

JEDNA METODA ZA UTVRĐIVANJE LOKACIJE I SNAGE UREĐAJA ZA KOMPENZACIJU REAKTIVNE SNAGE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

D. P. Popović, Institut "Nikola Tesla", Srbija
M. Stojković, Institut "Nikola Tesla", Srbija
N. Vrcelj, Institut "Nikola Tesla", Srbija
D. Kecman, Institut "Nikola Tesla", Srbija
S. Minić, Institut "Nikola Tesla", Srbija

UVOD

O aktuelnosti i značaju obezbeđivanja povoljnih naponsko-reaktivnih prilika u savremenim elektroenergetskim interkonekcijama svedoči izuzetno veliki broj publikovanih radova, koje je nemoguće citirati u okviru raspoloživog prostora za rad ove vrste. Umesto toga, navodi se samo jedna od karakterističnih referenci novijeg datuma (1), u kojoj su, uz citiranje 45 relevantnih referenci, dati pregled i sistematizacija (uz kraći kritički osvrt) niza optimizacionih metoda koje se bave rešavanjem naponsko-reaktivne problematike, odnosno kompenzacijom reaktivne snage. U pomenutom kontekstu, posebno mesto imaju naponsko-reaktivne prilike u distributivnim mrežama, jer prirodni tok rešavanja problematike naponsko-reaktivnih prilika počinje sa njima.

U rešavanju problema planiranja optimalne kompenzacije reaktivne snage u distributivnim mrežama, osnovni zadatak je da se odredi tip, broj, lokacija, veličina i stepen promene snage baterija kondenzatora, priključenih očno na mrežu. Pri tome, najčešće je optimizacioni kriterijum minimizacija maksimalnih gubitaka aktivne snage i aktivne energije tokom optimizacionog perioda (najčešće je to jedna godina), uz uvažavanje cene baterija kondenzatora i naponskih ograničenja u čvorovima.

Za rešavanje ovako formulisanog problema u distributivnim mrežama, do sada je korišćen niz raznorodnih optimizacionih tehnika, o čemu svedoči takođe izuzetno veliki broj publikovanih radova. U njima mogu da se nađu sledeće najčešće korišćene metode rešavanja problema optimalnih tokova snaga: nelinearno programiranje, kvadratno programiranje, metoda Njutna, linearno i dinamičko programiranje, hibridne verzije linearnog i celobrojnog programiranja i metode tzv. srednje tačke. Kad je reč o novim prilazima, trebalo bi navesti prilaze bazirane na genetskim algoritmima, "simuliranom kaljenju" (simulated annealing) i evolutivnom programiranju, a nije bila zaobiđena ni primena neuralnih mreža. Takođe, primenjivano je: metoda dualnog tipa (dual-type), teorija srednjeg polja (field theory), tabu pretraživanje (tabu search) i uređena optimizaciona teorija (ordinal optimization theory). U radu (2), u kome je primenjeno dinamičko programiranje, dat je pregled nekih od relevantnih metoda.

Problematika naponsko-reaktivnih prilika je bila i ostala veoma važna i za EES Srbije. Poslednjih godina problematici naponsko-reaktivnih prilika u prenosnoj mreži Srbije posvećivana je posebna pažnja, što se i dalje čini. U kontekstu niza sprovedenih istraživačkih aktivnosti je bila i izrada Studije (3), koja se bavila naponsko-reaktivnom problematikom prenosne mreže Srbije, za vremenski period do 2015. U okviru rada na njoj, između ostalog, razvijena je jedna metoda, i odgovarajući računarski

program (UCOSFI) za upravljanja tokovima reaktivnih snaga u elektroenergetskim interkonekcijama (4). Dakle, osnovna i prvobitna namena razvijene metode je bila da, komplementarno sa ostalnim relevantnim metodama, rešava problematiku naponsko-reaktivnih prilika u prenosnoj mreži. O tome kako se ona pokazala za postavljeni cilj, detalno je bilo reči u (3, 5).

U daljem radu na ovoj problematici, došlo se na ideju, da se ova metoda, uz njena dalja unapređenja i dogradnju, izloži iskušenjima koja će da postavi problematika naponsko-reaktivnih prilika u distributivnim mrežama, čiji je jedan od najznačajnijih segmenta problem kompenzacija reaktivne snage. A koja su to iskušenja? U prvom redu to je uslovljeno specifičnostima distributivnih mreža (radijalna ili slabo upetljana konfiguracija, veliki broj vodova i transformatorskih stanica i odnos aktivne i reaktivne otpornosti vodova koji nije zanemarljiv). Otuda i posebni prilazi proračunima tokova snaga, koji su prilagođeni ovim performansama distributivnih mreža (iterativni metod za proračun radijalnih mreža, kompenzacioni metod za proračun slabo upetljenih mreža, modifikovani Newton-Raphsonov metod i dr.).

Osnovni cilj ovoga rada je da izloži stečena početna iskustva na tom planu. Najpre se izlažu model upravljanja tokovima reaktivnih snaga i tehnika njegovog rešavanja, kao i način na koji se sprovodi tehno-ekonomska analiza opravdanosti dobijenih iznosa za snage kompenzacionih uređaja. Zatim, daje se prikaz računarskog programa UCOSFID, nastao modifikacijama prethodno pomenutog računarskog programa UCOSFI. Na kraju, daju se rezultati praktične primene razvijene metode na primeru Elektrodistribucije Valjevo.

MODEL UPRAVLJANJA TOKOVIMA REAKTIVNIH SNAGA UVOĐENJEM KOMPENZACIJE

Generalno

Generalna matematička formulacija problema upravljanja tokovima reaktivnih snaga, uvođenjem odgovarajuća kompenzacije, je određivanje vektora upravljačkih varijabli \mathbf{u} , koji će simultano da zadovolji sledeća dva sistema nelinearnih algebarskih jednačina:

$$F(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = F^{SP} \quad (1)$$

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{d}) = 0 \quad (2)$$

uz simultano zadovoljenje uslova:

$$\mathbf{u} \in U$$

(3)

Veličina \mathbf{x} je vektor stanja, a veličina \mathbf{u} , je kako je to već rečeno, vektor upravljačkih varijabli. U konkretnom slučaju elementi vektora upravljačkih varijabli \mathbf{u} su iznosi ukupne snage kompenzacije reaktivne snage (koji se lociraju na unapred odabrane čvorove, sa takođe unapred definisanim učešćem u toj snazi), potrebnih za ostvarenje zadatih faktora snage na početku izabranih elemenata u razmatranoj mreži.

Upravljanje tokovima reaktivnih snaga modeluje se posredstvom sistema jednačina oblika (1). U njima, veličina F^{SP} je vektor tokova reaktivnih snaga, za unapred zadate vrednosti faktora snaga na početku odabranih elemenata razmatrane mreže. Obzirom da su predmet pažnje naponsko-reaktivne prilike u distributivnoj mreži, elementi koji se fokusiraju su TS 110/x kV/kV, TS 35/x kV/kV i TS x/0.4 kV/kV, a da se potrebna snaga kompenzacije utvrđuje na naponskom nivou x kV, što zahteva i kompletno modelovanje mreže na tom naponskom nivou.

Veličina \mathbf{d} je vektor tzv. zadatih ("demand") varijabli, odnosno sistem jednačina oblika (2) je merodavan za uspostavljena nova ravnotežna stanja, nakon izvršene kompenzacije reaktivne snage, kao i nakon razmatranih poremećaja. To su zapravo jedanačine balansa snaga u čvorištima razmatrane mreže, za pomenuta stanja. Naravno, da bi formulisani problem upravljanja imao smisla, neophodno je da se ispuni uslov (3), odnosno da se vektor uvedenih upravljačkih varijabli u nalazi u propisanim granicama U.

Formulacija modela upravljanja tokovima reaktivnih snaga

Saglasno prethodno datoj generalnoj formi modela upravljanja tokovima reaktivnih snaga, sistem jednačina (1), u slučaju prisustva elemenata na kojima se zadaje faktor snage $\cos\phi$, odnosno vrši upravljanje tokovima reaktivne snage, imaju sledeći oblik:

$$\Delta Q_{ci} = Q_{ci}^{SP} - Q_{ckm} = 0; i \in NQU; k, m \in NC \quad (4)$$

gde je: NQU – skup elemenata na čijem početku se zadaje faktor snage $\cos\varphi_{zi}$; NC - ukupan broj, odnosno oznaka skupa početnog i krajnjeg čvora elemenata na kojima se vrši upravljanje tokovima reaktivne snage.

Veličina Q_{ci}^{SP} , koja predstavlja specificirani tok reaktivne snage na početku elementa "k-m", ima sledeći oblik:

$$Q_{ci}^{SP} = P_{km} \tan\varphi_{zi} \quad (5)$$

u kome veličina P_{km} predstavlja aktuelni tok aktivne snage "kroz" elementat "k-m", a veličina $\tan\varphi_{zi}$ odgovara zadatom faktoru snage $\cos\varphi_{zi}$.

Saglasno ovoj relaciji, specificirani tok reaktivne snage Q_{ci}^{SP} nije konstantna veličina (za razliku od veličina $\cos\varphi_{zi}$, odnosno $\tan\varphi_{zi}$, koje su konstantne, unapred zadate veličine), već se menja u skladu sa promenama toka aktivne snage P_{km} . Te promene toka aktivne snage (koje nisu velike, ali nisu ni zanemarljive) su logična posledica uvođenja kompenzacije, koja zatim utiče na promene napona, i gubitaka aktivne snage, što dovodi i do promena u tokovima aktivnih snaga.

Veličina Q_{ckm} predstavlja aktuelni tok reaktivne snage "kroz" elementat "k-m", koja se određuje posredstvom sledeće relacije:

$$Q_{ckm} = -(b_{km} + b_{ko})V_k^2 - V_k V_m (g_{km} \sin\theta_{km} - b_{km} \cos\theta_{km}); k, m \in NC \quad (6)$$

gde je: g_{km} , b_{km} - konduktansa i susceptansa elemenata "k-m"; b_{ko} - otočna susceptansa u čvoru "k"; θ_{km} - razlika uglova fazora napona na početku (V_k) i kraju (V_m) elemenata "k-m".

Prethodno date jednačine upravljanja tokovima reaktivnih snaga trebalo bi da budu simultano zadovoljene sa odgovarajućim jednačinama balansa snaga, čija je generalna forma data preko sistema jednačina oblika (2). Kako je to već bilo naglašeno, kada su u pitanju bile prenosne mreže, za te svrhe korišćeni su nestandardni model tokova snaga, odnosno modeli tokova snaga u karakterističnim postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima (13). Tako, za stanje nastalo nakon dejstva primarne regulacije napona i učestanosti, jednačine balansa za generatorske čvorove imaju sledeći oblik (13):

$$\Delta P_i = P_{Qoi} - k_{Pi} \Delta f - P_i = 0; i \in NG \quad (7)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Goi} + Q_{Goi} (V_{Goi} - V_{Gi}) / s_{Vi} V_{Goi} - Q_i = 0; i \in NSV \quad (8)$$

gde je: NG – ukupan broj, odnosno oznaka skupa generatorskih čvorova; NSV – ukupan broj, odnosno oznaka skupa generatora koji imaju statičku karakteristiku napon – reaktivna snaga; P_{Go} , Q_{Go} – aktivna i reaktivna snaga generatora u polaznom ustaljenom stanju; V_{Go} – napon na krajevima generatora u polaznom ustaljenom stanju; k_P – primarna regulaciona konstanta učestanosti agregata; s_V – statizam primarne regulacije napona generatora; $\Delta f = f - f_0$ – odstupanje kvazistacionarne vrednosti jedinstvene učestanosti razmatranog elektroenergetskog sistema, odnosno interkonekcije f od svoje vrednosti iz polaznog ustaljenog stanja f_0 ; P , Q – injektirana aktivna i reaktivna snaga.

Prethodno date jednačine balansa (7) i (8) moraju da striktno zadovolje sledeća, tzv. "tvrda" ograničenja:

$$P_{Gmini} \leq P_{Gi} \leq P_{Gmaxi}; i \in NG \quad (9)$$

$$Q_{Gmini} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gmaxi}; i \in NG \quad (10)$$

pri čemu Q_{Gmin} i Q_{Gmax} nisu unapred zadate, konstantne veličine, već su odgovarajuće funkcije parametara generatora i veličina stanja [4, 5].

Jednačine balansa za potrošačke čvorove, koji nisu obuhvaćeni neposrednim učešćem uvedene relocirane kompenzacije reaktivne snage, imaju sledeći oblik:

$$\Delta P_i = P_{Li}(V_i, f) - P_i = 0 \quad (11)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Li}(V_i, f) - Q_i = 0; i \in NL \quad (12)$$

gde je: NL – ukupan broj, odnosno oznaka skupa svih "neproizvodnih" čvorova ($NL = N - NG$); N – ukupan broj, odnosno oznaka skupa svih čvorova razmatrane mreže; $P_L(V, f)$, $Q_L(V, f)$ – aktivna i reaktivna snaga potrošača kao složene nelinearne funkcije od napona i učestanosti.

Upravljačke varijable, koje su definisane na eksplicitni način preko uvedenih snaga kompenzacije reaktivne snage QOC_i , ($i \in NQU$), potrebnih da obezbede zadati faktor snage $\cos\varphi_{zi}$ na početku izabраниh elementa, relociraju se na NOC_i ($i \in NQU$) unapred definisanih čvorova u iznosima $QOC\check{C}_{ik}$, na sledeći način:

$$QOC\check{C}_{ik} = k_{Qik} QOC_i; i \in NQU; k \in NOC_i \quad (13)$$

gde je k_{Qik} koeficijent učešća čvora "k" u snazi kompenzacije QOC_i .

Relociranje potrebne snage kompenzacije na NOC_i unapred definisanih čvorova dovodi do sledećih, novih jednačina balansa:

$$\Delta Q_{ik}^c = Q_{Lk}(V_k, f) - Q_{k-} - QOC\check{c}_i = 0, i \in NQU; k \in NOC_i \quad (14)$$

Na taj način, definisani matematički model upravljanja tokovima reaktivnih snaga svodi se na određivanje vektora upravljačkih varijabli, odnosno ukupnog iznosa snaga kompenzacije ($QOC_i, i \in NQU$), relocirane na unapred zadate čvorove $NOC_i, (i \in NQU)$, a koje su potrebne za ostvarenje zadatih faktora snaga $cos\phi_i$ na početku odabranih elemenata, simultano sa jednačinama balansa oblika (4), (7), (8), (11), (12) i (14), striktno respektujući ograničenja (3), (9) i (10).

Sada se postavilo pitanje, u kojoj meri ove jednačine balansa, koje su definisane za prenosne mreže, odnosno njihove interkonekcije, odgovaraju prirodi i karakteru distributivnih mreža? Jer, javlja se varijabla f - kvazistacionarna vrednost jedinstvene učestanosti, koja nije relevantna veličina, kada su u pitanju uobičajene analize distributivnih mreža. Međutim, sa prodorom distribuirane proizvodnje na distributivnim naponskim nivoima, odnosno generatora različitih vrsta, prisustvo člana $k_{P_i}\Delta f$ u relaciji (7) omogućuje precizniju kvantifikaciju njihovog odziva u dostizanju novih stanja, nastalih uvođenjem kompenzacije reaktivne snage. A posebno, ta preciznija kvantifikacija je bitna kada se u okviru analiza sigurnosti razmatraju i ispadi generatora. Takođe, jednačine balansa oblika (7) i (8) odnose se i na tzv. napojne tačke (TS višeg naponskog nivoa), koje imaju karakter PV čvorova. Pokazalo se na nizu praktičnih primera (jedan od takvih, navodi se u ovom radu), da se postižu dobre karakteristike konvergencije iterativnog postupka, baziranog i na jednačinama balansa oblika (7) i (8).

METODA REŠAVANJA FORMIRANOG MODELA UPRAVLJANJA TOKOVIMA REAKTIVNIH SNAGA

U (4, 5) detaljno je prikazan razvoj tehnike rešavanja formiranog modela upravljanja tokovima reaktivnih snaga, polazeći od oblika rešenja koji je dala primena metode Newton-Rhapon-a (6) na prethodno date jednačine balansa snaga. Dalje, polazeći od tako dobijenog oblika rešenja, uveden je niz opravdanih uprošćenja i pretpostavki kod formiranja odgovarajućih submatrica koeficijenata. Pri tome, trebalo bi posebno da se naglasi, da su uvedena uprošćenja i pretpostavke bili samo u cilju pojednostavljenja same tehnike rešavanja (jer reč je samo o odgovarajućim modifikacijama matrice Jakobijana, koju daje metoda Newton-Rhapon-a), a ne samog formiranog modela upravljanja tokovima reaktivnih snaga, koji je sačuvao svoju autentičnost. Na taj način, za određivanje kvazistacionarnog stanja nakon dejstva primarne regulacije napona i učestanosti, aktualna su sledeća dva sistema raspregnutih jednačina, koja se sukcesivno iterativno rešavaju (smisao uvedenih subiteracionih indeksa k i l):

$$\begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \Delta P/V \\ \hline \Delta P_r/V \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{c} k \\ \text{=} \\ \end{array} \quad \begin{array}{|c|c|} \hline B' & F \\ \hline B_r & F_r \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \Delta \Theta \\ \hline \Delta(\Delta f) \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{c} k+1 \\ \text{=} \\ \end{array} \end{array} \quad (15) \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \Delta Q^c/V \\ \hline \Delta Q_c/V \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{c} l \\ \text{=} \\ \end{array} \quad \begin{array}{|c|c|} \hline B'' & B_q \\ \hline B_v & B_c \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \Delta V \\ \hline \Delta QOC \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{c} l+1 \\ \text{=} \\ \end{array} \end{array} \quad (16) \end{array}$$

Dakle, do traženih vrednosti snaga kompenzacije $QOC_i (i \in NQU)$, relocirane na NOC_i unapred specificiranih čvorova i traženih vrednosti vektora stanja, koji sadrži subvektor Θ , dimenzije $(N-1)$, skalar f i subvektor V , dimenzije $(NSV+NL)$, dolazi se sukcesivnim iterativnim rešavanjem dva raspregnuta sistema jednačina (15) i (16). U njima, što se posebno naglašava, elementi svih prisutnih submatrica koeficijenata $B', B_r, F, F_r, B'', B_q, B_v$ i B_c imaju konstantne vrednosti, za nepromenjenu topologiju (4, 5).

TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA OPRAVDANOSTI UVOĐENJA KOMPENZACIJE REAKTIVNE SNAGE

Naravno, postavljalo se suštinsko pitanje kako sve ovo vrednovati, odnosno izvršiti valjanu tehnno-ekonomsku analizu opravdanosti dobijenih iznosa za snage kompenzacionih uređaja. U pomenutom cilju, za sada se fokusira samo efekat smanjenja gubitaka aktivne snage, odnosno energije u analiziranom EES, za koji je omogućena eksplicitnija valorizacija. Za to, korišćen je jedan, relativno

jednostavan ali i dovoljno indikativan prilaz, koji, uz odgovarajuće analize osetljivosti, može da dovede do željenog rezultata. U tom prilazu, efekti uvedene snage kompenzacije reaktivne snage, sagledavaju se preko promena (odnosno smanjenja - jer tada kompenzacija jedino ima praktičnog smisla) godišnjih troškova gubitaka električne energije ΔT_g , koji se određuju preko sledeće relacije:

$$\Delta T_g = \Delta P_g \tau c_g \quad (17)$$

gde je: ΔP_g - iznos smanjenja maksimalnih gubitaka aktivne snage usled uvedene kompenzacije reaktivne snage; τ - ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka aktivne snage; c_g - cena gubitaka električne energije.

Veličina ΔP_g se odnosi na vršno stanje, i ona će direktno da proizilazi iz rezultata primene razvijene metode za to vršno stanje, obzirom da se raspolaže sa vrednostima i strukturom gubitaka aktivne snage u polaznom stanju i stanju nakon izvršene kompenzacije. Ostajući kod ovakvog prilaza, moguće je izvršiti estimaciju broja godina n_g , za koji bi se uložena investicija za kompenzaciju reaktivne snage u iznosu IOC izjednačila sa uštedama u gubicima električne energije, na sledeći način:

$$n_g = IOC / \Delta T_g \quad (18)$$

Do veličine IOC se dolazi na sledeći način:

$$IOC = \sum_{i=1}^{NQU} QOC_{ni} c_{oc} \quad (19)$$

gde je: QOC_{ni} – ukupan iznos potrebne snage kompenzacionih uređaja reaktivne snage, preračunatih na nominalni napon ($i \in NQU$); c_{oc} – jedinična cena kompenzacionih uređaja.

Razvijena metoda upravljanja, kako je to već pokazano, daje kao rezultat veličine QOC_i ($i \in NQU$), koje važe za ostvarene vrednosti napona u novo dobijenim stanjima nakon uvedene kompenzacije, pa se stoga, za dalju praktičnu (komercijalnu) upotrebu, one preračunavaju na nominalni napon (QOC_{ni}).

Pored estimiranog broja godina n_g , za koji se uložena investicija za kompenzaciju reaktivne snage izjednačava sa uštedama u gubicima električne energije, ekonomska isplativost uvođenja kompenzacije se može ocenjivati i preko stope rentabilnosti pr, koja ima sledeći oblik:

$$P_r = \Delta T_g 100 / IOC \quad (20)$$

RAČUNARSKI PROGRAM UCOSFID

Na bazi izloženog matematičkog modela upravljanja tokovima reaktivnih snaga, razvijene tehnike njegovog rešavanja i izabranog načina tehno-ekonomske analize opravdanosti uvedene kompenzacije, u Institutu "Nikola Tesla" razvijen je računarski program UCOSFI (Upravljanje COSFI - faktorom snage) (4, 5). U daljem radu, za potrebe obuhvatanja i distributivnih mreža, izvršene su njegove dalje dopune i modifikacije, tako da se došlo do verzije računarskog programa UCOSFID (D - asocira da su u pitanju distributivne mreže).

Po određivanju tokova snaga u polaznom stanju, u daljem odvijanju ovog računarskog programa, njegovom Korisniku stoje na raspolaganju Opcije I, II, III, IV i V. Primenom Opcija I, II, III i IV, uz odgovarajuću dijagnostiku, sagledavaju se globalni (pretežno) aspekti naponsko-reaktivnih prilika u analiziranom EES i relevantni faktori od uticaja na takva stanja.

Izborom Opcije V, za niz unapred formulisanih scenarija, vrši se upravljanje tokovima reaktivnih snaga, odnosno utvrđivanje snaga uređaja za kompenzaciju reaktivne snage, koji su locirani na unapred zadate čvorove, potrebnih da se ostvari zadati faktor snage na početku posmatranih elemenata. To je moguće da se uradi za normalno stanje razmatrane mreže, kao i za stanja nakon poremećaja. Porebno je napomenuti, da sam izbor ovih čvorova, na koja se relociraju dobijeni iznosi kompenzacije reaktivne snage, asocirani izabranim elementima, predstavlja delikatniji deo razvijene metode upravljanja. Naravno, istu takvu delikatnost ima i definisanje koeficijenta učešća k_{Qik} izabranih čvorova. U ovoj verziji programa omogućeno je da se taj izbor vrši "ručno" i automatski. U "ručnom" modu, to radi sam korisnik, formirajući odgovarajuću datoteku, u okviru koje se definiše element koji se observira i definišu čvorovi na kojima se relociraju dobijeni iznosi kompenzacije reaktivne snage, kao i njihovi koeficijenti učešća. U automatskom modu, postoji niz opcija izbora čvorova i definisanja njihovih koeficijenata učešća. Tako, na primer, u selekciju ulaze čvorovi sa vrednošću faktora snage, koja je niža od unapred zadate, a koeficijenti učešća se određuje preko posebnog algoritma, koji ponderiše udaljenost čvora od observiranog elementa, njegov faktor snage i apsolutni iznos reaktivnog opterećenja.

Dalje, razvijena metoda, odnosno računarski program omogućuje simultano prisustvo više elemenata na čijem početku se zadaje željena vrednost faktora snage, čije bi ostvarenje bilo postignuto uvođenjem kompenzacije u selektivno odabrane čvorove, što je višestruko provereno. Naravno, radilo se o elementima, koji se nalaze na odgovarajućoj "međusobnoj udaljenosti", koja i dalje garantuje

postojanje lokalnog karaktera naponsko-reaktivne problematike. Međutim, iz praktičnih razloga, povoljnije je da se analizira region po region, i da se kvantifikuju pojedinačni efekti, da bi se nakon toga, vršila analiza za mrežu u celini. Za sva dobijena nova kvazistacionarna stanja određuju se relevantni pokazatelji (veličina i struktura gubitaka aktivne i reaktivne snage, veličine i struktura generisanja reaktivne snage od strane dalekovoda i veličine reaktivne rezerve generatora) i njihove promene u odnosu na polazno, referentno stanje. Zatim se obavlja odgovarajuća tehno-ekonomska analiza, na način opisan u prethodnom poglavlju ovoga rada, čiji je jedan od indikativnih rezultata estimirani broj godina za koji se isplati uložena investicija za kompenzaciju reaktivne snage, sa aspekta ušteda u gubicima električne energije.

ILUSTRATIVNI PRIMER PRAKTIČNE PRIMENE RAZVIJENOG PROGRAMA UCOSFID

Prva praktična iskustva u primeni razvijenog računarskog programa UCOSFID sticana su na primeru Elektrodistribucije Valjevo, za vršno opterećenje (147 MW i 65 Mvar), koje je ostvareno februara 2008. godine. Modelovane su kompletne mreže naponskih nivoa 110, 35 i 10 kV. Dakle, u pitanju je realna distributivna mreža sa 1782 čvorova i 1799 grana (1759 vodova i 40 transformatora). Od tih čvorova, samo je jedan tzv. PV čvor (visokonaponske sabirnice 220 kV u TS 220/110 kV/kV Valjevo 3). Dakle, sasvim odgovarajuća "dimenzija problema" za potrebe sagledavanja karakteristika i mogućnosti razvijene metode, odnosno računarskog programa UCOSFID.

Od niza razmatranih scenarija, raspoloživi prostor za ovaj rad, omogućuje prikaz jednog, ali dovoljno indikativnog scenarija. Element koji se observira je TS 35/10 kV/kV Ub 1 (3x4 MVA). U analiziranom stanju, tok aktivne i reaktivne snage na 35 kV naponskom nivou iznosio je 10.354 MW i 3.782 Mvar, odnosno vrednost faktora snage je bila 0.939. Od razvijene metode se zahtevalo da omogući da taj faktor snage bude 0.980, a da se to postigne uvođenjem potrebne kompenzacije u čvorove, navedene u TABELI 1 (TS 10/0.4 kV/kV, koje prirodno gravitiraju TS Ub 1). U njoj se daju faktori učešća navedenih čvorova (formiranih, srazmerno svojim reaktivnim opterećenjima), dobijeni iznosi snaga kompenzacije (Q_c i Q_{cn} - preračunata na nominalni napon) i promene napona u njima (ΔV), nakon izvršene kompenzacije.

TABELA 1 – DOBIJENI IZNOSI SNAGA KOMPENZACIJE I PROMENE NAPONA NAKON IZVRŠENE KOMPENZACIJE

Redni broj	Naziv čvora	Faktor učešća	Q_c [kvar]	Q_{cn} [kvar]	ΔV [kV]
1	Trlič 9	0.340	525.0	651.0	0.79
2	Čučuge Rudnik	0.234	362.0	444.0	0.93
3	Čučuge Servisna Radionica	0.106	164.0	202.0	0.93
4	Pambukovica	0.039	60.0	73.0	0.85
5	Sovljak	0.042	65.0	64.0	0.29
6	Trlič 1	0.033	51.0	63.0	0.76
7	Zvizdar	0.056	87.0	97.0	0.61
8	Gunjevac	0.030	46.0	47.0	0.37
9	Čučuge Rudnik Sušara	0.088	136.0	167.0	0.93
10	Čučuge Rudnik Pumpa	0.032	49.0	61.0	0.91
Ukupno		1.000	1545.0	1870.0	

Iterativna procedura rešavanja sistema raspregnutih jednačina (15) i (16) je startovala od utvrđenog stanja razmatrane distributivne mreže, pre ugradnje kompenzacije, a do ovoga rešenja se došlo nakon svega šest iteracija za zahtevanu tačnost od 0.01 MW, odnosno Mvar. Ovo dovoljno govori o karakteristikama konvergencije iterativne procedure rešavanja sistema raspregnutih jednačina (15) i (16), i u uslovima distributivnih mreža.

Uvođenjem kompenzacije u navedenim čvorovima u ukupnom iznosu od 1545 kvar, odnosno 1870 kvar, došlo bi do smanjenja gubitaka aktivne snage u iznosu od 260 kW. U realizaciji ove kompenzacije, stajali bi na raspolaganju kombinacije baterija kondenzatora snaga 25, 50, 75 i

100 kvar, koje bi bile ugrađene u ormare ili na table u posmatranim TS 10/0.4 kV/kV. Ove baterije bi, kao i do sada, izradila domaća elektroindustrija, što svakako ima veliki značaj, koji ne bi trebalo posebno da se obrazlaže.

U studiji razvoja Elektrodistribucije Valjevo, koja se radi u Institutu "Nikola Tesla", detaljnom analizom je utvrđeno vreme trajanja vršne snage u iznosu 4950 h, a vreme trajanja maksimalnih gubitaka τ u iznosu 3160 h. Ako bi se za cenu gubitaka električne energije uzela vrednost 0.05 €/kWh, a za cenu 1 kvar statičke baterije kondenzatora, vrednost 10 €, relacija (18) daje estimirani broja godina za koji bi se uložena investicija za kompenzaciju reaktivne snage izjednačila sa uštedama u gubicima električne energije u iznosu $ng=0.46$. Dakle, za samo nepunih šest meseci bi se isplatila uložena investicija za kompenzaciju reaktivne snage, sa aspekta ušteta u gubicima električne energije. Ukoliko bi se zahtevalo da faktor snage bude 0.990, potrebna snaga kompenzacije u navedenim čvorovima bi iznosila 2166 kvar, odnosno 2481 kvar, pri čemu bi došlo do smanjenja gubitaka aktivne snage u iznosu od 215 kW. Relacija (18) tada bi dala estimirani broj godina $ng=0.73$. Naravno, ovo su samo aproksimativne vrednosti, ali veoma indikativne u pogledu daljeg traganja za optimalnim rešenjem. Dobijeni rezultati ne iznenađuju, jer je u pitanju relativno nerazvijena distributivna mreža, čiji se neophodni dalji razvoj utvrđuje u prethodno pomenutoj studiji Institutu "Nikola Tesla".

Sa ovako dobijenim rezultatima, dalje bi se išlo na jedan od najvažnijih segmenata, a to je komplementarna primena neke od eksplicitnih optimizacionih procedura, sa kojom bi se dolazilo do finalnih rezultata, odnosno formulisanja konkretnih lokacija i snaga potrebne kompenzacije. Jedna od takvih procedura je izložena u (7). Ona je bazirana na metodi GRG (Generalizovani Redukovani Gadijent), koja na sistematizovani način vrši pretraživanje i iznalaženje optimalnog rešenja.

Na kraju, ako je to uopšte potrebno da se napomene, prikazani praktični primer nije bio u funkciji neposrednog i celovitog rešavanja problema naponsko-reaktivnih prilika u razmatranom delu distributivne mreže, jer će to biti predmet posebne studije, koja će se baviti i ostalim regionima mreže Elektrodistribucije Valjevo. Primer je, dakle u prvom redu tako biran da ilustruje karakteristike i mogućnosti predložene metode, dovodeći je do velikih iskušenja u pogledu konvergencije razvijenog iterativnog postupka i iznalaženja potencijalno dobrih rešenja, a da se pri tome sagleda i njena upotrebnost.

ZAKLJUČCI

U radu je prikazana jedna metoda (i odgovarajući računarski program UCOSFID) za utvrđivanje lokacije i snage uređaja za kompenzaciju reaktivne snage, koja se pokazala efikasnom i za distributivne mreže. Karakteristike i mogućnosti ovoga računarskog programa utvrđivane su na primeru realne distributivne mreže. Metoda, izložena u ovom radu, nema pretenzija da se "umeša" među sofisticiranije, optimizacione metode, korišćene za rešavanje pitanja kompenzacije reaktivne snage u distributivnim mrežama. Međutim, ako je to potrebno posebno da se naglašava, ova metoda (odnosno računarski program UCOSFID), predstavlja samo jedan od segmenata jedne veoma široke i kompleksne celine koja se bavi rešavanjem naponsko-reaktivne problematike u distributivnim mrežama.

LITERATURA

1. Zhang W., Tolbert L.M., "Survey of Reactive Power Planning Methods", IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 12-16, 2005, San Francisco
2. Čalović M., Sarić A., i Đukanović M., "Optimalno planiranje kompenzacije distributivnih mreža primenom dinamičkog programiranja", Zbornik XXIV Savetovanja JUKO CIGRE, Herceg Novi, Oktobar 1999., Referat 31-03.
3. "Planiranje izvora reaktivne snage u prenosnoj mreži EES Srbije – II faza", studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 2006.
4. Popović D.P., "Jedna metoda upravljanja tokovima reaktivnih snaga u normalnim i havarijskim stanjima elektroenergetskih interkonekcija", časopis "Elektroprivreda", br. 1, 2006., str. 7 – 24.
5. Popović D.P., Stojković M., "Naponsko-reaktivna stanja prenosnih mreža", monografija, Institut "Nikola Tesla", Beograd, ISBN 978-86-83349-09-8, jun 2009. godine, str.295.
6. Tinney W.F.and Hart C.E., "Power Flow Solution by Newton's Method", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-86, No.11, November 1967, pp. 1449-1467.
7. Popović D.P., Stojković M., "Jedan prilaz optimalnom izboru lokacije i snage uređaja za kompenzaciju reaktivne snage u električnim mrežama", časopis Tehnika - Elektrotehnika, br. 2, 2007., str.1-8.