potrebna snaga baterije kondenzatora Q_C u slučaju da su poznati aktivna i reaktivna

snaga, P i Q potrošača prije kompenzacije i željeni faktor snage nakon kompenzacije se može proračunati pomoću izraza (1), koji proističe iz vektorskog dijagrama snaga potrošača prikazanog na Sl. 2 [4].

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (1)$$



Slika 2. Promjena faktora snage pri kompenzaciji reaktivne snage

Često nisu poznati profili opterećenja aktivne i reaktivne energije, već su raspoloživi samo podaci o utrošenoj aktivnoj i reaktivnoj energiji. Ako se obračun vrši na mjesečnom nivou, u tom slučaju proračun potrebne snage baterije kondenzatora vrši se prema jednačini:

$$Q_k = k \cdot P_{sr} \cdot (tg \varphi_1 - tg \varphi_2) \quad (2)$$

ili

$$Q_k = k \cdot \frac{W_a}{t} \cdot (tg \varphi_1 - tg \varphi_2) \quad (3)$$

gdje P_{sr} predstavlja srednje mjesečno aktivno opterećenje, W_a utrošenu aktivnu energiju za najopterećeniji mjesec, t je broj sati u tom mjesecu, k koeficijent koji ima vrijednosti od 1,05 do 1,15, φ_1 je prosječni ugaon snage prije kompenzacije, a φ_2 prosječni ugaon snage nakon kompenzacije.

Kompenzacijom reaktivne energije na priključcima potrošača smanjuje se ili potpuno eliminiše potreba za preuzimanjem reaktivne energije iz elektroenergetskog sistema (EES), jer se reaktivna energija potrebna za napajanje potrošača generiše u blizini samog potrošača. Zbog toga se smanjuje i struja u priključnom vodu, koja se nakon kompenzacije može proračunati prema jednačini 4.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U_n} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}U_n} \quad (4)$$

Ugradnjom kompenzacionih uređaja postižu se sljedeći pozitivni tehnički efekti:

- smanjuje se prividna snaga potrošača, pa se rasterećuju vodovi i ostalih elemente sistema i produžava se njihov životni vijek;
- poboljšavaju se naponski uslovi u distributivnoj mreži;
- manje je opterećenje mjernih uređaja, prekidača, osigurača i zaštitnih uređaja;
- smanjuju se gubici u distributivnom i prenosnom dijelu EES.

Pozitivni tehnički efekti kompenzacije reaktivne energije su motivisale distributivne kompanije da uvedu visoke cijene naplate prekomjerno preuzete reaktivne energije, koja se u

elektrodistributivnim preduzećima naplaćuje za dva tarifna stava. Prema važećim propisima prekomjerno preuzeta reaktivna energija se obračunava, ako je faktor snage ispod 0,95. Industrijski potrošači plaćaju račune za prekomjerno preuzetu reaktivnu energiju. Kompenzacijom reaktivne energije smanjuju se troškovi računa za električnu energiju, što je osnovni motiv prije svega industrijskih potrošača da vrše kompenzaciju reaktivne energije.

Troškovi za prekomjerno preuzetu reaktivnu energiju po višoj tarifi TR_{QV} (NJ/mjesec) su:

$$TR_{QV} = W_{RV} \cdot (tg \varphi_1 - tg \varphi_{od}) \cdot C_{QV} \quad (5)$$

Troškovi za prekomjerno preuzetu reaktivnu energiju po nižoj tarifi TR_{QN} (NJ/mjesec) su:

$$TR_{QN} = W_{RN} \cdot (tg \varphi_1 - tg \varphi_{od}) \cdot C_{QN} \quad (6)$$

gdje su: $\cos \varphi_{od}$ faktor snage ispod kojeg se plaća reaktivna energija (koji iznosi 0.95); C_{QV} , C_{QN} cijena (NJ/kVArh) reaktivne energije po višoj i nižoj tarifi, respektivno.

Ako je kompenzacija izvedena tako da je faktor snage $\cos \varphi_k = \cos \varphi_{od} = 0.95$, mjesečna ušteda za reaktivnu energiju U_{Qmes} (NJ/ mjesec) iznosi:

$$U_{Qmes} = TR_{QV} - TR_{QN} \quad (7)$$

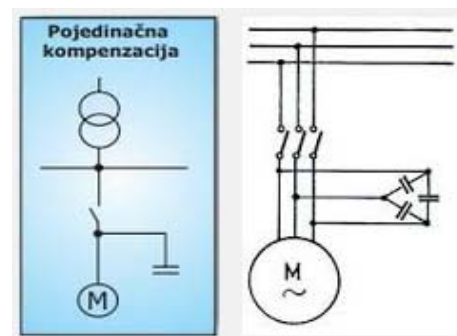
Postoje četiri načina kompenzacije reaktivne energije, i to:

- pojedinačna kompenzacija;
- grupna kompenzacija;
- centralna kompenzacija i
- mješovita kompenzacija.

S obzirom da se pojedinačna kompenzacija upotrebljava u trafostanicama, biće detaljnije i opisana. Pojedinačna kompenzacija reaktivne energije se upotrebljava kod transformatora, elektromotora, fluo svjetiljki (Sl. 3). Osnovne prednosti pojedinačne kompenzacije su:

- kondenzatori za kompenzaciju se ugrađuju neposredno na priključke potrošača;
- zaštitni i prekidački elementi su zajednički za bateriju i potrošač.

Kod pojedinačne kompenzacije kondenzatori se vezuju u trougao.



Slika 3. Primjer pojedinačne kompenzacije

Pojedinačna kompenzacija se koristi uz uslov da je:

- opterećenje stalno (relativno velika srednja potrošnja);
- faktor snage približno stalan;
- relativno dugo trajanje uključenosti potrošača.

IV. KOMPENZACIJA REAKTIVNE ENERGIJE U TRAFOSTANICAMA

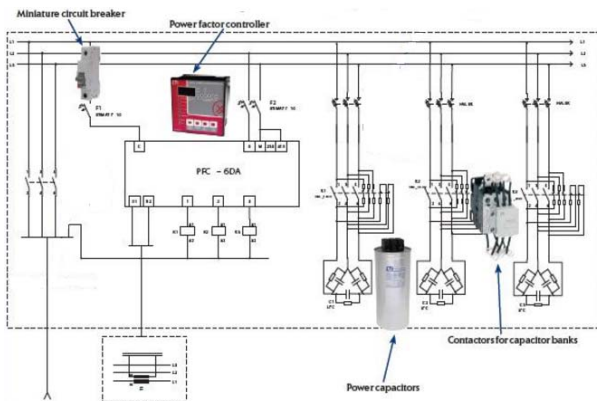
U trafostanicama se primjenjuje pojedinačna kompenzacija reaktivne energije. Pojedinačna kompenzacija se primjenjuje u zavisnosti od primarnog napona. Najznačajniji elementi koji se koriste za kompenzaciju reaktivne energije u trafostanicama su:

- kondenzatorska baterija (Power capacitors);
- kondenzatorski sklopnik (Contactor for capacitor banks);
- automatski osigurač (Circuit breaker);
- kontrolor faktora snage (Power factor controller).

Na Sl. 4 prikazana je šema ormara sa elementima za kompenzaciju, dok na Sl. 5 prikazana je jednopolna šema ormara sa navedenim elementima.



Slika 4. Šema ormara sa elementima za kompenzaciju



Slika 5. Jednopolna šema ormara

Najčešće upotrebljavani kondenzatori za kompenzaciju reaktivne energije u trafostanicama su MKP (MKK) kondenzatori, koji se sastoje od aluminijumske posude u kojoj se nalazi nadpritisni osigurač (Sl. 6). Impregnisani su mekanom smolom ili inertnim gasom (kiseonikom). Troškovi proizvodnje i materijala su znatno niži u odnosu na druge kondenzatore [5].



Slika 6. Izgled MKP (MKK) kondenzatora

Potrebna snaga kondenzatora za kompenzaciju reaktivne energije može se odrediti na nekoliko načina:

- poznavanjem parametara potrošača u pogonu može se izračunati njihova reaktivna snaga na osnovu koje se određuje snaga kondenzatorskih baterija;
- primjenom specijalnih mjernih uređaja, mrežnih analizatora, može se u toku rada pogona izmjeriti reaktivna energija koju povlači pogon, pa se na osnovu mjerenja može odrediti potrebna snaga kondenzatorskih baterija;
- na osnovu mjesečnog računa za utrošenu električnu energiju. Na osnovu obračunatog utroška aktivne i reaktivne energije, kao i angažovane snage može se odrediti potrebna snaga kondenzatorskih baterija za kompenzaciju reaktivne energije u pogonu [5].

Ugradnjom kondenzatorskih baterija ne postiže se samo ekonomski efekat umanjenja računa za utrošenu reaktivnu energiju, već se postiže i mnogi drugi efekti, kao što su:

- ✓ • povećanje raspoložive snage;
- ✓ • smanjenje gubitaka u prenosnim vodovima;
- ✓ • smanjenje Džulovih gubitaka;
- ✓ • smanjenje padova napona.

Regulator faktora snage se odlikuje jednostavnim upravljanjem baziranim na displeju sa izbornikom i jednostavnim tekstom (Sl. 7). Simboli i tekst su razumljivi i kombinovani sa jasnim prikazom. Bitno je istaći opciju da korisnik sam može podesiti sekvencu regulatora u dodatku sa unaprijed datim sekvencama i time omogućiti rad regulatora u svim vrstama kompenzacijskih uređaja. Prikaz različitih mrežnih parametara i pohranjenih veličina kompenzacije omogućava jednostavnu analizu grešaka i nadzor sastava [5].

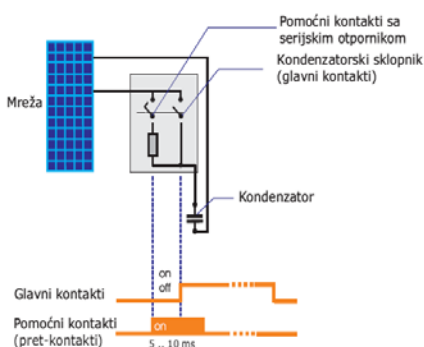


Slika 7. Izgled regulatora faktor snage

- Osnovna struktura regulatora sadrži sljedeće osobine:
- šest ili dvanaest izlaza (zavisno od izvedbe);
 - relejne ili tranzistorske izlaze;
 - dvanaest unaprijed isprogramiranih sekvenci sa nadzorom za samopodešavanje;
 - editor sekvenci omogućava korisniku da sam podese sekvencu regulacije;
 - menijem vođeno upravljanje i prikaz;
 - osvjtljen grafički dispjel;
 - četvorokvadratno upravljanje;
 - prikaz različitih mrežnih parametara;
 - pohranjivanje maksimalnih mrežnih parametara i podataka o sklapanjima kondenzatorskih sklopnika;
 - ručno/automatsko upravljanje;
 - programiranje stalnih stepeni i mogućnost neuključivanja pojedinih stepeni;
 - beznaponsko isključivanje;
 - otkrivanje grešaka za različita stanja i prikaz poruka o smetnjama.

Kada se kondenzator uključi na AC sistem, nastaje rezonantni strujni krug koji je u većoj ili manjoj mjeri prigušen. Kod uklapanja kondenzatora koji se nalazi u kompenzacijskom uređaju sa već uključenim kondenzatorima, tranzijentna uklopna struja je do 200 puta veća od nominalne struje. Velike vrijednosti struje uklapanja mogu dovesti do nagorijevanja sklopnikovih glavnih kontakata, a štetne su i za kondenzatore. U automatskim kompenzacijskim uređajima potrebno je koristiti sklopnike koji prigušuju struju uklapanja. Redukcijom struje uklapanja takođe se izbjegavaju tranzijentni i naponski padovi [5].

U ovim sklopnicima se koriste pret-kontakti sa funkcijom ograničavanja struje uklapanja. Svakom pret-kontaktu u seriju je spojen otpornik za ograničavanje struje uklapanja kondenzatora. Pret-kontakti se zatvaraju prije glavnih kontakata, a otvaraju se kad su ovi sigurno zatvoreni. Ovo svojstvo sklopnika garantuje njihovo učinkovito i ujednačeno funkcionisanje tokom njihovog vijeka trajanja. Na Sl. 8 prikazana je jednopolna šema i izgled kondenzatorskog sklopnika.



Slika 8. Jednopolna šema i izgled kondenzatorskog sklopnika

U tabeli I prikazan je način izbora sklopnika na osnovu snage kondenzatora.

TABELA I. STRUJA SKLOPNIKA NA OSNOVU SNAGE KONDENZATORA

| Nominalna struja sklopnika (A) | Nominalna snaga kondenzatora (kVAr) |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| 18 | 12,5 |
| 24 | 20 |
| 32 | 25 |
| 50 | 33,3 |
| 62 | 50 |
| 74 | 75 |

Za razliku od topljivih osigurača koji prekidaju struju kratkog spoja razaranjem žice, kod automatskih prekidača strujni krug se prekida razdvajanjem kontakata bez razaranja prekidača, pa se stoga isti može koristiti više puta. Ove vrste prekidača koriste se za zaštitu prijemnika i provodnika za velike nazivne struje. Prvenstveno su namjenjeni za zaštitu malih prijemnika, gdje usljed pogrešnog rukovanja dolazi do pojave struja preopterećenja i kratkih spojeva.

Pored automatskih osigurača sa zavrtanjem koji se mogu uvrnuti u podnožja instalacionih osigurača tipa *D*, danas su u upotrebi automatski prekidači za ugradnju na *DIN* šine niskonaponske table.

Prilikom pojave prevelike struje bimetalni štap se krivi i preko skakavice isključuje kontakte. Struja kratkog spoja djeluje na bimetal, ali kako je bimetalu potrebno određeno vrijeme da se zagrije i iskrivi, u cilju brzog isključenja struje kratkog spoja ugrađuje se elektromagnet. Elektromagnet se aktivira u momentu pojave nedozvoljene vrijednosti struje i djeluje na kotvu preko koje se isključuje strujni krug. Poslije isključenja, osigurač se ponovo aktivira pritiskom na dugme za uključenje. Osigurači za kondenzator trebaju biti dimenzionisani od 1,6 do 1,8 nominalne struje sklopnika.

V. KOMPENZACIJA REAKTIVNE ENERGIJE U TRAFOSTANICI VODOVOD I KANALIZACIJA U BIJELJINI

Na zahtjev firme vodovod i kanalizacija iz Bijeljine, zbog velike potrošnje reaktivne energije da se ista kompenzuje, izvršena je kompenzacija u njihovoj trafostanici. Trafostanica je blindirana nominalne snage 630 kVA (Sl. 9).



Slika 9. Izgled trafostanice

Kompenzacija u pomenutoj trafostanici vodovoda i kanalizacije je rađena u periodu od 17.12.2015. do 20.12.2015. sa svim analizama i proračunima, kao i

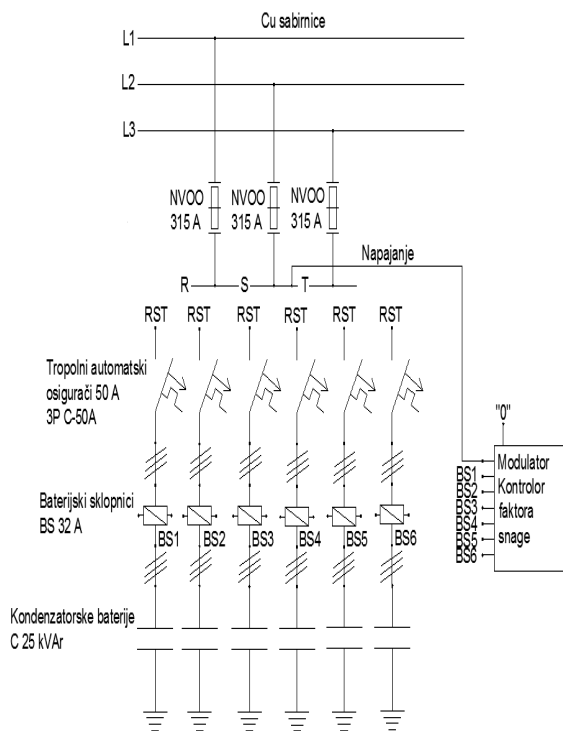
praktičnim radovima. Obilazak terena i analiza obavljani su 17.12.2015., dok su 18.12.2015. rađeni proračuni vezani za kompenzaciju. Narednog dana, 19.12.2015. šemiran je ormar, dok je 20.12.2015. izvršeno žičarenje u trafostanici.

Potrošnja reaktivne energije bila je 150 kVAr . Odlučeno je da se za kompenzaciju koriste kondenzatorske baterije snage 25 kVAr . Postavljeno je šest kondenzatorskih baterija, u svaku fazu po dvije (Sl. 10).

Na osnovu snage izabranih kondenzatorskih baterija birani su kondenzatorski (baterijski) sklopnici *BS*. Iz tabele I (prethodno poglavlje) može se vidjeti da je za snagu 25 kVAr kondenzatorskih baterija, potreban baterijski sklopnik nominalne struje 32 A . Takođe su izabrani trolpolni automatski osigurači tipa *C*. Njihova nominalna struja treba da iznosi 1,6 nominalne struje sklopnika, pa su korišteni trolpolni automatski osigurači tipa *C* nominalne struje 50 A (u oznaci *3P C-50A*). Na polove osigurača doveden je napon sa sve tri faze (*RST*). Modulator (kontrolor faktora snage) postavljen je sa šest izlaza (*BS1, BS2, BS3, BS4, BS5, BS6*), s obzirom da je potrebno upravljati sa šest kondenzatorskih sklopnika. Napajanje modulatora je sa druge faze (*L2* ili *S*), jer se u njoj nalazi strujni mjerni transformator. Korišteni modulator je isprogramiran za sljedeće karakteristike:

- nominalni napon 230 V ;
- nominalnu reaktivnu snagu 150 kVAr ;
- nominalnu frekvenciju 50 Hz ;
- nominalnu struju 13 A .

Ožičenje date veze je sa *P/F* provodnikom 10 mm^2 .



Slika 10. Jednopolna šema kompenzacije

Nakon izvršene kompenzacije, pristupilo se mjerenju aktivne i reaktivne snage. Mjerenje se obavljalo instrumentom proizvođača Metrel (Sl. 11).



Slika 11. Izgled instrumenta za mjerenje

Mjerenjem se utvrdilo da je potrošnja reaktivne energije smanjena oko 95% , što znači da potrošnja reaktivne snage trenutno iznosi oko 143 kVAr . Ovim je utvrđeno da je kompenzacija uspješno izvršena.

VI. ZAKLJUČAK

Parametri kvaliteta napona su lokalni parametri, a i vremenski promjenjivi zbog fluktuacija tokova snaga u distributivnom i prenosnom sistemu, promjena uklopnog stanja, promjena otcjepa u regulacionim trafostanicama, kvarova u mreži i slično. Vremenska zavisnost i lokalnost parametara napona zahtijeva kontinuirana mjerenja na užem vremenskom horizontu i više mjernih tačaka, u skladu sa standardima i preporukama proizvođača kako bi se pravilno procijenio uticaj viših harmonika na kompenzaciju reaktivne snage.

Kompenzacijom reaktivne energije u trafostanicama se postižu pozitivni efekti kao što su povećanje efikasnosti trafostanice i redukcija zagađenja trafostanice. U radu su opisane komponente koje se primjenjuju za kompenzaciju u trafostanicama. Sve komponente su digitalne i automatske i njihova cijena nije mnogo velika, tako da se kompenzacija isplati sa ekonomskog aspekta. Primjenom savremenih uređaja utvrđeno je da se komponente mogu programirati i da kompenzaciju mogu svi pratiti.

U primjeni su mnogi standardi vezani za kompenzaciju, a neki od njih su IEC 555, IEC 61000, EN 6055, IEEE 519 itd. [1]. Ugradnjom kompenzacionih uređaja postižu se sljedeći pozitivni tehnički efekti: smanjuje se prividna snaga potrošača, pa se rasterećuju vodovi i ostali elementi sistema i produžava se njihov životni vijek; poboljšavaju se naponski uslovi u distributivnoj mreži; manje je opterećenje mjernih uređaja, prekidača, osigurača i zaštitnih uređaja; smanjuju se gubici u distributivnom i prenosnom dijelu EES.

LITERATURA

- [1] Željko Despotović, "Uticaj viših harmonika u napojnoj mreži i njihovo potiskivanje", Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija-Višer, Beograd.
- [2] N. Rajaković, D. Tasić, "Distributivne i industrijske mreže", Akademski misao, Beograd, 2008.
- [3] EATON Powering Business Worldwide, "Power Factor Capacitors and Harmonics Filters", 2011.
- [4] Željko Đurišić, "Kompenzacija reaktivne snage potrošača u uslovima harmonijskih izobličenja napona i struja", ETF Beograd, Beograd 2010.
- [5] ERG, "Niskonaponski uređaji za kompenzaciju reaktivne snage", Zagreb 2010.
- [6] Bojana Novaković, Srđan Jokić, Goran Vuković, Petar Matić, "Mjere za eliminisanje uticaja kompenzacije reaktivne snage na kvalitet električne energije u industrijskim postrojenjima sa prisutnim višim harmonicima", Infoteh Jahorina, Vol. 9, No. D-4, pp. 371-375, 2010.

ABSTRACT

Reactive power compensation is very important for the consumer, because the compensation reduces the consumption of energy and the reactive energy is useless energy. Compensation is applied to consumers such as motors, transformers, fluorescent lighting, etc. When transformers are applied capacitor bank for compensation. Reactive power compensation in substations to achieve the following positive effects: An increase in the efficiency of power stations and substations pollution reduction. This paper describes the components applied for compensation in substations. All components are digital and automatic and their price is not very large, so that compensation is worth it economically. Using modern devices was found that components can be programmed and that compensation be traced all. In this paper describes the reactive power compensation in power stations with a concrete example of the substation water supply and sewage in Bijeljina. provides a description of all the elements needed for the compensation.

REAKTIVE POWER COMPENSATION AT THE SUBSTATION

Velemir Gavrilović
Aleksandar Simović