Određivanje optimalnih lokacija i snaga kondenzatorskih baterija u distributivnim mrežama u cilju smanjenja harmonika i poboljšanja naponskog profila primenom genetskog algoritma

MILOŠ J. MILOVANOVIĆ, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici,
Kosovska Mitrovica

JORDAN N. RADOSAVLJEVIĆ, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, Kosovska Mitrovica

BOJAN D. PEROVIĆ, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, Kosovska Mitrovica

Stručni rad

UDC: 621.316.936

DOI: 10.5937/tehnika1706867M

U ovom radu je razmatran problem određivanja optimalnih lokacija i snaga kondenzatorskih baterija (KB) za kompenzaciju reaktivne snage u distributivnim mrežama u cilju redukcije viših harmonika i popravke naponskih prilika. Za rešavanje ovog nelinearnog višeciljnog optimizacionog problema sa ograničenjima predložen je genetski algoritam (GA). Detaljno je izložena metodologija proračuna tokova snaga za osnovni i za više harmonike od interesa i dati su modeli elemenata mreža u harmonijskim analizama. Predloženi postupak je uspešno testiran na standardnoj IEEE 33 test mreži, rešavanjem problema određivanja optimalnih lokacija i snaga KB za tri različite funkcije cilja. Proračun je pokazao efikasnost GA u rešavanju ovog kompleksnog problema.

Ključne reči: kondenzatorska baterija, distributivna mreža, genetski algoritam, tokovi snaga, viši harmonici

1. UVOD

Električna energija je komercijalni proizvod koji kao i svaki drugi proizvod treba da zadovolji odgovarajuće kriterijume u pogledu kvaliteta. Za ispravan i kvalitetan rad električnih uređaja i opreme, parametri kvaliteta električne energije moraju da budu unutar dozvoljenih granica koje su propisane odgovarajućim normama i standardima [1, 2]. U idealnim uslovima, električna energija se isporučuje na konstantnoj učestalosti i nazivnom naponu konstantne amplitude.

Međutim, u realnim sistemima je ovo teško ostvarljivo. Neželjena odstupanja od idealnog sinusoidalnog naponskog talasa posledica su postojanja potrošača sa nelinearnom strujno-naponskom karakteristikom, koji injektiraju struje viših harmonika u mrežu. Ove struje dovode do izobličenja napona koja mogu imati štetan uticaj na mrežu i potrošače u mreži [3-6]. Harmonijska

izobličenja na mreži ne mogu da se spreče ali se mogu održavati u prihvatljivim granicama. Jedna od mera za redukciju viših harmonika je ugradnja KB za kompenzaciju reaktivne snage. Priključenje otočnih KB na distributivnu mrežu, pored smanjenja harmonijskih izobličenja, doprinosi i poboljšanju naponskog profila mreže. Da bi se napravio optimalan izbor lokacije i snage uređaja za kompenzaciju treba primeniti optimizacioni postupak koji podrazumeva optimizaciju funkcije cilja, uz istovremeno zadovoljenje fizičkih granica sistemskih i upravljačkih promenljivih. Funkcija cilja može biti različita i najčešće se odnosi na minimizaciju gubitaka snage, poboljšanje naponskog profila mreže, minimizaciju ukupne harmonijske distorzije napona (THD_V) i dr.

U naučnoj literaturi je zastupljeno nekoliko pristupa za rešavanje ovog složenog problema [7]. Počevši od analitičkih optimizacionih tehnika, metoda linearnog i nelinearnog programiranja, pa do, u poslednje vreme, veoma popularnih heurističkih i metaheurističkih metoda baziranih na oponašanju bioloških organizama i fizičkih procesa u prirodi. Klasične optimizacione metode koje se zasnivaju na nalaženju gradijenta optimizacione funkcije i linearizaciji modela u okolini

Adresa autora: Miloš Milovanović, Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Kneza Miloša 7

e-mail: milos.milovanovic@pr.ac.rs

Rad primljen: 10.07.2017.

Rad prihvaćen: 24.10.2017.

radne tačke, traže samo lokalno rešenje, tj. tačku koja ima manju vrednost funkcije cilja od tačaka u njenoj okolini. Funkcija cilja je najčešće nelinearna i nekonveksna, a upravljačke promenljive mogu da budu i diskretne veličine. Zbog svega toga, primena klasičnih metoda optimizacije za rešavanje problema optimalnih lokacija i snaga KB realnih EES-a sa velikim brojem kontinualnih i diskretnih promenljivih veličina može ili da dovede do pogrešnog rezultata ili će utrošeno procesorsko vreme biti neekonomično i praktično neprihvatljivo. Upravo iz ovih razloga se sve više koriste evolutivne optimizacione tehnike koje prevazilaze navedene slabosti i imaju sposobnost da rešavaju praktične probleme u realnom vremenu. Jedna od najefikasnijih evolutivnih metoda je genetski algoritam (GA) [8]. U velikom broju radova za rešavanje problema optimalnih lokacija i snaga KB koristi se GA. U referenci [9] ovaj optimizacioni problem je rešen sa diskretnim vrednostima snaga KB, primenom integralnog genetskog algoritama sa kontrolisanom slučajnom inicijalizacijom. Kao funkcija cilja uzeti su godišnji troškovi rada sistema, uključujući troškove gubitaka energije i troškove ugradnje KB, uz uvažavanje naponskih ograničenja. U referenci [10] izložen je metod za optimalno planiranje reaktivne snage KB u cilju poboljšanja naponskog profila i smanjenja THD_v. Obuhvatanje više funkcija cilja u postupku određivanja optimalnih lokacija i snaga KB, kao što su smanjenje gubitaka snage, poboljšanje naponskog profila, poboljšanje nebalansiranja i smanjenje nivoa THD_v je ostvareno u referenci [11], gde se kao metod optimizacije koristi nedominirajući genetski algoritam sortiranja.

U ovom radu je predstavljen postupak za određivanje optimalnih lokacija i snaga KB u radijalnim distributivnim mrežama. Za rešavanje ovog optimizacionog zadatka upotrebljena je programska realizacija GA u softverskom paketu MATLAB. Predloženi postupak je testiran na standardnoj IEEE 33 test mreži. Primena GA omogućila je određivanje optimalnih rešenja za tri različite funkcije cilja: (i) minimizacija THD_v, (ii) minimizacija odstupanja napona i (iii) istovremena minimizacija THD_v i odstupanja napona. Za rešavanje tokova snaga u prisustvu viših harmonika ili kratko harmonijskih tokova snaga (HTS), radi evaluacije funkcije cilja, razvijen je program na bazi Shirmohammadi-jeve nazad/napred metode [12-15]. Verifikacija dobijenih rezultata je izvršena poređenjem sa referentnim rezultatima.

2. MODEL ELEMENATA DISTRIBUTIVNE MREŽE

U cilju analize rasprostiranja viših harmonika kroz distributivnu mrežu neophodno je na odgovarajući način modelovati elemente povezane u mreži. Elementi koji se moraju uzeti u obzir prilikom ove analize

su distributivni vodovi i kablovi, transformatori, linearni i nelinearni potrošači, otočni kondenzatori, prigušnice i generatori.

2.1. Model distributivnog voda/kabla

U zavisnosti od toga koje se konstante uzimaju u obzir, razlikuje se više ekvivalentnih šema voda/kabla. Distributivni vodovi i kablovi se obično predstavljaju ekvivalentnom „Π“ šemom. Uvažavanje uticaja viših harmonika postiže se korekcijom izraza za izračunavanje podužnih i otočnih parametara [5, 9, 12]:

$$\underline{Z}_v(h) = R_v(h) + jX_v(h), \quad (1)$$

$$\underline{Y}_v^{ot}(h) = jB_v^{ot}(h), \quad (2)$$

$$R_v(h) = R_v \cdot \left(1 + \frac{0.646 \cdot h^2}{192 + 0.518 \cdot h^2} \right), \quad (3)$$

$$R_v(h) = R_k \cdot (0.187 + 0.532 \cdot \sqrt{h}), \quad (4)$$

$$X_v(h) = h \cdot X_v, \quad (5)$$

$$B_v^{ot}(h) = h \cdot B_v^{ot}. \quad (6)$$

Značenje oznaka u prethodnim izrazima je sledeće:

$R_v(h)$, $X_v(h)$, $B_v^{ot}(h)$ - rezistansa, reaktansa i otočna susceptansa voda/kabla koje se računaju na frekvenciji od interesa, respektivno,

R_v , R_k , X_v , B_v^{ot} - rezistansa voda, rezistansa kabla, reaktansa i otočna susceptansa voda/kabla proračunate na osnovnoj frekvenciji (50 Hz), respektivno, h - red harmonika.

Uticaj skin efekta se uvažava uvećanjem rezistanse, pri čemu se jednačina (3) koristi za vodove, a jednačina (4) za kablove.

2.2. Model distributivnog transformatora

Za praktičnu analizu harmonika može se koristiti jednostavan model iskazan relacijom [5]:

$$\underline{Z}_T(h) = R_T + jhX_T, \quad (7)$$

gde su R_T i X_T rezistansa i reaktansa redne grane transformatora proračunate na osnovnoj frekvenciji.

2.3. Model otočnog kondenzatora

Na osnovnoj frekvenciji konstantna admitansa kondenzatora se računa kao:

$$\underline{Y}_C = \left(\frac{-jQ_C}{V_C^2} \right)^*, \quad (8)$$

gde je Q_C reaktivna snaga kondenzatora, a V_C modul napona na mestu njegovog priključenja.

Pri višim harmonicima admitansa kondenzatora se računa saglasno jednačini [4, 5, 12]:

$$\underline{Y}_C(h) = h \cdot \underline{Y}_C. \quad (9)$$

2.4. Model potrošača

Linearni pasivni potrošači ne stvaraju harmonijska izobličenja u talasnim oblicima napona i struja. Ekvi-valentni modeli linearnih potrošača sadrže različite kombinacije rednih i paralelnih veza otpornika, kalema i kondenzatora. U zavisnosti od karakteristika potrošača i dostupnih informacija, predloženi su različiti modeli [3, 16]. Kod paralelnog *RL* modela admitansa pasivnog potrošača je [4]:

$$\underline{Y}_P(h) = \frac{P_P}{V_P^2} - j \frac{Q_P}{h \cdot V_P^2}, \quad (10)$$

gde su P_P i Q_P aktivna i reaktivna snaga pasivnog potrošača, a V_P je amplituda napona čvora u koji je potrošač priključen.

Nelinearni potrošači, kao što su energetski pretvarači, se na osnovnoj frekvenciji ponašaju kao pasivni potrošači, dok se pri višim harmonicima tretiraju kao izvori konstantne struje. Ako je poznata snaga nelinearnog potrošača, $\underline{S}_{NP}$, i napon na mestu njegovog priključenja, $\underline{V}_{NP}$, struja kroz potrošač za osnovni harmonik biće:

$$\underline{I}_{NP} = \left(\frac{\underline{S}_{NP}}{\underline{V}_{NP}} \right)^*. \quad (11)$$

Ispravljači proizvode harmonike čiji red zavisi od vrste ispravljačkog mosta. Red viših harmonika ispravljačkog mosta se određuje jednačinom [2]:

$$h = n \cdot p \pm 1, \quad (12)$$

gde je $n=1, 2, 3, \dots$ niz uzastopnih prirodnih brojeva, a p je broj impulsa po periodu. Koristeći izraz (12) dobija se da trofazni šestoimpulsni ispravljački most, koji se najčešće koristi u regulisanim jednosmernim pogonima kao prvi deo u frekventnim pretvaračima, proizvodi više harmonike 5, 7, 11, 13, 17, 19, ... reda.

Kod trofaznog šestoimpulsnog ispravljačkog mosta, amplitude viših harmonika su obrnuto proporcionalne redu harmonika [2]:

$$I_{NP}(h) = \frac{I_{NP}}{h}. \quad (13)$$

3. MATEMATIČKA FORMULACIJA PROBLEMA

Problem određivanja optimalnih lokacija i snaga KB se može matematički iskazati na sledeći način:

$$\min F(x, u) \quad (14)$$

pri ograničenjima:

$$g(x, u) = 0 \quad (15)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (16)$$

$$u \in U \quad (17)$$

gde je F funkcija cilja koju treba minimizirati, x i u su vektori zavisnih i nezavisnih (upravljačkih) promenljivih, respektivno.

Vektor upravljačkih promenljivih (u) se sastoji od reaktivnih snaga injektiranja otočnih KB. Zavisno promenljive (x) su efektivne vrednosti napona čvorova i ukupne harmonijske distorzije napona u mreži.

3.1. Funkcija cilja

Problem određivanja optimalnih lokacija i snaga KB je rešavan za tri različite funkcije cilja i to: (i) minimizacija THD_V , (ii) minimizacija odstupanja napona i (iii) istovremena minimizacija THD_V i odstupanja napona.

Slučaj 1: Minimizacija THD_V

$$F_1 = \sum_{i=0}^N \max(THD_{Vi}), \quad (18)$$

gde je THD_{Vi} ukupna harmonijska distorzija napona u čvoru i , a N poslednji čvor u mreži.

Slučaj 2: Minimizacija odstupanja napona

$$F_2 = \sum_{i=0}^N |V_{ref} - V_i|, \quad (19)$$

gde su V_{ref} i V_i efektivne vrednosti referentnog napona i napona u i -tom čvoru, respektivno.

Slučaj 3: Istovremena minimizacija THD_V i odstupanja napona

$$F_3 = F_1 + w_v F_2, \quad (20)$$

gde je w_v težinski faktor za funkciju odstupanja napona.

3.2. Ograničenja

Ograničenja tipa jednakosti (15) čine jednačine kojima se definišu injektiranja aktivnih i reaktivnih snaga po čvorovima mreže. Ograničenja tipa nejednakosti (16) su funkcionalna ograničenja zavisno promenljivih stanja i uvažavaju ograničenja modula napona čvorova i ograničenja THD_V .

Ograničenja formulisana jednačinom (17) definišu oblast mogućih vrednosti upravljačkih promenljivih i uvažavaju ograničenja reaktivnih snaga otočnih KB.

Ograničenja zavisnih promenljivih (x) se obuhvataju uvođenjem kvadratnih penalnih članova kojima se proširuje funkcija cilja [8].

3.3. Algoritam za rešavanje harmonijskih tokova snaga

Korišćeni metod za proračun HTS u distributivnim mrežama sa nelinearnim potrošačima sadrži osam glavnih koraka:

Korak 1. Inicijalizacija postupka za osnovni harmonik napona

Inicijalizacija se sastoji u početnom pogađanju modula i fazora napona čvorova. Obično se uvodi polazna pretpostavka da su u početnoj (0-toj) iteraciji naponi u svim čvorovima jednaki naponu napojnog čvora (V_0):

$$V_i^{(0)} = V_0; \quad \theta_i^{(0)} = 0; \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, N, \quad (21)$$

gde je $V_i^{(0)}$ početno pogađanje modula fazora napona u čvoru i , $\theta_i^{(0)}$ je početno pogađanje ugla fazora napona u čvoru i .

Korak 2. Izvršavanje proračuna tokova snaga za osnovni harmonik

Izračunavanje nepoznatih napona i tokova snaga vrši se pomoću standardnog nazad/napred metoda. Jedna iteracija proračuna se sastoji od sledeća tri koraka:

Korak 2 (a). Zamena unazad – proračun struja

U ovom koraku se vrši izračunavanje struja koje teku po granama mreže u k -toj iteraciji, koristeći vrednosti napona čvorova iz prethodne iteracije, počev od krajnjeg čvora i krećući se ka tački napajanja.

Shodno ekvivalentnoj šemi na slici 1, struja redne grane i u k -toj iteraciji je [12-14]:

$$\underline{J}_i^{(k)} = \underline{I}_{Pi}^{(k)} + \underline{I}_{Ci}^{(k)} + \underline{I}_{NPi}^{(k)} + \underline{Y}_i^{ot} \cdot \underline{V}_i^{(k-1)} + \sum_{\substack{l \in \alpha_i \\ l \neq i}} \underline{J}_l^{(k)}; \quad (22)$$

$$i = N, N-1, \dots, 0; \quad k = 1, 2, \dots$$

gde su:

$\underline{I}_{Pi}^{(k)}$, $\underline{I}_{NPi}^{(k)}$, $\underline{I}_{Ci}^{(k)}$ - kompleksna struja linearnog potrošača, kompleksna struja nelinearnog potrošača i kompleksna struja kondenzatora u čvoru i u k -toj iteraciji, respektivno;

$\underline{Y}_i^{ot}$ - suma otočnih admitansi elemenata u čvoru i ;

$\underline{V}_i^{(k-1)}$ - kompleksni napon čvora i iz prethodne ($k-1$) iteracije;

α_i - ukupan broj grana koje polaze iz čvora i .

Kompleksne struje potrošača i kondenzatora se izračunavaju u skladu sa načinom modelovanja potrošača. Pri proračunu tokova snaga za osnovni harmonik

u radu su svi potrošači i kondenzatori predstavljeni modelom konstantne snage.

Slika 1 - Raspodela struja u i -tom čvoru mreže

Struje koje figurišu u jednačini (22) u k -toj iteraciji se izračunavaju na sledeći način [14]:

$$\underline{I}_{Pi}^{(k)} = \left(\frac{P_{Pi} + jQ_{Pi}}{\underline{V}_i^{(k-1)}} \right)^*, \quad (23)$$

$$\underline{I}_{Ci}^{(k)} = \left(\frac{-jQ_{Ci}}{\underline{V}_i^{(k-1)}} \right)^*, \quad (24)$$

$$\underline{I}_{NPi}^{(k)} = \left(\frac{P_{NPi} + jQ_{NPi}}{\underline{V}_i^{(k-1)}} \right)^*, \quad (25)$$

gde su:

P_{Pi} , Q_{Pi} - aktivna i reaktivna snaga linearnih potrošača, respektivno;

P_{NPi} , Q_{NPi} - aktivna i reaktivna snaga nelinearnih potrošača, respektivno;

Q_{Ci} - reaktivna snaga kondenzatora.

Korak 2 (b). Zamena unapred – proračun napona

Polazeći od napojnog čvora i krećući se ka granama u poslednjem čvoru, određuju se nove vrednosti napona čvorova [12-14]:

$$\underline{V}_i^{(k)} = \underline{V}_0^{(k)} - \underline{Z}_i \cdot \underline{J}_i^{(k)}, \quad (26)$$

gde je $\underline{V}_0^{(k)}$ kompleksni napon napojnog čvora u k -toj iteraciji, a $\underline{Z}_i$ je redna impedansa grane i .

Korak 2 (c). Provera kriterijuma konvergencije

Koraci 2 (a) i 2 (b) se ponavljaju sve dok ne bude zadovoljen kriterijum konvergencije. Kao kriterijum konvergencije može se uzeti uslov da je razlika napona u dve uzastopne iteracije manja od neke unapred zadate vrednosti:

$$\varepsilon_V \geq \max |V_i^{(k)} - V_i^{(k-1)}|. \quad (27)$$

Parametar konvergencije ε_V najčešće je reda $10^{-5} \div 10^{-3}$ r.j. [14].

Korak 3. Modifikovanje ekvivalentnog kola za proračun harmonika višeg reda

U ovom radu su linearni pasivni potrošači modelovani paralelnim RL modelom (jednačina (10)), nelinearni potrošači kao strujni izvori (jednačina (13)), a otočni kondenzatori modelom u kome je admitansa viših harmonika direktno proporcionalna razmatranom redu harmonika (jednačina (9)).

Korak 4. Inicijalizacija postupka za harmonike višeg reda

Ako su struje nelinearnih opterećenja jedini izvori viših harmonika u mreži, tj. ako napon napojnog čvora ne sadrži više harmonijske komponente, onda se može smatrati da su u početnoj iteraciji naponi u svim čvorovima jednaki nuli [15]:

$$(V_i(h))^{(0)} = 0; (\theta_i(h))^{(0)} = 0; \quad i = 0, 1, 2, \dots, N. \quad (28)$$

Korak 5. Izvršavanje proračuna tokova snaga za više harmonike

Za izračunavanje nepoznatih vrednosti h -tog harmonika napona i struja primenjuje se sličan iterativni postupak koji je opisan u koraku 2.

Korak 5 (a). Zamena unazad – proračun struja

Iterativni postupak koji se ovde koristi razlikuje se od ranije opisanog postupka u koraku 2 po tome što sada strujna injektiranja nelinearnih potrošača ostaju konstantna tokom celog procesa, odnosno:

$$(\underline{J}_i(h))^{(k)} = (\underline{I}_{Pi}(h))^{(k)} + (\underline{I}_{Ci}(h))^{(k)} - \underline{I}_{NPi}(h) + \underline{Y}_i^{ot'}(h) \cdot (\underline{V}_i(h))^{(k-1)} + \sum_{\substack{l \in \mathcal{A}_i \\ l \neq i}} (\underline{J}_l(h))^{(k)}, \quad (29)$$

$$(\underline{I}_{Pi}(h))^{(k)} = \underline{Y}_{Pi}'(h) \cdot (\underline{V}_i(h))^{(k-1)}, \quad (30)$$

$$(\underline{I}_{Ci}(h))^{(k)} = \underline{Y}_{Ci}'(h) \cdot (\underline{V}_i(h))^{(k-1)}. \quad (31)$$

U jednačinama (29)-(31) novouvedene oznake imaju sledeće značenje:

$(\underline{J}_i(h))^{(k)}$ - struja redne grane i u k -toj iteraciji pri h -tom harmoniku;

$(\underline{I}_{Pi}(h))^{(k)}$, $(\underline{I}_{Ci}(h))^{(k)}$ - struje linearnog potrošača i kondenzatora u čvoru i u k -toj iteraciji pri h -tom harmoniku, respektivno;

$\underline{I}_{NPi}(h)$ - konstantna struja koju injektira nelinearni potrošač u čvoru i pri h -tom harmoniku;

$\underline{Y}_i^{ot'}(h)$ - modifikovana otočna admitansa elementa u čvoru i pri h -tom harmoniku;

$(\underline{V}_i(h))^{(k-1)}$ - kompleksni napon čvora i iz prethodne iteracije pri h -tom harmoniku.

Korak 5 (b). Zamena unapred – proračun napona

U ovom koraku se, polazeći od napojnog čvora u kome je napon jednak nuli, određuju harmonici napona u čvorovima sistema:

$$(\underline{V}_i(h))^{(k)} = 0 - \underline{Z}_i'(h) \cdot (\underline{J}_i(h))^{(k)}, \quad (32)$$

gde $\underline{Z}_i'(h)$ predstavlja modifikovanu rednu impedansu grane i pri h -tom harmoniku.

Korak 5 (c). Provera kriterijuma konvergencije

Opisani postupak u prethodnim koracima se ponavlja za svaki viši harmonik sve dok se ne postigne rešenje zadovoljavajućeg kvaliteta ili izvrši maksimalan broj iteracija ($k_{\max}$).

Na kraju proračuna, predloženim postupkom HTS se mogu odrediti snage koje teku po granama mreže i gubici snaga po elementima mreže:

$$\underline{S}_i(h) = \underline{V}_i(h) \cdot (\underline{J}_i(h))^*, \quad (33)$$

$$\underline{S}_{gub_i}(h) = \underline{Z}_i(h) \cdot |\underline{J}_i(h)|^2. \quad (34)$$

Korak 6: Memorisanje dobijenih rezultata

Rezultati proračuna su naponi i struje osnovnog harmonika i viših harmonika, tokovi snaga po granama mreže i snage gubitaka.

Korak 7: Proveravanje da li je specificirani najveći red harmonika postignut

Ako najveći red harmonika nije postignut, ponovo se sprovede proračuni u koracima 3÷6.

Korak 8: Izračunavanje harmonijskih indikatora

Ukupna harmonijska distorzija napona (THD_V), koja predstavlja meru bliskosti stvarnog talasnog oblika napona i njegovog osnovnog harmonika, se definiše jednačinom [2]:

$$THD_V = \frac{1}{V_1} \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} \cdot 100(\%), \quad (35)$$

gde je V_1 efektivna vrednost osnovnog harmonika napona, a V_h je efektivna vrednost pojedinačnih harmonijskih komponenti. Za kvalitetan rad uređaja nivo THD_V ne sme biti veći od 5 % [2].

3.4č. Genetski algoritam (GA)

Genetski algoritam je robusna i adaptivna metoda zasnovana na principima evolucije i genetike [8]. GA pripada grupi populaciono-iterativnih metoda i uspešno se koristi za rešavanje problema numeričke optimizacije. Osnovni gradivni element GA je hromozom. Kvalitet svakog hromozoma se kvantifikuje preko vrednosti fitnes funkcije.

Proces pretraživanja kod GA započinje nasumično odabranim setom rešenja, tj. brojem hromozoma, najčešće kodiranih kao binarni string (niz podataka) konačne dužine. Svaki string predstavlja moguće

rešenje problema, a svaki podatak (gen) u stringu promenljivu stanja u tom problemu. Pošto su to delovi stringa mogu se nazvati substringovi. Za problem optimalnih lokacija i snaga KB struktura stringa je data na slici 2. U ovom slučaju substring sadrži podatak o lokaciji i snazi KB. Broj substringova, a time i veličina stringa, zavisi od broja promenljivih koje se optimizuju, odnosno od broja KB (NC) za koje treba odrediti optimalne lokacije i snage.

1	2	N_C				
čvor	Q_C	čvor	Q_C	...	čvor	Q_C

Slika 2 - Struktura stringa pri određivanju optimalnih lokacija i snaga KB kod GA

U svakoj generaciji vrednost fitnes funkcije, koja je u relaciji sa vrednošću funkcije cilja u problemu optimizacije koji se rešava, svakog hromozoma u populaciji se ocenjuje. U ovom slučaju se evaluacija vrednosti fitnes funkcije vrši proračunom HTS. U zavisnosti od dobijene vrednosti fitnes funkcije, na hromozome se primenjuju različiti operatori, u cilju favorizovanja hromozoma koji su najbliži rešenju problema. Osnovni operatori koji vrše operacije nad genima radi zamene njihovog mesta u samom hromozomu su: selekcija, ukrštanje i mutacija. Obično se jedna generacija može podeliti u dve faze [14]. Na početku procesa ima se jedna tekuća populacija. Selekcija omogućava eliminaciju loših hromozoma (rešenja) i preživljavanje boljih hromozoma, čime se kreira jedna među-populacija (parovi roditelja). Selekcija je ustvari proces u kome se pojedini geni prenose u sledeću generaciju. Posle selekcije, u drugoj fazi, primenjuju se operatori ukrštanja i mutacije. Ukrštanje je proces u kome razmenom gena roditelja nastaju dve nove jedinice (deca). Nakon ukrštanja vrši se i mutacija da bi se slučajnom promenom gena izmenila svojstva novonastalih jedinica. Na taj način se postiže da jedinice iz generacije u generaciju budu sve bolje, što znači da se vrednosti promenljivih stanja približavaju optimalnim vrednostima.

Postupak GA se zaustavlja kada je proizveden maksimalni broj generacija ili kada je dostignut zadovoljavajući nivo fitnesa za populaciju. Performanse GA u velikoj meri zavise od pravilnog podešavanja kontrolnih parametara. Nažalost, za to podešavanje ne postoji univerzalno pravilo već se ono vrši na osnovu iskustva, odnosno principa probaj-greši. Više detalja o GA se može naći u [8-11,14].

4. REZULTATI PRORAČUNA

Prethodno opisani postupak je testiran na standardnom IEEE test sistemu sa 33 čvora. Na slici 3 prikazana je jednopolna šema razmatranog test sistema. Kompletni podaci o elementima mreže i potrošnji se

mogu preuzeti iz [17]. Izvori harmonika u ovom sistemu su trofazni šestoimpulsni ispravljački mostovi aktivne snage 1 MW i reaktivne snage 0.75 MVar. Ova nelinearna opterećenja, priključena u čvorovima 5 i 26, generišu harmonike 5, 7, 11, 13,... reda.

Slika 3 - Jednopolna šema test sistema IEEE 33

Najpre je izvršen proračun HTS za bazni slučaj bez priključenih KB. Rezultati tog proračuna su uporedo prikazani sa referentnim rezultatima iz [18] u tabeli 1. Proračun HTS je izvršen za sledeće parametre: kriterijum konvergencije $\varepsilon_v=10^{-5}$ r.j., maksimalan broj iteracija $k_{\max}=200$, bazni napon $U_B=12.66$ kV i bazna snaga $S_B=1$ MVA. Pretpostavljeno je da napon u napojnom čvoru iznosi 12.66 kV, odnosno 1 r.j. i da nema harmonijske distorzije u njemu. Razmatrani su harmonici do 25-tog reda. Nakon toga je sproveden postupak određivanja optimalnih lokacija i snaga KB za tri KB, uz uslov da se u jedan čvor može priključiti samo jedna KB. Svi čvorovi sistema su razmatrani kao moguće lokacije za priključenje KB. Na taj način je obezbeđena pouzdanost optimalnog rešenja, tj. veća je verovatnoća da je pronađeno rešenje optimalno, ali je, s druge strane, povećan broj kombinacija za pretraživanje i vreme proračuna. Problem je rešen sa diskretnim vrednostima snaga KB. Zadati opseg mogućih snaga otočnih KB je od 0 do 500 kVar, sa inkrementom od 50 kVar. Minimalne i maksimalne efektivne vrednosti napona čvorova su 0.9 r.j. i 1.1 r.j., respektivno. Gornja granica za THD_v je 5 %.

Kao što se može videti iz table 1, najveće ukupno harmonijsko izobličenje napona je u čvoru 32 i ono je posledica priključenih ispravljačkih mostova. Dobijeni rezultati se dobro slažu sa referentnim rezultatima iz [18].

Maksimalno odstupanje dobijenih efektivnih vrednosti napona čvorova u odnosu na referentne napone je -0.345 %, dok je maksimalno odstupanje ukupne harmonijske distorzije napona -4.807 %. Takođe, može se zaključiti da su u baznom slučaju efektivne vrednosti napona u čak 18 čvorova ispod dozvoljene vrednosti (0.9 r.j.), kao i da je THD_v u pojedinim čvorovima veća od granične vrednosti (5 %).

U cilju poboljšanja naponskog profila i smanjenja THD_v-a, GA iz MATLAB R2011b softverskog paketa primenjen je za određivanje optimalnih lokacija i snaga KB za tri različite funkcije cilja. Analiza brzine konvergencije izvršena je na personalnom računaru sa

operativnim sistemom MS Windows 10, Intel Dual Core procesorom brzine 1.6 GHz i 2 GB RAM-a. Prosečno vreme izvršenja algoritma iznosilo je 20 min. Osnovni kontrolni parametri GA koji su korišćeni za rešavanje ovog problema, veličina populacije i maksimalan broj generacija bili su podešeni na 50 i 100, respektivno.

Za svaku od tri analizirane funkcije cilja problem je rešen u 10 uzastopnih izvršavanja GA sa istim kontrolnim parametrima. Težinski faktor w_v iznosio je 3. Najbolja rešenja su prikazana u tabeli 2.

Tabela 1. Rezultati proračuna HTS u test sistemu IEEE 33 za bazni slučaj

Čvor	V_{rms} (r.j.)		THD _v (%)		Čvor	V_{rms} (r.j.)		THD _v (%)	
	Izračunato	Ref. [18]	Izračunato	Ref. [18]		Izračunato	Ref. [18]	Izračunato	Ref. [18]
0	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	17	0.8666	0.8693	7.6022	7.8300
1	0.9951	0.9952	0.2255	0.2300	18	0.9946	0.9947	0.2257	0.2300
2	0.9711	0.9717	1.4653	1.5100	19	0.9910	0.9911	0.2274	0.2300
3	0.9563	0.9573	2.4152	2.5000	20	0.9903	0.9904	0.2277	0.2300
4	0.9414	0.9429	3.4339	3.5500	21	0.9897	0.9897	0.2280	0.2300
5	0.9050	0.9077	7.2119	7.5000	22	0.9674	0.9681	1.4744	1.5200
6	0.9013	0.9040	7.1680	7.5300	23	0.9607	0.9613	1.4942	1.5300
7	0.8962	0.8989	7.2342	7.5700	24	0.9573	0.9579	1.5056	1.5300
8	0.8896	0.8924	7.2826	7.6300	25	0.9012	0.9040	7.5222	7.8200
9	0.8835	0.8863	7.3476	7.6800	26	0.8960	0.8990	7.9583	8.2600
10	0.8826	0.8854	7.3618	7.6900	27	0.8839	0.8869	8.0877	8.3800
11	0.8810	0.8838	7.3865	7.7000	28	0.8753	0.8783	8.2236	8.4600
12	0.8746	0.8774	7.4694	7.7600	29	0.8715	0.8745	8.2958	8.5000
13	0.8722	0.8750	7.5027	7.7800	30	0.8672	0.8701	8.3781	8.5400
14	0.8707	0.8735	7.5270	7.8000	31	0.8662	0.8692	8.3985	8.5500
15	0.8693	0.8721	7.5523	7.8100	32	0.8659	0.8689	8.4047	8.5500
16	0.8672	0.8699	7.5896	7.8300					

Tabela 2. Rešenja optimizacionog problema za razmatrane funkcije cilja

Upravljačke promenljive, zavisne promenljive i funkcije cilja			Pre optimizacije (bazni slučaj)	Slučaj 1: Minimizacija THD _v	Slučaj 2: Minimizacija odstupanja napona	Slučaj 3: Minimizacija THD _v i odstupanja napona
Optimalne lokacije i snage KB	KB1	Lokacija	/	15	17	16
		Snaga (kVAr)	/	500	500	500
	KB2	Lokacija	/	30	31	30
		Snaga (kVAr)	/	500	500	500
	KB3	Lokacija	/	31	32	31
		Snaga (kVAr)	/	500	500	500
Minimalni napon (r.j.)			0.8659	0.9001	0.9004	0.9005
Maksimalni napon (r.j.)			1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Maksimalna THD _v (%)			8.4047	4.2485	4.5124	4.4475
Odstupanje napona (r.j.)			2.7979	2.2257	2.2002	2.2163
Gubici snage (kW)			607.50	444.41	450.92	446.83

Na osnovu prikazanih rezultata, zaključuje se da su nakon ugradnje KB naponi i THD_v u svim čvorovima u skladu sa propisanim vrednostima. Razmatrane

funkcije cilja nisu kontradiktorne jer se minimizacijom jedne istovremeno vrši i minimizacija druge. U odnosu na bazni slučaj, minimizacijom THD_v postiže

se smanjenje maksimalne THD_V za 49.45%, kao i smanjenje odstupanja napona za 20.45%. Minimizacija odstupanja napona kao funkcija cilja rezultuje smanjenje odstupanja napona za 21.36% i smanjenje maksimalne THD_V za 46.31% u odnosu na bazni slučaj. Istovremenom minimizacijom THD_V i odstupanja napona dobija se rešenje koje omogućava smanjenje maksimalne distorzije napona od 47.08% i smanjenje odstupanja napona od 20.79%. Takođe, podešavanjem upravljačkih promenljivih na optimalne vrednosti za odgovarajuće funkcije cilja postiže se smanjenje ukupnih gubitaka aktivne snage od 25.77% do 26.85% u odnosu na bazni slučaj.

Pošto optimizacionim postupkom nisu obuhvaćeni investicioni troškovi ugradnje KB, algoritam uvek teži da dostigne gornju granicu snage raspoloživih KB, što je sasvim logično s obzirom da je regulacija napona u direktnoj vezi sa kompenzacijom reaktivne snage. Zbog stohastičke prirode GA, generisana rešenja se mogu smatrati samo kao lokalni optimumi.

To znači da sigurno postoje i druge kombinacije upravljačkih promenljivih koje bi dale istu ili čak manju vrednost funkcije cilja. Međutim, dobijena rešenja se sigurno nalaze u blizini globalnog optimuma.

Na slici 4 su prikazani odgovarajući naponski profili mreže. Kao što se može videti, efektivne vrednosti napona u svim čvorovima se nalaze u okviru definisanih granica.

Slika 4 - Naponski profili distributivne mreže pre i posle ugradnje KB.

5. ZAKLJUČAK

U radu je predložen genetski algoritam za rešavanje problema optimalnih lokacija i snaga KB u radijalnim distributivnim mrežama. Primena GA je omogućila uključivanje zavisnih i upravljačkih promenljivih u proces optimizacije i obezbedila dobijanje optimalnog rešenja u skladu sa definisanim funkcijama cilja. Postupak je uspešno primenjen na standardnom IEEE 33 test sistemu sa dva nelinearna potrošača i tri KB. Dobijeni rezultati pokazali su da je GA adekvatan izbor za ovakav optimizacioni problem.

6. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Vladi Republike Srbije za finansiranje ovog rada u okviru projekta TR 33046.

LITERATURA

- [1] European Standard EN 50160. *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*, 1999.
- [2] IEEE Standard 519-1992. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE, New York, 1993.
- [3] Bayan N. *Harmonic Flow Analysis in Power Distribution Networks*, University of Windsor, Ontario, 1999.
- [4] Fuchs E. F, Masoum MAS. *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, Elsevier, USA, 2008.
- [5] Arrillaga J, NR Watson, *Power System Harmonics*, 2nd edition, John Wiley & Sons, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2003.
- [6] Smith BC, Arrillaga J, Wood AR, Watson NR. A Review of Iterative Harmonic Analysis for AC-DC Power Systems, *IEEE Trans. Power Deli.*, Vol. 13, No. 1, pp. 180-185, 1998.
- [7] Mahela O. P, Mittal D, Goyal L, Optimal Capacitor Placement Techniques in Transmission and Distribution Networks to Reduce Line Losses and Voltage Stability Enhancement: A Review, *Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, Vol. 3, No. 4, pp. 01-08, 2012.
- [8] Holland J. H, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts London, England, 1992.
- [9] Vuletic J, Todorovski M, Reduction of Losses and Harmonic Distortion in Distribution Networks with Different Load Models by Placing Shunt Capacitors using Integer Genetic Algorithm, *Przeglad elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 91 NR 6, pp. 84-87, 2015.
- [10] Niknam T, Ranjbar A. M, Arabian H, Mirjafari M, Optimal reactive power planning in harmonic distorted power system using genetic algorithm, *Proc. IEEE Region 10 Conf.*, pp. 347-350, 2004.
- [11] Jeihouni P, Safari A, Sakhavati A, A Multi Objective Genetic Algorithm for Capacitor Placement in Unbalanced and Harmonic Distorted Distribution Systems, *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, Vol. 4, No.3, pp. 141-148, 2011.

- [12]Šošić D, Žarković M, Dobrić G, Fuzzy-based Monte Carlo Simulation for Harmonic Load Flow in Distribution Networks, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 9, No. 3, pp. 267-275, 2015.
- [13]Shirmohammadi D, Hong HW, Semlyen A, Luo GX, A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 3, No. 2, pp. 753-762, 1988.
- [14]Radosavljević J, Jevtić M, *Analiza distributivnih mreža sa distribuiranim generatorima*, Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, 2013.
- [15]Archundia-Aranda I, Mota-Palomino RO. Harmonic Penetration Method for Radial Distribution Networks, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, Vol. 15, No. 2, pp. 111–117, 2014.
- [16]Bonner A, Grebe T, Gunther E, Hopkins L, Marz M. B, Mahseredjian J, Miller N. W, Omneyer T. H, Rajagopalan V, Ranade S. J, Ribeiro P. F, Shperling BR, Sims TR, Xu W. Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks, Part I & II, *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 11, No. 1, pp. 452-474, 1996.
- [17]Baran M. E, Wu F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 4, No. 2, pp. 1401–1407, 1989.
- [18]Heydari M, Hosseini S. M, Gholamian S. A. Optimal Placement and Sizing of Capacitor and Distributed Generation with Harmonic and Resonance Considerations Using Discrete Particle Swarm Optimization, *I. J. Intelligent Systems and Applications*, Vol. 5, No. 7, pp. 42-49, 2013.

SUMMARY

OPTIMAL LOCATION AND SIZING OF CAPACITOR BANKS IN DISTRIBUTION NETWORKS TO REDUCE HARMONIC DISTORTION AND IMPROVE VOLTAGE PROFILE USING GENETIC ALGORITHM

This paper considers the problem of determination of optimum locations and sizes of capacitor banks (CB) for reactive power compensation in distribution systems to reduce harmonic distortion and improve voltage profile. Genetic Algorithm (GA) was used for solving this non-linear multi-objective optimization problem with constraints. A detailed methodology was presented for solving the power flow problem at fundamental and higher harmonic frequencies of interest and models of network components in harmonic analysis. The proposed procedure was successfully tested on the standard IEEE 33-bus test system for three different objective functions. Calculations showed the efficiency of GA for solving this complex problem.

Key words: capacitor bank, distribution network, genetic algorithm, power flow, higher harmonics