

OPTIMIZACIJA LOKACIJA I SNAGA KONDENZATORSKIH BATERIJA U PRISUSTVU VIŠIH HARMONIKA PRIMENOM GENETSKOG ALGORITMA

Miloš MILOVANOVIĆ*, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Srbija
Jordan RADOSAVIJEVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Srbija
Bojan PEROVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Rad se bavi određivanjem optimalnih lokacija i snaga kondenzatorskih baterija u distributivnim mrežama sa nelinearnim potrošačima. Ovaj nelinearni kombinatorni optimizacioni problem je rešen genetskim algoritmom (GA). Predloženi postupak je testiran na standardnom test sistemu IEEE 18, pri čemu je osnovni cilj optimizacije bio ostvarenje minimalnih godišnjih operativnih troškova sistema uz zadovoljavanje svih relevantnih tehničkih zahteva i ograničenja. Pokazano je da se pravilnim pozicioniranjem i dimenzionisanjem kondenzatorskih baterija mogu ostvariti značajni tehnički i ekonomski efekti.

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

SUMMARY

This paper deals with the problem of determining the optimal placement and sizing of fixed capacitor banks in distribution networks with nonlinear loads. Genetic Algorithm (GA) was employed to solve this non-linear combinatorial optimization problem. The proposed procedure was tested on the standard IEEE 18-bus test system where the primary goal of optimization was to achieve minimum annual operating costs of the system with meeting all the relevant technical requirements and limitations. Calculations showed that proper placement and sizing of capacitor banks can achieve significant technical and economic effects.

Key words: capacitor banks, distribution systems, higher harmonics, genetic algorithm, optimization

*milos.milovanovic@pr.ac.rs

UVOD

Određivanje optimalnih lokacija i snaga kondenzatorskih baterija je veoma složen i uvek aktuelan optimizacioni zadatak koji već dugi niz godina privlači pažnju istraživača. Adekvatnom kompenzacijom reaktivnih snaga može se ostvariti značajno poboljšanje naponskih prilika u mrežu, smanjenje gubitaka snage, a samim tim i poboljšanje prenosnih sposobnosti sistema. Tradicionalni pristup rešavanja ovog problema zasniva se na pretpostavci da su potrošači u mreži linearni i obuhvata samo osnovnu frekvenciju napona, zanemarujući više harmonijske frekvencije. Međutim, sve veća zastupljenost nelinearnih potrošača koji generišu više harmonike u mrežu nametnula je potrebu za razvijanjem novih alata i tehnika, kao i prilagođavanje već postojećih, kako bi se efekat harmonika uzeo u obzir. Harmonijske struje nastale zbog nelinearnih potrošača teku kroz impedansu sistema i uzrokuju izobličenja napona koja mogu imati štetan uticaj na mrežu i potrošače u mreži. Nepovoljni efekti harmonika na elektroenergetski sistem manifestuju se povećanjem gubicima snage, opasnim pojavama rezonancije, uticaju na elemente zaštite i na tačnost standardnih mernih instrumenata, uticaju na telekomunikacione mreže i dr. Oni zavise ne samo od tipa, veličine i lokacije izvora viših harmonika, već i od konfiguracije mreže, parametara mreže i lokacije uređaja osetljivih na više harmonike. Istraživanja pokazuju da je većina problema vezanih za harmonijsko izobličenje u EES-u posledica rezonancije. Rezonancija je pojava u kojoj se induktivna reaktansa sistema izjednačava sa kapacitivnom reaktansom kondenzatora na nekoj frekvenciji. Tada dolazi do naglog povećanja struje u kolu, odnosno napona na kondenzatoru, koje može uzrokovati kvarove, najčešće na samim kondenzatorima, ali i na drugim elementima sistema. Prisustvo rezonancije u EES-u je nedopustivo i mora se

izbeći. Zato je veoma važno da se u procesu nalaženja najpovoljnijih lokacija i snaga kondenzatorskih baterija u mrežama sa nelinearnim potrošačima ispita uticaj istih na pojavu rezonancije unutar postrojenja. Problem rezonancije se može otkloniti promenom veličine kondenzatora, dodavanjem serijske impedanse ili pomeranjem kondenzatora na drugu lokaciju.

Metodologija izbora optimalnih lokacija i snaga kondenzatorskih baterija u distributivnim mrežama se zasniva na optimizaciji funkcije cilja koja može imati različite forme. Cilj optimizacije je najčešće minimizacija gubitaka aktivne snage, minimizacija padova napona, minimizacija godišnjih operativnih troškova, minimizacija ukupne harmonijske distorzije napona (THD_V) ili bilo koja njihova kombinacija. Pri tome moraju biti zadovoljena sva ograničenja u sistemu koja se tiču bilansa snaga u čvorovima, graničnih vrednosti napona, THD_V i snaga kondenzatorskih baterija. Za rešavanje ovog problema u naučnoj literaturi može se naći veliki broj različitih metoda. Prednosti i mane najvažnijih i najčešće korišćenih analitičkih, numeričkih i heurističkih metoda date su u [1]-[3]. Heurističke metode, kao što su fuzzy logika (FL), evoluciono programiranje (EP), tabu pretraga (TS), simulirano kaljenje (SA), optimizacija kolonije mrava (ACO), harmonijsko pretraživanje (HS), genetski algoritam (GA) i optimizacija rojem čestica (PSO), ne garantuju nalaženje globalnog optimuma ali, u većini slučajeva, postižu zadovoljavajuća rešenja. U velikom broju radova za rešavanje problema optimalnih lokacija i snaga kondenzatorskih baterija koristi se GA. Primena GA omogućava pretraživanje svih mogućih kombinacija u prihvatljivom vremenskom periodu i daje rešenja bliska optimalnom. U referencama [4]-[9] ovaj optimizacioni problem je rešen sa diskretnim vrednostima snaga kondenzatorskih baterija, a kao funkcija cilja uzeti su godišnji operativni troškovi rada sistema. Pri tome su uvažena ograničenja modula napona čvorova, THD_V i reaktivnih snaga fiksnih kondenzatora. Uštede koje se postižu minimizacijom ove funkcije cilja zavise od instalisane snage kondenzatorskih baterija i od mesta njihove ugradnje. U referenci [10] izložen je metod za optimalno planiranje izvora reaktivne snage u cilju minimizacije gubitaka snage, uz uvažavanje naponskih ograničenja i ograničenja THD_V . Obuhvatanje više funkcija cilja u postupku određivanja optimalnih lokacija i snaga kondenzatora, kao što su smanjenje gubitaka snage, poboljšanje naponskog profila, poboljšanje nebalansiranja i smanjenje nivoa THD_V je ostvareno u referencama [11] i [12]. Za rešavanje harmonijskih tokova snaga, radi evaluacije funkcije cilja, u [4]-[7] koristi se *Newton-Raphson*-ov metod [13], dok se u [8], [9] i [11] primenjuje znatno jednostavniji metod strujnih injektiranja [14]-[17].

U ovom radu je predstavljena primena GA za rešavanje problema određivanja optimalnih lokacija i snaga fiksnih kondenzatorskih baterija u radijalnim distributivnim mrežama sa nelinearnim potrošačima. Postupak je testiran na standardnoj IEEE 18 test mreži, nalaženjem optimalnih rešenja po kriterijumu minimalnih godišnjih operativnih troškova rada sistema. Za proračun harmonijskih tokova snaga razvijen je program na bazi metode strujnih injektiranja. Verifikacija dobijenih rezultata je izvršena poređenjem sa referentnim rezultatima.

MATEMATIČKA FORMULACIJA PROBLEMA

Rešenje problema optimalnih lokacija i snaga kondenzatorskih baterija ima za cilj minimizaciju funkcije cilja kroz optimalno podešavanje kontrolnih promenljivih sistema, uz istovremeno zadovoljenje različitih tehničkih ograničenja izraženih preko ograničenja tipa jednakosti i nejednakosti. Ovaj matematički princip se iskazuje na sledeći način:

$$\min F(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (1)$$

pri ograničenjima:

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

$$h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{u} \in \mathbf{U} \quad (4)$$

gde je: $F(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ funkcija cilja koju treba minimizirati; $g(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ vektor sa ograničenjima tipa jednakosti; $h(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ vektor sa ograničenjima tipa nejednakosti; \mathbf{x} vektor zavisnih promenljivih; \mathbf{u} vektor nezavisnih (upravljačkih) promenljivih; \mathbf{U} vektor graničnih vrednosti upravljačkih promenljivih.

Zavisno promenljive (\mathbf{x}) su efektivne vrednosti napona čvorova (V_{rms}) i ukupne harmonijske distorzije napona (THD_V) u mreži. Vektor zavisnih promenljivih \mathbf{x} ima sledeći oblik:

$$\mathbf{x} = [V_{rms,1}, \dots, V_{rms,N}, THD_{V,1}, \dots, THD_{V,N}]^T \quad (5)$$

gde je N broj čvorova u mreži.

Elementi vektora upravljačkih promenljivih (\mathbf{u}) su lokacije (L) i snage (Q_{Cf}) fiksnih kondenzatorskih baterija. Shodno tome, vektor \mathbf{u} se može formulisati kao:

$$\mathbf{u} = [L_1, \dots, L_{N_{Cf}}, Q_{Cf,1}, \dots, Q_{Cf,N_{Cf}}]^T \quad (6)$$

gde N_{Cf} predstavlja broj fiksnih kondenzatorskih baterija.

Funkcija cilja. Optimizacija lokacija i snaga kondenzatorskih baterija vršena je po kriterijumu minimalnih godišnjih operativnih troškova sistema, uključujući troškove gubitaka aktivne energije, troškove gubitaka aktivne snage pri maksimalnom opterećenju i troškove fiksnih kondenzatorskih baterija [4-9]:

$$F = F_{W_p} + F_P + F_{Cf} = K_{W_p} \cdot T \cdot P_{gub}(V^{(1)}, \dots, V^{(h_{\max})}, Q_{Cf}) + \sum_{i \in M_C} K_{Cf} \cdot Q_{Cf,i} + K_P \cdot P_{gub}(V^{(1)}, \dots, V^{(h_{\max})}, Q_{Cf}) \quad (7)$$

gde su: F_{W_p} , F_P i F_{Cf} troškovi gubitaka aktivne energije, troškovi koji odgovaraju gubicima aktivne snage (tj. iskorišćenim kapacitetima sistema), troškovi fiksnih kondenzatorskih baterija, respektivno; P_{gub} ukupni gubici aktivne snage pri vršnom opterećenju; $V^{(h)}$ vektor napona čvorova pri h -tom harmoniku; h_{\max} maksimalni red harmonika koji se uzima u obzir; Q_{Cf} snaga priključenih fiksnih kondenzatora; $Q_{Cf,i}$ instalisana snaga fiksnog kondenzatora u čvoru i ; T vreme trajanja opterećenja (8760 h); K_{W_p} [\$/kWh] cena gubitaka aktivne energije; K_P [\$/kW] cena vršne aktivne snage; K_{Cf} [\$/kVAr] cena po jednoj fiksnoj kondenzatorskoj jedinici; M_C skup mogućih lokacija (čvorova) za ugradnju kondenzatora.

Ograničenja. Ograničenja tipa jednakosti (2) čine jednačine tokova snaga po čvorovima mreže.

Ograničenja tipa nejednakosti (3) su funkcionalna ograničenja zavisno promenljivih stanja i uvažavaju ograničenja modula napona čvorova i ograničenja THD_V :

$$V_{rms,i}^{\min} \leq V_{rms,i} \leq V_{rms,i}^{\max}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (8)$$

$$THD_{V,i} \leq THD_{V,i}^{\max}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (9)$$

gde je: $V_{rms,i}$ efektivna vrednost napona u čvoru i ; $V_{rms,i}^{\min}$, $V_{rms,i}^{\max}$ minimalna i maksimalna dozvoljena efektivna vrednost napona u čvoru i , respektivno; $THD_{V,i}^{\max}$ granična vrednost ukupnog harmonijskog izobličenja.

Ograničenja formulisana jednačinom (4) definišu oblast mogućih vrednosti upravljačkih promenljivih i uvažavaju ograničenja lokacija na kojima se planira ugradnja kondenzatora i ograničenja reaktivnih snaga fiksnih kondenzatora:

$$L_i^{\min} \leq L_i \leq L_i^{\max}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{Cf} \quad (10)$$

$$Q_{Cf,i}^{\min} \leq Q_{Cf,i} \leq Q_{Cf,i}^{\max}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{Cf} \quad (11)$$

Uslov da ne dolazi do pojave prekompenzacije:

$$\sum_{i=1}^{N_{Cf}} Q_{Cf,i} \leq Q_{\max} \quad (12)$$

gde je Q_{\max} prihvatljivo ograničenje reaktivne snage.

Ograničenja zavisnih promenljivih (\mathbf{x}) se obuhvataju uvođenjem kvadratnih penalnih članova kojima se proširuje funkcija cilja.

MODELI ELEMENATA DISTRIBUTIVNE MREŽE

Admitanse linearnog potrošača u čvoru i ($y_{P,i}^{(h)}$) i fiksnog kondenzatora u čvoru i ($y_{Cf,i}^{(h)}$) pri h -tom harmoniku napona su [4-6]:

$$\underline{y}_{P,i}^{(h)} = \frac{P_{P,i}}{\left(V_i^{(1)}\right)^2} - j \frac{Q_{P,i}}{h \left(V_i^{(1)}\right)^2} \quad (13)$$

$$\underline{y}_{Cf,i}^{(h)} = h \underline{y}_{Cf,i}^{(1)} \quad (14)$$

gde su: $P_{P,i}$ i $Q_{P,i}$ nominalna aktivna i nominalna reaktivna snaga linearnog potrošača u čvoru i , respektivno;

$V_i^{(1)}$ amplituda napona u čvoru i na osnovnoj frekvenciji ($h=1$); $\underline{y}_{Cf,i}^{(1)}$ admitansa kondenzatora u čvoru i na osnovnoj frekvenciji.

Uticaj skin efekta se uvažava uvećanjem rezistanse voda. Podužna admitansa voda između čvorova i i $i+1$ pri h -tom harmoniku napona ($\underline{y}_{i,i+1}^h$) je [9], [14]:

$$\underline{y}_{i,i+1}^{(h)} = \frac{1}{R_{i,i+1}^{(1)} \left(1 + \frac{0.646h^2}{192 + 0.518h^2}\right) + jhX_{i,i+1}^{(1)}} \quad (15)$$

gde $R_{i,i+1}^{(1)}$ i $X_{i,i+1}^{(1)}$ predstavljaju rezistansu i reaktansu voda na osnovnoj frekvenciji, respektivno.

Nelinearni potrošači, kao što su energetski pretvarači, se na osnovnoj frekvenciji ponašaju kao linearni potrošači, dok se pri višim harmonicima tretiraju kao izvori konstantne struje. U opštem slučaju, trofazni ispravljači proizvode harmonike čiji red zavisi od vrste ispravljačkog mosta i mogu se odrediti pomoću sledeće formule:

$$h = kq \pm 1; \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

gde je q broj impulsa po periodu.

Prema pravilima *Fourier*-ove transformacije, amplituda h -tog harmonika menja se prema zakonu [17]:

$$I^{(h)} = \frac{I^{(1)}}{h} \quad (17)$$

gde su: $I^{(h)}$ - struja h -tog harmonika, $I^{(1)}$ - struja osnovnog harmonika.

Fazni uglovi strujnih izvora se računaju saglasno jednačini [17]:

$$\theta^{(h)} = \theta^{(h\text{-spectrum})} + h \left(\theta^{(1)} - \theta^{(1\text{-spectrum})} \right) \quad (18)$$

gde je $\theta^{(1)}$ fazni ugao struje na osnovnoj frekvenciji, a $\theta^{(h\text{-spectrum})}$ tipični fazni ugao iz harmonijskog spektra. Ukoliko u analiziranom kolu postoji samo jedan nelinearni potrošač, ili je udeo harmonika tog potrošača izraženiji u odnosu na druge nelinearne potrošače, onda se fazni uglovi strujnih harmonika mogu zanemariti [17].

RASPREGNUTI POSTUPAK ZA PRORAČUN HARMONIJSKIH TOKOVA SNAGA

Za rešavanje harmonijskih tokova snaga, radi evaluacije funkcije cilja F , koristi se metod strujnih injektiranja. Metod strujnih injektiranja se zasniva na pretpostavci da je sprega između pojedinačnih harmonika slaba, pa se kao takva može zanemariti, što omogućava da se izračunavanje strujnih i naponskih harmonika može zasebno izvršiti za svaki razmatrani red harmonika. Iz tog razloga se često naziva raspregnuti postupak. Raspregnuti postupak zahteva formiranje matrice admitansi sistema ($\mathbf{Y}^{(h)}$) i vektora struja injektiranja nelinearnih potrošača ($\mathbf{I}^{(h)}$) za svaku frekvenciju koja se razmatra. Izračunavanje nepoznatih napona u čvorovima sistema pri h -tom harmoniku vrši se direktnom primenom vektorske jednačine sledećeg oblika [16]:

$$\mathbf{V}^{(h)} = \left(\mathbf{Y}^{(h)} \right)^{-1} \mathbf{I}^{(h)} \quad (19)$$

Za bilo koji čvor i , efektivna vrednost napona i ukupna harmonijska distorzija napona su:

$$V_{rms,i} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(V_i^{(h)} \right)^2} \quad (20)$$

$$THD_{V,i} = \frac{1}{V_i^{(1)}} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} (V_i^{(h)})^2} \times 100(\%) \quad (21)$$

Na kraju proračuna se mogu odrediti ukupni gubici aktivne snage u mreži [16]:

$$P_{gub} = \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\sum_{i=1}^{N-1} P_{gub(i,i+1)}^{(h)} \right) = \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\sum_{i=1}^{N-1} R_{i,i+1}^{(h)} \left(\left| \underline{V}_{i+1}^{(h)} - \underline{V}_i^{(h)} \right| \left| \underline{y}_{i,i+1}^{(h)} \right| \right)^2 \right) \quad (22)$$

GENETSKI ALGORITAM

Genetski algoritam je robusna i adaptivna metoda motivisana procesima evolucije u prirodnim sistemima. Optimizacija u genetskom algoritmu se izvodi na populaciji tačaka koje se nazivaju hromozomi. Kvalitet svakog hromozoma se kvantifikuje preko vrednosti fitnes funkcije. Cilj je da se pronade najbolji hromozom. 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 u stringu promenljivu stanja u tom problemu. Pošto su to delovi stringa mogu se nazvati substringovi. Za problem određivanja optimalnih lokacija i snaga kondenzatorskih baterija struktura stringa je data na slici 1. U ovom slučaju substring sadrži podatak o lokaciji i snazi kondenzatora. Broj substringova, a time i veličina stringa, zavisi od broja promenljivih koje se optimizuju, odnosno od broja kondenzatora za koje treba odrediti optimalne lokacije i snage [12].

1	2		N_{Cf}
L	Q_{Cf}	L	Q_{Cf}
		...	
			L
			Q_{Cf}

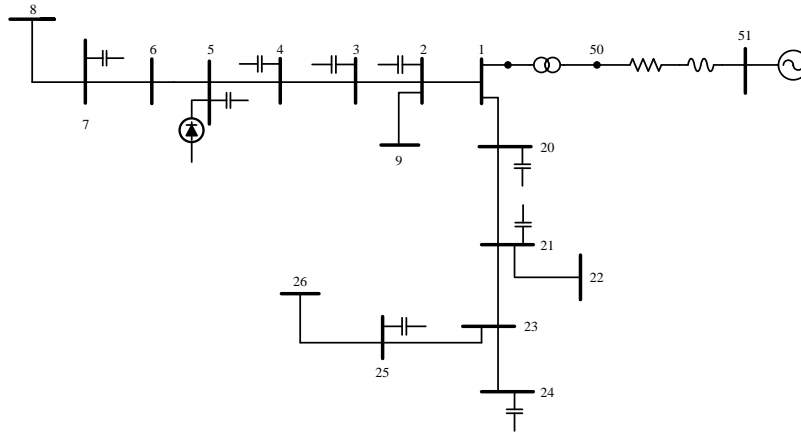
Slika 1. Struktura stringa pri određivanju optimalnih lokacija i snaga kondenzatorskih baterija kod GA

U svakoj generaciji vrednost fitnes funkcije, koja je u relaciji sa vrednošću funkcije cilja u problemu optimizacije koji se rešava, svakog hromozona u populaciji se ocenjuje. U ovom slučaju se evaluacija vrednosti fitnes funkcije vrši proračunom harmonijskih tokova snaga. Za svaku moguću varijantu, odnosno kombinaciju lokacija i snaga kondenzatora potrebno je izvršiti najmanje jedan proračun harmonijskih tokova snaga, kako bi se utvrdio kvalitet dobijenog rešenja prema usvojenom kriterijumu optimizacije. Prema tome od presudnog značaja je brzina i efikasnost primenjenog postupka za proračun harmonijskih tokova snaga.

U zavisnosti od dobijene vrednosti fitnes funkcije, na hromozome se primenjuju različiti operatori, u cilju favorizovanja hromozoma koji su najbliži globalnom rešenju problema. Osnovni operatori koji vrše operacije nad genima su: selekcija, ukrštanje i mutacija. Obično se jedna generacija može podeliti u dve faze. Na početku procesa ima se jedna tekuća populacija. Selekcija omogućava eliminaciju loših hromozona i preživljavanje boljih hromozona, 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 jedinke (deca). Nakon ukrštanja vrši se i mutacija da bi se slučajnom promenom gena izmenila svojstva novonastalih jedinki. Na taj način se postiže da jedinke 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 može se naći u radovima [4]-[12].

REZULTATI I DISKUSIJA

Za testiranje opisanog postupka korišćena je IEEE18 distributivna mreža prikazana na slici 2. Ova mreža se često koristi u literaturi za verifikaciju rezultata optimalne kompenzacije reaktivnih snaga u distributivnim mrežama sa nelinearnim potrošačima.



Slika 2. IEEE 18 test mreža sa priključenim kondenzatorskim baterijama i nelinearnim potrošačem [18]

Podaci o vodovima, snagama kondenzatorskih baterija i potrošnji se mogu preuzeti iz reference [18]. Ova mreža sadrži 10 kondenzatorskih baterija instalisanih u čvorovima 2, 3, 4, 5, 7, 20, 21, 24, 25 i 50. Nelinearni potrošač u čvoru 5 je trofazni šestoimpulsni ispravljački most sa aktivnom i reaktivnom snagom od 3 MW i 2.26 MVar, respektivno. Ovaj nelinearni potrošač generiše harmonike 5, 7, 11, 13, 17... reda. Razmatrani su harmonici do 49-tog reda. Pošto u razmatranom sistemu postoji samo jedan nelinearni potrošač, fazni uglovi strujnih harmonika su zanemareni. Pretpostavljeno je da je napon napojnog čvora (čvor 51) čisto sinusoidalnog talasnog oblika amplitude 1.05 r.j. Ekonomski parametri za razmatrani test sistem, cena gubitaka aktivne energije (K_{W_p}) i cena vršne aktivne snage (K_p) iste su kao u [4]-[7] i iznose 0.05 \$/kWh i 120 \$/kW, respektivno. Godišnji troškovi fiksnih kondenzatora (K_{Cf}) dati su u tabeli 1. Limiti za minimalnu i maksimalnu efektivnu vrednost napona čvorova, kao i maksimalnu distorziju napona su [19]: 0.9 r.j., 1.1 r.j. i 5%, respektivno. Za izvršavanje proračuna tokova snaga na osnovnoj frekvenciji korišćen je *Shirmohammadi*-jev nazad/napred metod. Pri tome, svi potrošači su predstavljeni modelom konstantne snage, a kondenzatori modelom konstantne impedanse.

TABELA 1 - Godišnji troškovi fiksnih kondenzatora [4]

Q_{Cf} (kVAr)	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500	1650	1800
K_{Cf} (\$/kVAr)	0.500	0.350	0.253	0.220	0.276	0.183	0.228	0.170	0.207	0.201	0.193	0.187
Q_{Cf} (kVAr)	1950	2100	2250	2400	2550	2700	2850	3000	3150	3300	3450	3600
K_{Cf} (\$/kVAr)	0.211	0.176	0.197	0.170	0.189	0.187	0.183	0.180	0.195	0.174	0.188	0.170

Najpre je sproveden postupak određivanja optimalnih snaga kondenzatorskih baterija sa tačno definisanim lokacijama datim u [4-7], a zatim se, u cilju dodatnog smanjenja godišnjih troškova, pristupilo pretraživanju svih mogućih kombinacija lokacija i snaga kondenzatorskih baterija. Pri tome usvojena su sledeća ograničenja: u jedan se čvor može priključiti samo jedna kondenzatorska baterija; maksimalna snaga injektiranja svih instalisanih kondenzatora (Q_{max}) ista je kao u režimu pre optimizacije i iznosi 10500 kVAr.

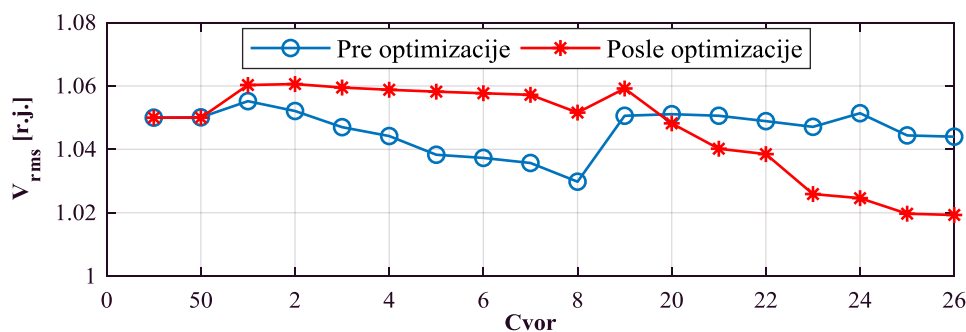
Genetski algoritam iz MATLAB 2017b softverskog paketa izvršavan je na personalnom računaru sa Intel Core i7-7500U procesorom brzine 2.70 GHz i 8 GB RAM-a. Kontrolni parametri GA, veličina populacije i maksimalan broj generacija bili su podešeni na 50 i 100, respektivno. Ostali parametri GA su standardni (kako je definisano u programu). U tabeli 2, uporedo sa rezultatima iz literature, prikazani su rezultati proračuna za unapred definisane lokacije kondenzatorskih baterija. To su najbolja rešenja dobijena u 10 uzastopnih izvršavanja GA sa istim kontrolnim parametrima. Vremena trajanja proračuna GA bila su manja od 150 s.

Iz table 2 se može videti da za režim pre optimizacije postoje izvesna odstupanja dobijenih rezultata u odnosu na referentne rezultate iz [4]. U najvećoj meri, ova odstupanja su posledica korišćenja raspregnutog postupka za proračun harmonijskih tokova snaga. Pored toga, tačnost proračuna zavisi od načina modeliranja elemenata sistema, uticaja skin efekta i faznih uglova strujnih harmonika. Rezultati koji su dobijeni raspregnutim proračunom su dovoljno tačni u poređenju sa rezultatima iz reference [4] gde je upotrebljen spregnuti *Newton-Raphson*-ov postupak.

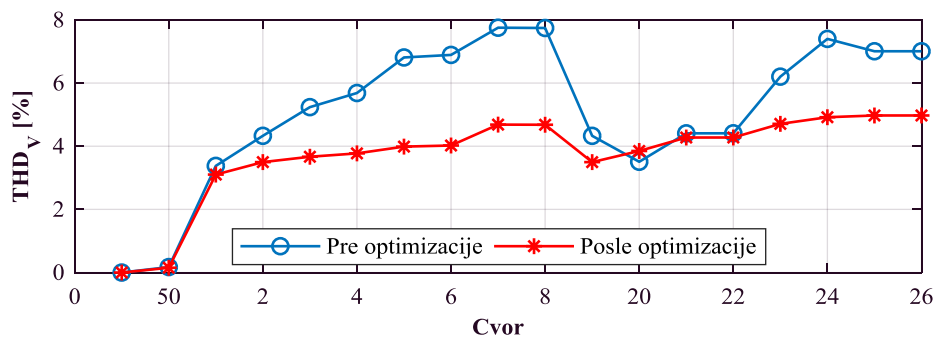
TABELA 2 - Rešenja optimizacionog problema za zadate lokacije ugradnje kondenzatorskih baterija

Upravljačke promenljive, zavisne promenljive i funkcije cilja			Pre optimizacije		Posle optimizacije			
			Izračunato	Ref. [4]	Izračunato	Ref. [4]	Ref. [5]	Ref. [6]
Lokacije i snage kondenzatorskih baterija	L_2	Q_{Cf} [kVAr]	1050		1500	150	300	300
	L_3	Q_{Cf} [kVAr]	600		450	300	0	0
	L_4	Q_{Cf} [kVAr]	600		900	600	1950	1650
	L_5	Q_{Cf} [kVAr]	1800		3300	2400	300	3300
	L_7	Q_{Cf} [kVAr]	600		1200	2100	1050	1050
	L_{20}	Q_{Cf} [kVAr]	600		900	900	900	600
	L_{21}	Q_{Cf} [kVAr]	1200		600	1200	750	900
	L_{24}	Q_{Cf} [kVAr]	1500		300	0	150	150
	L_{25}	Q_{Cf} [kVAr]	900		300	0	150	150
	L_{50}	Q_{Cf} [kVAr]	1200		0	0	0	300
Ukupna snaga kond. [kVAr]			10050	10050	9450	7650	8250	8400
Minimalni napon [r.j.]			1.0298	1.0290	1.0193	0.9980	1.0050	1.0030
Maksimalni napon [r.j.]			1.0551	1.0550	1.0606	1.0500	1.0500	1.0500
Maksimalna THD_V [%]			7.7529	8.4800	4.9734	4.8990	4.9820	4.8830
Gubici snage [kW]			279.45	282.93	245.18	257.46	248.18	249.31
Troškovi kond. [\$/god.]			1978.20	1978.20	1864.95	1458.30	1817.55	1788.75
Troškovi sistema [\$/god.]			157911.15	159853.14	138673.57	145120.98	140302.80	140903.73

Kao što se može videti iz prethodne tabele, ukupni godišnji troškovi rada sistema se sa 157911.15 \$/god. u slučaju pre optimizacije, primenom GA smanjuju na 138673.57 \$/god. Jasno je da pravilno podešavanje upravljačkih promenljivih na optimalne vrednosti iz tabele 2 dovodi do smanjenja godišnjih operativnih troškova sistema od 12.18%, odnosno ostvarenja uštede od 19237.58 \$/god. Takođe, ukupna maksimalna distorzija napona se sa 7.753% u slučaju pre optimizacije, smanjuje na prihvatljivu vrednost od 4.973%. U poređenju sa rezultatima iz literature, rezultati dobijeni primenom GA koji za evaluaciju funkcije cilja koristi metod strujnih injektiranja su bolji. Na slikama 3 i 4 prikazani su naponski profili mreže i THD_V u čvorovima mreže pre i posle optimizacije. Može se videti da su nakon sprovedenog optimizacionog postupka efektivne vrednosti napona čvorova i THD_V u svim čvorovima u okviru dozvoljenih granica.

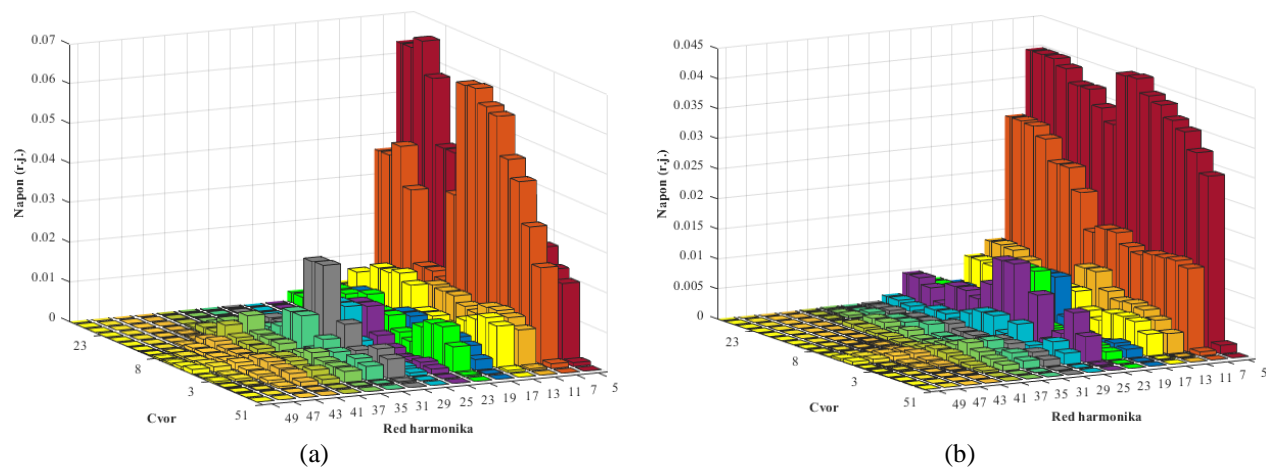


Slika 3. Naponski profili mreže pre i posle optimizacije



Slika 4. Ukupne harmonijske distorzije napona pre i posle optimizacije

Da bi se sagledali efekti optimizacije u pogledu prisustva viših harmonika, na slici 5 dato je prostiranje harmonika kroz distributivnu mrežu u režimima pre i posle optimizacije. Očigledno je da je nivo viših harmonika u mreži daleko manji nakon podešavanja upravljačkih promenljivih na optimalne vrednosti.



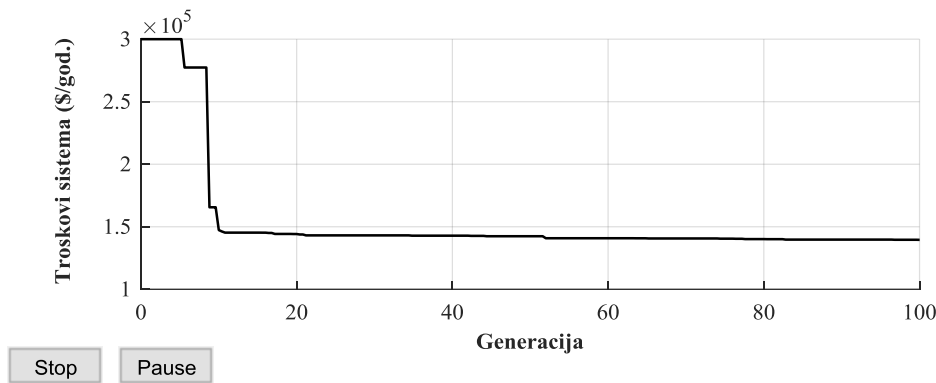
Slika 5. Harmonici napona u svakom čvoru sistema: a) pre optimizacije; b) posle optimizacije

U cilju ostvarenja dodatnih pozitivnih tehničkih i ekonomskih efekata (smanjenja gubitaka snage i energije i sniženja troškova), pristupilo se pretraživanju svih mogućih kombinacija lokacija i snaga kondenzatorskih baterija. Svi čvorovi sistema su razmatrani kao potencijalni kandidati za ugradnju kondenzatora. 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, samim tim i vreme proračuna. Problem je rešen sa diskretnim vrednostima snaga kondenzatora datim u tabeli 1, pri čemu je usvojeno da je maksimalan broj kondenzatora koji se mogu instalirati u sistem 10 (isto kao u režimu pre optimizacije). Rezultati proračuna prikazani su u tabeli 3. Ova rešenja predstavljaju najbolja dobijena rešenja u toku 10 uzastopnih izvršavanja GA sa istim kontrolnim parametrima. Prosečno vreme izvršenja algoritma iznosilo je oko 250 s.

TABELA 3 – Rešenje problema optimalnih lokacija i snaga kondenzatorskih baterija u IEEE 18 sistemu

Upravljačke promenljive, zavisne promenljive i funkcije cilja	Pre optimizacije		Posle optimizacije	
	L	Q_{Cf} [kVAr]	L	Q_{Cf} [kVAr]
Lokacije i snage kondenzatorskih baterija	2	1050	1	1650
	3	600	3	2250
	4	600	6	3450
	5	1800	8	600
	7	600	20	1200
	20	600	22	150
	21	1200	24	450
	24	1500	25	150
	25	900	26	150
	50	1200	50	0
Ukupna snaga kond. [kVAr]	10050		10050	
Minimalni napon [r.j.]	1.0298		1.0249	
Maksimalni napon [r.j.]	1.0551		1.0654	
Maksimalna THD_V [%]	7.7529		4.9825	
Gubici snage [kW]	279.45		242.53	
Troškovi kond. [\$/god.]	1978.20		2085.15	
Troškovi sistema [\$/god.]	157911.15		137415.33	

Poređenjem rezultata iz tabele 3 sa odgovarajućim rezultatima iz tabele 2, zaključuje se da povećanje broja kombinacija za pretraživanje omogućava dobijanje boljih rešenja u pogledu minimizacije ukupnih godišnjih operativnih troškova rada sistema. Kako je GA algoritam stohastički po svojoj prirodi, ne može se sa sigurnošću garantovati da su dobijena rešenja optimalna, ali se sigurno mogu smatrati kao lokalni optimumi. Na slici 6 prikazana je konvergencija GA metoda. Optimalno rešenje se najčešće postiže posle 50 iteracija.



Slika 6. Konvergencija GA pri rešavanju problema određivanja optimalnih lokacija i snaga kondenzatora

ZAKLJUČAK

Optimizacija lokacija i snaga kondenzatorskih baterija u prisustvu viših harmonika je složeni, nelinearni kombinatorni optimizacioni problem koji pored funkcije cilja uključuje veliki broj zavisnih i upravljačkih promenljivih. U ovom radu je predložen genetski algoritam za rešavanje ovog problema, pri čemu je osnovni cilj optimizacije bio ostvarenje minimalnih godišnjih operativnih troškova sistema uz zadovoljavanje svih relevantnih ograničenja. Postupak je testiran na standardnom IEEE 18 test sistemu. Dobijeni rezultati pokazali su efikasnost GA u rešavanju ovog problema. Poređenje rezultata dobijenih primenom GA sa rezultatima iz literature pokazalo je da GA ima bolje performanse u odnosu na druge metode. Predloženi GA može se primeniti na bilo koju drugu distributivnu mrežu sa nelinearnim potrošačima iz literature.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

1. Ng H N, Salama M M A, and Chikhani AY, 2000, "Classification of Capacitor Allocation Techniques", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, pp. 387-392
2. Sirjani R, Mohamed A and Shareef H, 2012, "Heuristic optimization techniques to determine optimal capacitor placement and sizing in radial distribution networks: A comprehensive review", Przeglad Elektrotechniczny, vol. 88, pp. 1-7
3. Aman M M, Jasmon G B, Bakar A H A, Mokhlis H, Karimi M, 2014, "Optimum shunt capacitor placement in distribution system—a review and comparative study", Renewable Sustainable Energy Rev, vol. 30, pp. 429-39
4. Masoum M A S, Jafarain A, Ladjevardi M, Fuchs E and Grady W, 2004, "Fuzzy approach for optimal placement and sizing of capacitor banks in the presence of harmonics", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, pp. 822-829
5. Ladjevardi M and Masoum M A S, 2008, "Genetically Optimized Fuzzy Placement and Sizing of Capacitor Banks in Distorted Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, pp. 449-456
6. Masoum M A S, Ladjevardi M, Jafarian A and Fuchs E F, 2004, "Optimal Placement, Replacement and Sizing of Capacitor Banks in Distorted Distribution Networks by Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, pp. 1794-1803
7. Taher S A, Hasani M and Karimian A, 2011, "A novel method for optimal capacitor placement and sizing in distribution systems with nonlinear loads and DG using GA", Commun Nonlinear Sci Numer Simul, vol. 16, pp. 851-862
8. Abou-Ghazala A, 2003, "Optimal capacitor placement in distribution systems feeding nonlinear loads", IEEE PowerTech Conference Proceeding, vol. no, pp. 1-6

9. Vuletić J and Todorovski M, 2015, "Reduction of Losses and Harmonic Distortion in Distribution Networks with Different Load Models by Placing Shunt Capacitors using Integer Genetic Algorithm", *Przeglad elektrotechniczny*, vol. no, pp. 84-87
10. Niknam T, Ranjbar A M, Arabian H and Mirjafari M, 2004, "Optimal reactive power planning in harmonic distorted power system using genetic algorithm", *Proc. IEEE Region 10 Conf.*, vol. no, pp. 347-350
11. Jeihouni P, Safari A and Sakhavati A, 2011, "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, pp. 141-148
12. Milovanović M, Radosavljević J and Perović B, 2017, "Određivanje optimalnih lokacija i snaga kondenzatorskih baterija u distributivnim mrežama u cilju smanjenja harmonika i poboljšanja naponskog profila primenom genetskog algoritma", *Tehnika*, vol. no, pp. 867-875
13. Xia D and Heydt G T, 1982, "Harmonic Power Flow Studies Part I – Formulation and Solution", *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, pp. 1257-1265
14. Bayan N, 1999, "Harmonic Flow Analysis in Power Distribution Networks", University of Windsor, Ontario, pp. 29-33
15. Arrillaga J and Watson NR, 2003, "Power System Harmonics", John Wiley & Sons, University of Canterbury, New Zealand, pp. 261-348
16. Ulinuha A and Masoum M A S, 2007, "Harmonic Power Flow Calculations for a Large Power System with Multiple Nonlinear Loads Using Decouple Approach", *Australasian Universities Power Engineering Conference 2007. AUPEC 2007*, vol. no, pp. 1-6
17. Bonner A, Grebe T, Gunther E et al., 1996, "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks, Part I & II", *IEEE Trans. Power Deli.*, vol. 11, pp. 452-474
18. Grady W M, Samotyj M J and Noyola A H, 1992, "The application of network objective functions for actively minimizing the impact of voltage harmonics in power systems", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 7, pp. 1379–1386
19. IEEE Standard 519, 1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", IEEE, New York