

Uticaj kondenzatorskih baterija na struju opterećenja distributivnih transformatora

ALEKSANDAR S. JOVIĆ, Elektroprivreda Srbije,
Odsek za tehničke usluge, Leskovac
LIDIJA M. KORUNOVIĆ, Univerzitet u Nišu,
Elektronski fakultet, Niš

Stručni rad
UDC: 621.316.018.3
DOI: 10.5937/tehnika1704554J

Ovaj rad se bavi analizom uticaja kondenzatorskih baterija za kompenzaciju reaktivne energije na ukupnu struju opterećenja distributivnih transformatora 10/0,4 kV/kV. Analiza se odnosi na distributivno područje Pogona Leskovac koji obuhvata grad Leskovac i poslovnice koje su u njegovom sastavu. Za razliku od prethodno objavljene literature koja razmatra prekomerno utrošenu reaktivnu energiju, u radu je prvenstveno posmatran nivo reaktivne snage na niskonaponskoj strani transformatora, uz uvažavanje prisustva kondenzatorskih baterija. Merenjima su ustanovljena oba teorijski moguća stanja: kompenzacija je adekvatna ili neadekvatna. Pod neadekvatnom kompenzacijom reaktivne snage smatrani se slučajevi nedovoljne i prekomerne kompenzacije. Pod adekvatnom kompenzacijom smatrani su slučajevi kada reaktivna snaga osciluje oko vrednosti 0 kvar. Uveden je podslučaj adekvatne kompenzacije koji je nazvan uslovno adekvatna kompenzacija. Za sva četiri slučaja koja opisuju kompenzaciju reaktivne energije prikazani su rezultati proračuna relativne promene struje opterećenja na niskonaponskoj strani transformatora kada postoje kondenzatorske baterije u odnosu na stanje pre njihove ugradnje.

Ključne reči: transformator, kondenzatorske baterije, kompenzacija, struja opterećenja

1. UVOD

Preduzeća za distribuciju električne energije u okviru svojih transformatorskih stanica ugrađuju kondenzatorske baterije. Instalirane kondenzatorske baterije utiču na smanjenje ukupno preuzete reaktivne snage iz distributivne mreže. To znači da se njihovim prisustvom povećava propusna moć ove mreže, odnosno smanjuje se struja elemenata mreže (transformatori, kablovski i nadzemni vodovi, itd.) [1]. Takođe, prisustvo kondenzatorskih baterija na niskonaponskoj strani transformatora utiče i na povećanje napona, odnosno na poboljšanje naponskih prilika u distributivnoj mreži [2].

U prethodnoj deceniji na području Pogona Leskovac u distributivnim transformatorskim stanicama 10/0,4 kV/kV instalirano je ukupno 281 jedinica kondenzatorskih baterija. Njihova ukupno instalirana rea-

ktivna snaga iznosi 6875 kVA. Sve instalirane kondenzatorske baterije su fiksne snage i nisu pod sistemom automatski kontrolirane kompenzacije. U privatnim transformatorskim stanicama (TS) mogu se veoma često susresti sistemi automatski upravljive kompenzacije koji imaju tiristorski prekidane kondenzatore [2, 3]. Oni se popularno nazivaju sistemi dinamičke kompenzacije [4], a zbog obimnosti rezultata predmet ovog rada će biti samo merenja u TS sa fiksnim kondenzatorskim baterijama.

Na niskonaponskim sabirnicama transformatora 10/0,4 kV/kV u transformatorskim stanicama u kojima je prisutna fiksna kompenzacija reaktivne energije izvršena su merenja. Ona su sprovedena u toku dve godine, od januara 2015. do decembra 2016. godine kako bi se odredio uticaj kompenzacije na reaktivnu snagu i struju kroz transformator.

U prethodno objavljenoj literaturi, se kao jedan od glavnih ciljeva kompenzacije navodi minimizacija prekomerno utrošene reaktivne energije [1, 3], koja dovodi do smanjenja faktora snage ($\cos\varphi$) ispod 0,95. Imajući u vidu činjenicu da su analizirani aktuelni sistemi dinamičke kompenzacije koji se koriste u Pogonu Leskovac, koji su isključivo instalirani u

Adresa autora: Aleksandar Jović, Elektroprivreda Srbije, Odsek za tehničke usluge, Leskovac, Stojana Ljubića 16

e-mail: ekvivalent2013@gmail.com

Rad primljen: 14.03.2017.

Rad prihvaćen: 12.07.2017.

transformatorskim stanicama u privatnom vlasništvu, tako podešeni da postižu da faktor snage bude približno jednak jedinici, u ovom radu je uveden uslov da je kompenzacija reaktivne snage i energije adekvatna ako vrednosti reaktivne snage (Q) osciluju oko 0 kvar (u granicama ± 5 kvar). Ovaj uslov je vođen trenutnom praksom podešenja sistema dinamičke kompenzacije na terenu, a ne manje strogim uslovom, $\cos\varphi \geq 0,95$, kojim se prekomerno preuzeta reaktivna snaga koja se naplaćuje potrošačima, svodi na nulu.

Neadekvatna kompenzacija se na osnovu prethodnog ogleđa u tome što su vrednosti Q uvek značajno veće od nule ili uvek manje od nule. U prvom slučaju reč je o nedovoljnoj kompenzaciji, a u drugom o prekompenzaciji. U radu je uvedena i posebno analizirana i relativna promena struje kroz transformator nakon ugradnje kondenzatorskih baterija kao pokazatelj stanja kompenzacije i uticaja kompenzacije na gubitke u transformatoru.

2. OTOČNE KONDENZATORSKE BATERIJE

Pogon Leskovac u svom sastavu pored grada Leskovca obuhvata i manje poslovnice i to: Vučje, Turekovic, Manojlovac, Pečenjevaca i Grdelicu. U okviru Pogona Leskovac, kondenzatorske baterije su instalirane u 177 transformatorskih stanica (TS). Najveći broj kondenzatorskih baterija instaliran je u transformatorskim stanicama koje napajaju ruralna područja, tj. navedene poslovnice, i to 65,5 %, dok se manji broj nalazi u užem i širem gradskom jezgri (34,5 %). Međutim, ukupno instalirana snaga svih kondenzatorskih baterija u gradu je veća od snage kondenzatorskih baterija u poslovnicama i iznosi 4,403 Mvar.

Sa druge strane raspodela broja TS i ukupne instalirane snage transformatora u ruralnom i gradskom području je sledeća: u gradskom području je 61 transformatorskoj stanici nalaze se distributivni transformatori sa ukupnom instaliranom snagom od 38,13 MVA, dok je u ruralnom području ukupno instalirano 30,47 MVA u 116 transformatorskih stanica. Ove raspodele su opravdane ako se ima u vidu da je trend migracije stanovništva iz ruralnih područja u gradove i dalje prisutan. Zato su u gradskoj sredini najzastupljeniji transformatori snage 630 kVA koji su instalirani u ≈ 75 % transformatorskih stanica, i često su opterećeni približno naznačenim opterećenjem ili su čak preopterećeni, dok su u ruralnim područjima najzastupljeniji transformatori snage 250 kVA i manjih snaga i mahom su podopterećeni.

Kondenzatorske baterije naznačene snage 20 kvar instalirane su u najvećem broju (71) transformatorskih stanica i najviše učestvuju u kompenzaciji (40,1 %). Najčešća lokacija tih transformatorskih stanica je u ruralnom području. Nasuprot ovome, kondenzatorske

baterije naznačene snage 25 kvar kada su vezane po tri, 3x25 kvar, instalirane su u manjem broju TS (u njihovom broju 38), ali obezbeđuju drugo po redu učešće reaktivne snage u kompenzaciji sa 2850 kvar (38,4 %). Pri tome, skoro sve su instalirane u gradskom području. Ostale kondenzatorske baterije učestvuju u ukupnoj snazi kompenzacije sa 21,5 %.

Pojedine kondenzatorske baterije u transformatorskim stanicama različitih instaliranih snaga, mogu biti međusobno vezane na različite načine. Npr. kondenzatorske baterije snage 25 kvar povezane na pet različitih načina u Pogonu Leskovac, i to: 25 kvar, 2x25 kvar, 3x25 kvar, 4x25 kvar i 2x3x25 kvar. Analizom ukupnog učešća pojedinih kondenzatorskih baterija (bez obzira na način međusobnog vezivanja) u kompenzaciji reaktivne snage pokazuje se da baterije sa pojedinačnom snagom od 25 kvar učestvuju čak sa približno 60 %. Druge po redu su baterije snage 20 kvar sa učešćem od 21 %, dok sve ostale (10 kvar, 33 kvar, 40 kvar, 50 kvar i 75 kvar) učestvuju sa 19 %.

Nivoi opterećenja transformatora aktivnom i reaktivnom snagom, između ostalog, zavise i od kategorije potrošača koje oni napajaju. U radu je iskorišćena sledeća podela na kategorije potrošnje, koje napajaju distributivne transformatorske stanice 10/0,4 kV/kV, [5]: administrativna, trgovačka, industrijska potrošnja, domaćinstva u stambenim zgradama bez grejanja iz toplane (sa grejanjem električnom ili nekom drugom energijom), domaćinstva u stambenim zgradama sa grejanjem iz toplane, domaćinstva u individualnoj stambenoj gradnji bez grejanja iz toplane, mešovita potrošnja (kombinacija neke od prethodnih kategorija) i ruralna potrošnja. Poslednja kategorija je zastupljena u navedenim poslovnicama, dok su sve ostale kategorije karakteristične za gradsko područje.

Instaliranje kondenzatorskih baterija za kompenzaciju reaktivne energije je opravdano u onim TS koje napajaju kategorije potrošnje sa izraženom upotrebom uređaja i aparata koji za svoj rad zahtevaju veće angažovanje reaktivne snage iz distributivne mreže, što se najpreciznije određuje snimanjem dnevnih dijagrama aktivne i reaktivne snage. Sa druge strane, u nedostatku konkretnih dijagrama opterećenja na niskom naponu, što je slučaj Pogona Leskovac, poželjno je koristiti Tehničke preporuke ED Srbije [6], u kojima je za svaku naznačenu snagu transformatora data preporučena vrednost snage kondenzatorskih baterija za kompenzaciju reaktivne energije.

Treba istaći da je u mrežama u kojima postoje izvori viših harmonika, a koji poseduju kondenzatorske baterije, moguća pojava rezonancije [3]. Radi izbegavanja ove izuzetno štetne pojave, za pravilan izbor lokacija i snaga kondenzatorskih baterija, potrebna je harmonijska analiza koja podrazumeva

poznavanje harmonijskog spektra izvora viših harmonika. Pre ugradnje kondenzatorskih baterija u Pogonu Leskovac, ovakva analiza nije urađena.

Autori ovog rada su se bavili merenjem i analizom prisustva viših harmonika u niskonaponskim mrežama u ranijim istraživanjima, a deo rezultata je prezentovan u [7, 8]. Pregled vrednosti indikatora prisustva viših harmonika u strujama pojedinih kategorija potrošnje, totalnih i individualnih harmonijskih distorzija, dat je u [8].

Pokazano je da je prosečna vrednost ukupne harmonijske distorzije struje većine kategorija potrošnje koje su razmatrane i u ovom radu oko 9%. Kako postoji trend porasta upotrebe nelinearnih prijemnika, to je poželjno uraditi nova merenja i analize koje bi

obuhvatile i prisustvo viših harmonika u mrežama u kojima je izvršena kompenzacija.

Trenutna struktura instaliranih kondenzatorskih baterija u transformatorskim stanicama Pogona Leskovac prikazana je u tabeli 1. Podaci iz tabele prikazuju da je najveći broj kondenzatorskih baterija u gradskom i ruralnom području instalisan u TS u kojima su transformatori snage 630 kVA i to $\approx 45\%$ od ukupne snage svih kondenzatorskih baterija. Druge po redu su transformatorske stanice snage 250 kVA sa instaliranom snagom kondenzatorskih baterija od 1,54 Mvar, što predstavlja 22,4% ukupne snage kompenzacije. Potom slede TS sa transformatorima naznačene snage 400 kVA, sa $\approx 17\%$ snage kompenzacije, dok je u ostalim stanicama snaga baterija mnogo manja.

Tabela 1. Struktura instaliranih kondenzatorskih baterija u TS Pogona Leskovac

Naznačena snaga transformatora u TS (kVA)	100	160	250	400	2x400	630	2x630	400+630	1000	1250
Instalisana snaga kondenzatorskih baterija (kvar)	60	120	1540	1165	70	3075	350	150	100	250
Broj pojedinačnih kondenzatorskih baterija	5	10	73	38	3	121	12	6	4	10

S obzirom na to da su kondenzatorske baterije instalirane u periodu posle 2000. godine, izvršena je provera njihove funkcionalnosti i pokazalo se da je oko 91% baterija u funkcionalnom stanju, dok je manji broj, preostalih 9% neispravno. Ispravne kondenzatorske baterije obezbeđuju takođe približno 91% snage kompenzacije od ukupne snage svih instaliranih baterija.

3. NEADEKVATNA I ADEKVATNA KOMPENZACIJA

U cilju utvrđivanja realnih vrednosti aktivnih i reaktivnih snaga, izvršena su merenja u gradskom i ruralnom području na niskonaponskim stranama transformatora uz prisustvo kondenzatorskih baterija. Merenja su u području grada Leskovca izvršena prenosnim mernim uređajem, trofaznim analizatorom snage C.A 8332 [9]. Greške prilikom merenja aktivne i reaktivne snage ovim uređajem su $\pm 1\%$, dok je tačnost merenja napona i struje $\pm 0,5\%$. U manjem broju TS, isključivo onih koje se nalaze u ruralnim sredinama, a koje su razmatrane u ovom radu, već su bili instalirani merno informacijski sistemi MIS [10]. Podaci koje su snimili ovi sistemi preuzeti su radi analize predstavljene u ovom radu. Klasa tačnosti mernog uređaja MIS je 0,5% kod merenja napona i struje, a 1% kod merenja aktivne i reaktivne snage.

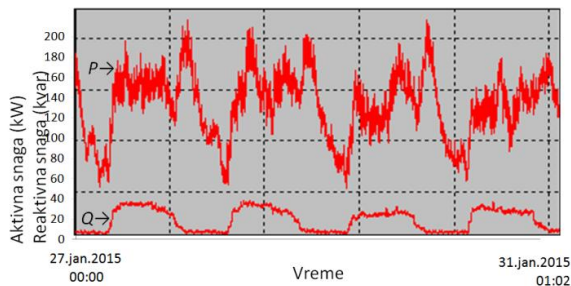
Pošto se potrošnja pojedinih kategorija značajno razlikuje po sezonama, analizirana su merenja izvršena tokom cele godine, tj. obuhvaćena su sva godišnja doba. Radi prezentacije, u radu su istaknuti i

komentarirani karakteristični slučajevi nivoa, pre svega reaktivne snage, koji su izmereni u pojedinim TS.

Tokom istraživanja, pronađene su tri transformatorske stanice sa instaliranim kondenzatorskim baterijama u kojima je reaktivna snaga uvek veća od nule (a prosečna vrednost veća od 5 kvar). To znači da nivo kompenzacije nije dovoljan za postojeće opterećenje u mreži. Jedna od gradskih transformatorskih stanica u kojoj je ovakvo stanje evidentirano je TS „7. Juli“ koja napaja mešovitu kategoriju potrošnje (administrativna 45%, domaćinstva u stambenim zgradama bez grejanja iz toplane 35% i trgovačka 20%), u kojoj su instalirane kondenzatorske baterije snage 40 kvar. Snimljeni tokovi trofazne aktivne, P , i reaktivne, Q , snage na niskonaponskoj strani transformatora ove TS prikazani su na slici 1, dok je analiza opterećenja po fazama [11] izostavljena i biće predmet nekog drugog rada.

Analizom dijagrama reaktivne snage zaključuje se da se porast reaktivne snage dešava od 7 h i traje do 20 h kad se javlja njen pad. Ovo potvrđuje dominantnost administrativne i trgovačke potrošnje u ukupnom opterećenju TS, jer se u tim kategorijama u toku radnih sati koristi veći broj uređaja manje snage koji iziskuju reaktivnu energiju (fluorescentno osvetljenje, kompjuteri, monitori, štampači, itd.). Međutim, u periodu od 20 h do 7 h nivo preuzete reaktivne snage iz distributivnog sistema je veoma mali, odnosno postojeće kondenzatorske baterije skoro potpuno zadovoljavaju potrebe potrošnje za ovom snagom. Najveća i

najmanja zabeležena vrednost reaktivne snage imerene u TS „7. Jul“ je 41,7 kvar i 8,2 kvar respektivno, dok je prosečana vrednost 22,8 kvar.

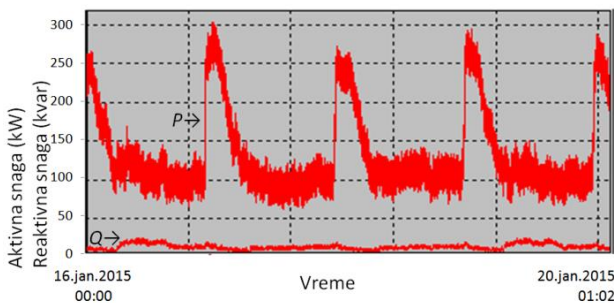


Slika 1 - Tokovi aktivne i reaktivne snage u TS „7. Jul“

Postojanje kondenzatorskih baterija smanjuje ukupnu struju opterećenja distributivnih transformatora, ali u razmatranoj TS ne onoliko koliko bi moglo, upravo zbog dela reaktivne snage koja se zbog potreba potrošača podmiruje iz distributivne mreže. Najverovatnije da su prilikom instalisanja kondenzatorske baterije zadovoljavale potrebe potrošača za reaktivnom snagom, ali da je zbog porasta potrošnje i/ili promene strukture potrošača sada situacija izmenjena.

Na gradskoj teritoriji pronađene su još dve transformatorske stanice u kojima je trenutna kompenzacija neadekvatna, a to su: TS „Koste Abraševića I“ i TS „Koste Abraševića II – T2“ koje napajaju domaćinstva u stambenim zgradama bez grejanja iz toplana, a u kojima su instalisani kondenzatori ukupne snage 2x20 kvar. Na slici 2 prikazana je promena aktivne i reaktivne snage u TS „Koste Abraševića II – T2“.

Sa ove slike se vidi da se reaktivna snaga menja u realativno uskim granicama (od 5,8 kvar do 25,3 kvar) u odnosu na prethodno analiziranu TS, bez izražene promene noću i danju. Sa druge strane dominantna je promena aktivne snage, i to u periodu koji počinje od 22 h kada se zbog niže tarife u domaćinstvima bez grejanja iz toplana masovno uključuju prvenstveno TA peći, ali i drugi uređaji relativno velike instalisane snage.



Slika 2 - Tokovi aktivne (P) i reaktivne (Q) snage u TS „Koste Abraševića II – T2“

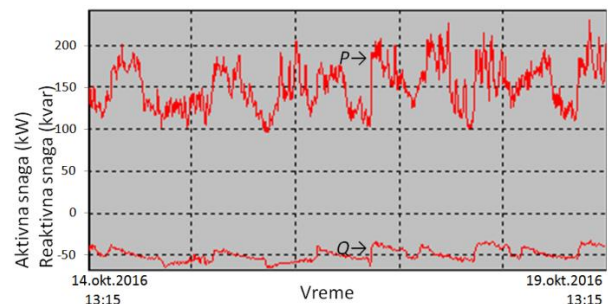
Na osnovu prethodno prikazanih slika, analizom samo vrednosti reaktivne snage, može se zaključiti da je kompenzacija nedovoljna. Međutim, treba istaći

činjenicu da je na niskonaponskoj strani transformatora sa ovakvom kompenzacijom ispunjen uslov $\cos\phi > 0,95$ [1, 3], s obzirom na to da je prosečna vrednost odnosa Q/P tokom merenja samo 9,62 % u prvoj i 17 % u drugoj prezentovanoj transformatorskoj stanici, respektivno.

Postoji realna mogućnost da se u još nekoj transformatorskoj stanici na gradskoj teritoriji ima nedovoljna kompenzacija po uvedenom kriterijumu uvek pozitivnih vrednosti reaktivne snage čija je prosečna vrednost veća od 5 kvar, što je potrebno istražiti. Na ruralnoj teritoriji nisu otkrivene transformatorske stanice u kojima je postojeći nivo kompenzacije nedovoljan. U daljem tekstu ovog rada slučaj neadekvatne nedovoljne kompenzacije reaktivne energije biće obeležen sa I.

Drugi slučaj neadekvatne kompenzacije je stanje kada kondenzatorske baterije pored toga što podmiruju potrebe potrošača za reaktivnom energijom imaju još dodatnog kapaciteta, pa višak reaktivne energije usled prekompenzacije predaju nazad distributivnom transformatoru. Iz ugla struje transformatora to znači da se ona povećava u odnosu na struju koja bi tekla pri potpunoj kompenzaciji, upravo zbog viška reaktivne snage koji teče ka primarnoj strani transformatora.

Jedna od nekoliko transformatorskih stanica u kojima je registrovana prekompenzacija je TS „Pogon“ koja napaja mešovitu potrošnju (domaćinstva u individualnoj stambenoj gradnji bez grejanja iz toplane 65 %, administrativna 25% i trgovačka potrošnja 10%). U ovoj transformatorskoj stanici instalisane su kondenzatorske baterije ukupne snage od 100 kVAr, međusobno povezane 4x25 kvar.



Slika 3 - Tokovi aktivne i reaktivne snage u TS „Pogon“

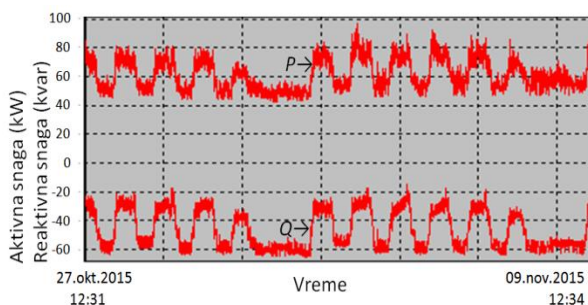
Na slici 3 prikazane su vrednosti tokova aktivne i reaktivne snage za jesenji period merenja od šest dana. Sa slike se može uočiti da reaktivna snaga ne samo što je konstantno negativna, već ima relativno veliku srednju vrednost, -50 kvar. Ona je čak deset puta veća od uvedenog kriterijuma za prekompenzaciju da je srednja vrednost reaktivne snage veća od -5 kvar. Znak minus označava da je smer toka reaktivne snage usmeren ka primaru transformatora. Zato se slobodno može

reći da je u TS „Pogon“ instalisana neadekvatna kompenzacija, prekompenzacija, reaktivne energije. Ovakav slučaj kompenzacije će se u radu označavati sa II.

Radi prezentacije, opisana je još jedna karakteristična transformatorska stanica u kojoj je zabeležena neadekvatna kompenzacija reaktivne energije. To je TS „Pošta“ koja napaja administrativnu potrošnju. U njoj su instalisane kondenzatorske baterije ukupne snage 80 kvar (4x20 kvar).

Na slici 4 prikazani su tokovi aktivne i reaktivne snage izmerene u TS „Pošta“ u jesenjem periodu. Minimalna i maksimalna registrovana vrednost reaktivne snage za ceo period merenja od 13 dana su -65,5 kvar i -15,2 kvar, respektivno. Kako je prosečna vrednost reaktivne snage na sabirnicama transformatora -47,1 kvar, radi se o slučaju neadekvatne kompenzacije reaktivne energije, prekompenzacije.

Pored toga, analiza tokova aktivne i reaktivne snage sa slike 4 jasno pokazuje da promene aktivne snage izazivaju i promene reaktivne snage. Ovim se potvrđuje prethodno izneta konstatacija o administrativnoj potrošnji da se ona sastoji iz značajnog broja uređaja koji za svoj rad preuzimaju reaktivnu energiju, bilo iz mreže, bilo iz kondenzatorskih baterija.



Slika 4 - Tokovi aktivne i reaktivne snage u TS „Pošta“

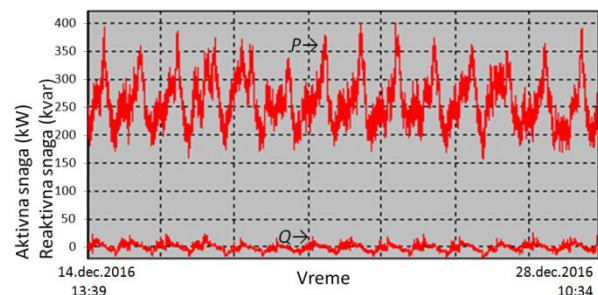
U prethodnom delu odeljka analizirani su i komentarisani slučajevi kod kojih je prosečna izmerena vrednost reaktivne snage izvan oprege ± 5 kvar. Graniczne vrednosti ovog opsega su izabrane imajući u vidu činjenicu da u okviru dinamičke kompenzacije koja nije razmatrana u ovom radu, ali je često prisutna u transformatorskim stanicama koje napajaju industrijsku potrošnju u Leskovcu i biće joj posvećena dužna pažnja u nekom od narednih radova autora, najčešće korišćena kondenzatorska baterija sa najmanjom instalisanom snagom, a to je upravo 5 kvar.

To znači da promena reaktivne snage do 5 kvar ne izaziva aktiviranje automatskog sistema dinamičke kompenzacije. Uvažavajući ovu činjenicu i aktuelna podešenja sistema dinamičke kompenzacije, uzeto je da adekvatnu kompenzaciju imaju transformatorske stanice u kojima je prosečna vrednost reaktivne snage u granicama $-5 \text{ kvar} < Q < 5 \text{ kvar}$, bilo da one imaju dinamičku ili fiksnu kompenzaciju.

Jedna od transformatorskih stanica u kojoj je prisutna adekvatna kompenzacija reaktivne energije je TS „Sava Kovačević“ Ova transformatorska stanica napaja domaćinstva u individualnoj stambenoj gradnji bez grejanja iz toplane i u njoj su instalisane fiksne kondenzatorske baterije 3x25 kvar. Na slici 5 su prikazani tokovi aktivne i reaktivne snage u TS „Sava Kovačević“ snimljeni od 14. do 28. decembra 2016.

Velika varijacija aktivne snage, od minimalnih 156 kW do maksimalnih 403 kW, je očekivana imajući u vidu kategoriju potrošnje i zimski period merenja kada je upotreba termičke potrošnje tokom dana velika. Varijacije aktivne snage donekle je pratila reaktivna snaga, tako da su minimalne i maksimalne registrovane vrednosti reaktivne snage -21,3 kvar i 23,9 kvar, respektivno.

U periodu od skoro 14 dana koliko je trajalo merenje u TS „Sava Kovačević“ prosečna vrednost reaktivne snage na sabirnicama transformatora je -2,1 kvar, što ovu TS, po uvedenoj klasifikaciji, svrstava u grupu transformatorskih stanica sa adekvatnom kompenzacijom, i biće obeležena oznakom III.

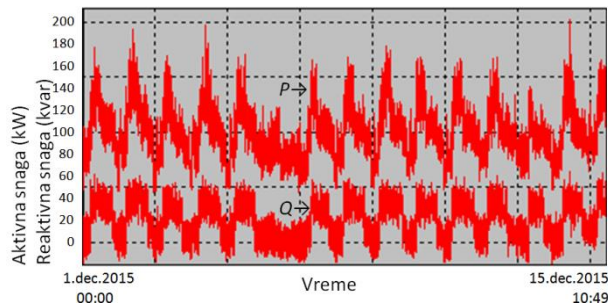


Slika 5 - Tokovi aktivne i reaktivne snage u TS „Sava Kovačević“

U toku istraživanja, evidentirane su transformatorske stanice u kojima su izmerene prosečne vrednosti reaktivne snage izvan opsega ± 5 kvar, ali je, kao i kod adekvatne kompenzacije, reaktivna snaga u pojedinim vremenskim intervalima imala pozitivni, a u nekim negativni znak, prolazeći tako kroz oblasti nedovoljne kompenzacije i prekompenzacije. TS kod kojih je uočeno ovakvo ponašanje reaktivne snage su u radu označene sa IV, a takav slučaj kompenzacije je nazvan uslovno adekvatna kompenzacija. Ona se može smatrati podslučajem adekvatne kompenzacije.

Jedna od transformatorskih stanica u kojima je evidentirana uslovna kompenzacija je TS „Pivara“ koja napaja trgovački tip potrošnje (veći hipermarket). Tokovi aktivne i reaktivne snage za zimski period merenja tokom skoro pola meseca dana decembra 2015., prikazani su na slici 6. Sa dijagrama se može videti da je reaktivna snaga u određenim vremenskim intervalima veća, a u drugim manja od nule. Minimalna i maksimalna izmerena vrednost reaktivne

snage su -19,6 kvar i 65,4 kvar, respektivno. Prosečna izmerena vrednost reaktivne snage iznosi 20,5 kvar, što je veće od 5 kvar, uslova adekvatne kompenzacije.



Slika 6 - Tokovi aktivne i reaktivne snage u TS „Pivara“

U ruralnim područjima takođe su evidentirane transformatorske stanice u kojima postoji adekvatna (TS „Brejanovce kula“ i TS „Presečina kula“) i uslovno adekvatna (TS „Strojkovce kula“) kompenzacija reaktivne energije. Neki od rezultata merenja u ovim transformatorskim stanicama su dati u tabeli 2.

4. RELATIVNA PROMENA STRUJE OPTEREĆENJA TRANSFORMATORA

U prethodnom delu rada pomenuto je da je struja opterećenja transformatora u direktnoj vezi sa vrednostima aktivne i reaktivne snage. Ona zavisi i od napona, merenim na istom naponskom nivou kao i snaga, tj. važi

$$I = f(P, Q, U). \quad (1)$$

Za potrebe proračuna uzima se srednja vrednost linijskih napona (U_1, U_2, U_3), kao

$$U = (U_1 + U_2 + U_3)/3. \quad (2)$$

Ako se struja opterećenja transformatora predstavi preko svoje aktivne i reaktivne komponente, odnosno

$$\underline{I} = I_p + jI_q, \quad (3)$$

pri čemu I_p zavisi od aktivne snage, P , a I_q od reaktivne snage opterećenja, Q , to znači da se kondenzatorskim baterijama deluje na reaktivnu komponentu struje opterećenja.

Jedan od ciljeva kompenzacije reaktivne energije u transformatorskim stanicama je da se smanjivanjem komponente I_q utiče na smanjivanje ukupne struje opterećenja transformatora I , a samim tim i na gubitke snage i energije u transformatoru. Zavisnost reaktivne komponente struje opterećenja transformatora u prisustvu kondenzatorskih baterija na niženaponskoj strani, može se predstaviti relacijom

$$I_q^* = f'(Q - Q_C, U), \quad (4)$$

gde je Q_C naznačena vrednost reaktivne snage kondenzatorske baterije. Nakon određivanja I_q^* , mogu se odrediti moduli struja pre, I , i posle kompenzacije, I^* , a potom i relativna promena struje opterećenja transformatora usled prisustva kompenzacije u odnosu na struju kada nema ugrađenih kondenzatorskih baterija, kao

$$i = \frac{(I - I^*)}{I} \cdot 100 \%. \quad (5)$$

U zavisnosti od toga kako je izvršena kompenzacija reaktivne snage u niskonaponskoj mreži, struja opterećenja transformatora se menja. Tako se u slučajevima nedovoljne kompenzacije, prezentovnim na slici 1 i slici 2, struja opterećenja smanjuje, ali ima postora za njeno dodatno smanjenje što bi se postiglo smanjenjem reaktivne snage na 0 kvar. U slučajevima prekompenzacije (slika 3 i slika 4) dešava se suprotno.

Naime, zbog prekomerne kompenzacije, reaktivna snaga opterećenja transformatora je negativna, i pošto reaktivna komponenta struje zavisi od kvadrata reaktivne snage, struja opterećenja transformatora se povećava. Sa druge strane, u slučaju adekvatne kompenzacije, prezentovanom na slici 5, struja opterećenja se zbog prisustva kondenzatorskih baterija u proseku smanjuje skoro do maksimuma koji je teorijski moguće postići kompenzacijom, a koji se dobija ako je reaktivna snaga uvek jednaka 0 kvar.

Na kraju, na slici 6 prikazana je promena reaktivne snage koja u određenim vremenskim intervalima izaziva smanjenje reaktivne komponente struje opterećenja, a u nekima ne, ali je prosečno smanjenje struje opterećenja daleko od teorijskog minimuma.

Zato je ovaj slučaj kompenzacije i nazvan uslovno adekvatna kompenzacija. Konkretni rezultati proračuna pokazatelja i iz (5) za TS čiji su podaci merenja dati na slikama, ali i za veći broj ispitivanih stanica sa kondenzatorskim baterijama, dati su u tabeli 2.

U ovoj tabeli su prikazane maksimalne, minimalne i srednje vrednosti aktivne, reaktivne snage opterećenja i pokazatelja i , kao i naznačena snaga ugrađenih kondenzatorskih baterija za po tri TS iz kategorije I - IV u gradskom području (oznaka G). Takođe su dati i rezultati za transformatorske stanice u ruralnom području označene sa R.

Analiza prezentovanih podataka u tabeli 2. pokazuje da se prosečna vrednost i za TS na gradskoj teritoriji kreće u granicama od -27 % do

10,1 %. Pozitivne vrednosti pokazatelja i pokazuju za koliko procenata se struja opterećenja transformatora smanjuje zbog kompenzacije reaktivne energije.

Cilj je postići što veću vrednost i . Negativne vrednosti prikazuju za koliko procenata se struja opterećenja transformatora povećava zbog neadekvatne kompenzacije.

Tabela 2. Karakteristične vrednosti aktivne, reaktivne snage i relativne promene struje opterećenja transformatora na različitim lokacijama i za različite kategorije kompenzacije nakon ugradnje kondenzatorskih baterija

Br.	Lokacija, naziv TS	Kat. komp.	P_{min} (kW)	P_{max} (kW)	P_{sr} (kW)	Q_{min} (kvar)	Q_{max} (kvar)	Q_{sr} (kvar)	Q_c (kvar)	i_{min} (%)	i_{max} (%)	i_{sr} (%)
1	G, 7. Juli	I	52,9	217,5	134,2	8,2	41,7	22,8	50	2,6	27,1	9,5
2	G, Koste A. I	I	35,5	510,6	194,8	5,4	53	26,4	40	0,5	33,5	4,7
3	G, Koste A. II T2	I	61,2	303,2	136,4	5,8	25,4	13,13	40	1,0	17,5	6,7
4	G, Pogon	II	94,6	229,3	150,0	-65,9	-33,8	-50	100	-18,3	2	-3,7
5	G, Pošta	II	41,9	97,0	60,74	-65,5	-14,7	-47,3	80	-82,6	14,6	-27
6	G, Radnička	II	121,7	609,3	263,4	-42,4	-9,2	-26,5	75	-2,5	3	0,4
7	G, Sava K.	III	156,3	401,4	257,5	-21,3	23,9	-2,1	75	1,2	6,8	2,8
8	G, Park	III	115,5	277,4	205,3	-5,3	13,2	3,4	25	2,6	11,4	4,9
9	G, Internat	III	58,9	209,8	130,4	-36,7	18,2	-1,9	75	-7,3	25	10,1
10	G, Moše Pijade	IV	101,3	458,3	247,7	-40	18,0	-17,7	75	-4,4	5,4	1,4
11	G, Pivara	IV	44,9	201,8	99,8	-19,6	65,4	20,5	25	-7,1	14,8	5,3
12	G, 9 Jugovića	IV	59,7	289,4	154,4	-36,9	23,3	-16,4	75	-6,9	10,4	3,4
13	R, Brejanovce kula	III	22,1	115,5	53,2	-9,3	36,8	2,2	20	-0,6	22,8	6,8
14	R, Strojkovce kula	IV	12,6	96	44,2	-11,5	18,1	-5,9	20	-11,6	17,0	1,8
15	R, Presečina kula	III	22,6	143,0	69,0	-7,84	43,8	4,2	20	0,15	26	4,9

Srednja vrednost i za TS „Pošta“ je izrazito velika negativna vrednost, u odnosu na prosečne vrednosti za ostale transformatorske stanice. Razlog ovako velike vrednosti treba tražiti u odnosu Q/P . Kod TS „Pošta“ koja je pod rednim brojem 5 u tabeli i kod koje je prekompenzacija (slučaj II) procentualna vrednost količnika Q_{sr}/P_{sr} je -77,8%, odnosno uticaj Q_{sr} na struju opterećenja I je veliki.

Sa druge strane, TS koja je šesta u tabeli, a u kojoj takođe postoji prekompenzacija (usled kondenzatorskih baterija gotovo iste snage kao u TS „Radnička“), ima Q_{sr}/P_{sr} samo -10%, pa je uticaj Q_{sr} na struju zanemarljiv. Dakle, u TS „Pošta“ uticaj Q_{sr} na struju opterećenja je mnogo veći nego u TS „Radnička“.

Treba primetiti da je ova razlika značajno uslovljena kategorijom potrošnje - vrednost prosečne aktivne snage u TS „Radnička“ je višestruko veća od odgovarajuće prosečne vrednosti u TS „Pošta“.

U ruralnom području evidentirani su slučajevi adekvatne kompenzacije kod kojih je relativno smanjenje struje u odnosu na situaciju pre ugradnje baterija 6,8% i 4,9%. U ovom području uočena je i

jedna transformatorska stanica sa uslovno adekvatnom kompenzacijom sa $i=1,8\%$.

Imajući u vidu podatke iz tabele 2, može se izvršiti zamena postojećih kondenzatorskih baterija tamo gde je njihov učinak na smanjenje struje opterećenja, odnosno povećanje propusne moći transformatora mali, kao i tamo gde je evidentirana prekompenzacija praćena povećanjem struje i smanjenjem propusne moći. Međutim, za potpuniju ocenu potrebno je utvrditi i adekvatnost kompenzacije na primarnoj strani transformatora.

Tako je izvršena analiza reaktivne snage transformatora na primarnoj strani, imajući u vidu da transformatori troše reaktivnu snagu na magnećenje jezgra i na gubitke usled rasipanja magnetnog fluksa.

Pored podataka merenja, za proračun ukupnih gubitaka reaktivne snage i reaktivne snage na primarnoj strani transformatora, iskorišćeni su podaci sa natpisnih pločica razmatranih transformatora u gradskom području radi izračunavanja parametara njihovih ekvivalentnih šema. Podaci koji nedostaju na ovim pločicama preuzeti su iz [12].

Analiza iznosa gubitaka, tj. povećanja reaktivne snage na primarnoj strani transformatora, u odnosu na ovu snagu na sekundaru, pokazuje da se prosečno povećanje u razmatranim periodima kreće u apsolutnim jedinicama od 4,4 kvar u TS „Pivara“ (naznačena snaga, S_n , transformatora u ovoj TS je 400 kVA) do 10,4 kvar u TS „Moše Pijade“ (S_n transformatora je 630 kVA). Gledano u procentima naznačene snage transformatora, prosečno povećanje reaktivne snage se kreće od 0,7% kod transformatora 630 kVA u TS „Pošta“, do 2,2% kod transformatora 400 kVA u TS „Park“.

Imajući u vidu to da su gubici reaktivne snage transformatora relativno mali, oni se u potpunosti kompenzuju kod TS u kojima je zastupljena prekompenzacija. Na primarnoj strani ovih TS i dalje postoji kapacitivni faktor snage koji u TS „Pogon“ i „Radnička“ u proseku približno iznosi 0,95 cap i 0,99 cap, respektivno. Za razliku od ovih TS, prosečan faktor snage u TS „Pošta“ je samo 0,8 cap, zbog malog aktivnog opterećenja ove transformatorske stanice. Navedne tri TS predaju srednjenaponskoj mreži po redosledu pominjanja: -44 kvar, -16,9 kvar i -42,7 kvar, što u slučaju veoma male potražnje za reaktivnom snagom potrošača u ostatku srednjenaponske mreže (SN) može uzrokovati predaju dela reaktivne snage napojnom transformatoru X/10 kV/kV. Uz uvažavanje podataka o snagama transformatora i kondenzatorskih baterija, i zanemarenje gubitaka u SN mreži, pokazuje se da bi do ove pojave došlo ako je ukupna reaktivna snaga opterećenja izvoda na kojima se nalaze TS „Pogon“, „Radnička“ i „Pošta“ manja od: 9,9%, 6,8% i 4,8 %, respektivno, sumarne instalisane snage transformatora na njima, što je teorijski moguće.

Rezultati rada se mogu iskoristiti kao ulazni podaci za procenu dijagrama opterećenja potrošnje onih transformatorskih stanica u kojima nisu izvršena merenja, a koje napajaju istu kategoriju potrošnje. Naredni rad autora će se baviti analizom uticaja kondenzatorskih baterija na smanjenje gubitaka snage i padova napona u transformatorskim stanicama 10/0,4 kV/kV i u mreži srednjeg napona.

5. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati merenja u transformatorskim stanicama na teritoriji Pogona Leskovac, koje napajaju potrošače različitih kategorija, a u kojima su instalisane kondenzatorske baterije. Na osnovu izmerenih vrednosti reaktivne snage uvedena je podela kompenzacije na adekvatnu, uslovno adekvatnu i neadekvatnu – nedovoljnu kompenzaciju i

prekompenzaciju. Definisana je način na koji se izračunava relativna promena struje opterećenja zbog prisustva kondenzatorskih baterija, i . Na osnovu merenja u 15 TS u gradskom i ruralnom području izračunate su, između ostalog, i prosečne vrednosti i .

Pokazuje se da odnos aktivne i reaktivne snage, ukupna snaga kondenzatorskih baterija i kategorija potrošnje koju napaja određena transformatorska stanica, utiču na relativnu vrednost promene struje opterećenja usled prisustva kondenzatorskih baterija. Najveća srednja vrednost ovog pokazatelja je dobijena u TS sa adekvatnom kompenzacijom, koja napaja mešovitu potrošnju, u kojoj se struja transformatora smanjuje za 10,1% usled ugradnje kompenzatora, a najmanja (-27%) u jednoj TS koja napaja administrativnu potrošnju. U njoj se usled prekompenzacije struja transformatora povećava za 27%.

U radu je takođe istaknuto da se kod transformatorskih stanica u kojima postoji prekompenzacija, celokupni gubici reaktivne snage transformatora nadoknađuju reaktivnom snagom kondenzatorskih baterija, a preostala reaktivna snaga ovih TS se predaje srednjenaponskoj mreži. Rezultati rada se mogu iskoristiti za korigovanje snage postojećih kondenzatorskih baterija, proračun gubitaka transformatora, potrebe eksploatacije postojećih stanica i planiranje njihovog rada pri perspektivnom porastu opterećenja.

6. ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao kao rezultat istraživanja u okviru projekata sa evidencionim brojevima III44004 i III44006 koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Rajaković N, *Analiza elektroenergetskih sistema I*, Elektrotehnički fakultet, Akademski misao, Beograd, 2002.
- [2] Rajaković N, Tasić D, *Distributivne i industrijske mreže*, Akademski misao, Beograd, 2008.
- [3] Kostić M, *Kompenzacija reaktivne energije i viši harmonici u električnim mrežama*, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Univerzitet u Beogradu, 2014.
- [4] Jović A, *Struje opterećenja distributivnih transformatora Tehničkog Centra Leskovac*, Interni izveštaji o merenjima u distributivnim transformatorskim stanicama, ED Leskovac, 2015-2016.
- [5] Korunović L, Stojanović M, Tasić D, Stoimenov L, Krstić A, *Analiza dijagrama potrošnje na niskom naponu distributivne mreže Niša, VII Savetovanje o*

- elektrodistributivnim mrežama Srbije i Crne Gore sa regionalnim učešćem*, Vrnjačka Banja, Srbija, R-6-02, 26.9. - 1.10. 2010.
- [6] Gerić Lj, sa grupom autora Knjiga I, TP-1 u: *Zbirka Tehničkih preporuka ED Srbije*, Tehnički savet EPS-a – Direkcija za distribuciju, Beograd, 2001.
- [7] Jović A, Stojanović D, Merenje prisustva trećeg harmonika u struji neutralnog provodnika u niskonaponskoj distributivnoj mreži, *Elektroprivreda*, časopis br. 4 str. 32-38, Beograd, 2008.
- [8] Korunović L, Stojanović D, Jovanović S, The Research of Harmonics in Low Voltage Distribution Network of Nis, in Proc. *XLIV International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2009*, Veliko Tarnovo, Bulgaria, pp. 323-326, 25-27 June, 2009.
- [9] Chauvin Arnoux, C.A 8332 C.A 8334 User's manual [Internet]. Paris: Chauvin Arnoux, 2002 [citirano 04.07.2017]. Dostupno na: http://www.elma-instruments.se/AkopaCMS_Elma/_res/Modules/ElmaFSSync/Mirror/Manual/5706445290062_UK_20070208.pdf
- [10] IRC Alfatec, Merno-informacioni sistem MIS-8 [Internet]. Niš: Istraživačko-razvojni centar Alfatec; 2007 [citirano 04.07.2017]. Dostupno na: http://www.alfatec.rs/wp-content/uploads/2010/11/201-10428_mis_8_tehnicki_opis_konacno.pdf
- [11] Stojanović D, Korunović L, Jović A, Merenje i analiza nesimetrije opterećenja u niskonaponskoj distributivnoj mreži, *Šesto savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije CIRED 2008*, Vrnjačka Banja, Srbija, R-6.1.6, 30.9. - 3.10. 2008.
- [12] Elektrodistribucija - Beograd, Pravila o radu distributivnog sistema [Internet]. Beograd: PD za distribuciju električne energije „Elektrodistribucija Beograd“, d.o.o. Beograd; 2009 [citirano 06.07.2017]. Dostupno na: http://www.epsdistribucija.rs/propisi/pravila_o_radu.pdf

SUMMARY

THE INFLUENCE OF CAPACITOR BANKS ON TRANSFORMER LOAD CURRENT

This paper deals with the influence of capacitor banks used for reactive energy compensation on total load current of 10/0,4 kV/kV distribution transformers. The analysis regards distribution area of Leskovac which comprehends town Leskovac and nearby settlements. Differently from previously published references that treat excessively reactive energy consumption, the value of reactive power on low voltage side of transformer taking into account the presence of capacitor banks is observed primarily in this paper. Both theoretically possible cases are restated on the basis of measurements: the compensation is adequate or inadequate. The cases of insufficient compensation and overcompensation are regarded to be inadequate compensation. The adequate compensation is achieved when reactive power oscillates around 0 kvar. The special case of adequate compensation, called conditionally adequate compensation, is introduced. For all four cases that describe reactive energy compensation, the calculation results of relative change of low voltage transformer current in the presence of capacitor banks, in comparison to the current without installed banks are presented.

Key words: transformer, capacitor banks, compensation, load current