



ODREĐIVANJE OPTIMALNIH LOKACIJA I PARAMETARA PASIVNIH FILTERA PRIMENOM METAHEURISTIČKIH METODA

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

KRATAK SADRŽAJ

U ovom radu razmatran je problem optimalnog pozicioniranja i dimenzionisanja pasivnih filtera primenom metaheurističkih metoda. Problem je formulisao kao nelinearni višeciljni optimizacioni problem sa kontinualnim i diskretnim promenljivim veličinama i ograničenjima tipa jednakosti i nejednakosti. Testiranje metoda je izvršeno na IEEE test mreži sa 85 čvorova, pri čemu je usvojeno da su pojedini potrošači nelinearni. U proračunima harmonijskih tokova snaga korišćeni su tipični harmonijski spektri struja pretvarača, koji se često sreću u industrijskim postrojenjima. Ocena metoda je izvršena na osnovu statističke evaluacije rezultata dobijenih u više uzastopnih izvršavanja svih metoda. Pokazano je da se pravilnim pozicioniranjem i dimenzionisanjem pasivnih filtera, pored smanjenja harmonijskih izobličenja na standardom dozvoljene vrednosti, može ostvariti značajno poboljšanje ostalih tehničkih i ekonomskih performansi distributivne mreže.

Ključne reči: harmonici, optimizacija, pasivni filter, distributivna mreža

SUMMARY

In this paper, the problem of the optimal placement and sizing of passive power filters using metaheuristic methods is considered. The problem is formulated as a nonlinear multi-objective optimization problem with both continuous and discrete variables, as well as equality and inequality constraints. Methods were tested on the standard IEEE 85-bus test system, assuming that some loads in the system are nonlinear. Typical harmonic spectra of converter currents, which are often found in industrial plants, were used in the calculation of the harmonic power flows. The evaluation of the methods was performed on the basis of the statistical evaluation of results obtained in several consecutive executions of all methods. It is shown that proper sizing and location of passive power filters, in addition to reducing harmonic distortions to the standard allowable values, can significantly improve other technical and economic performances of the distribution network.

Key words: harmonics, optimization, passive power filter, distribution network

milos.milovanovic@pr.ac.rs

1. UVOD

U uslovima liberalizovanog tržišta električne energije pitanje kvaliteta električne energije dobija prvorazredni značaj za podizanje konkurentnosti elektrodistributivnih preduzeća. Za ispravan i efikasan rad električne opreme moraju se obezbediti pokazatelji kvaliteta električne energije unutar standardom propisanih granica. Jedan od najvažnijih pokazatelja kvaliteta električne energije jeste harmonijsko izobličenje napona i struje. U savremenim distributivnim mrežama izraženo je prisustvo velikog broja nelinearnih potrošača i distribuiranih izvora priključenih na mrežu preko uređaja energetske elektronike. To ima za posledicu generisanje harmonika napona i struja koji imaju čitav niz negativnih uticaja, kako na rad drugih potrošača, tako i na performanse same mreže.

Primena pasivnih filtera predstavlja jedno od najčešće korišćenih klasičnih rešenja za smanjenje harmonijskih izobličenja. Pored toga, sa dobro planiranim lokacijama i parametrima pasivnih filtera, mogu se ostvariti značajni tehnički i ekonomski efekti, koji se ogledaju u poboljšanju naponskog profila mreže, smanjenju

25
godina

13. SAVETOVANJE O ELEKTRODISTRIBUTIVNIM MREŽAMA sa regionalnim učešćem
13th CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION with regional participation
12-16 / 09 / 2022, Kopaonik, Srbija



ZBORNİK RADOVA | PROCEEDINGS



gubitaka snage, a time i ostvarenju značajnih ekonomskih ušteda u celokupnoj mreži. Problem optimalnog pozicioniranja

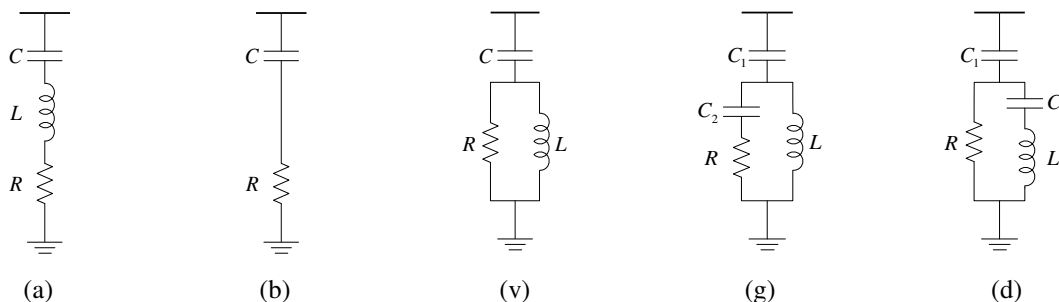
dimenzionisanja pasivnih filtera se može definisati kao nelinearan, nekonveksan, statički optimizacioni problem velikih dimenzija, s kontinualnim i diskretnim promenljivima i ograničenjima tipa jednakosti i nejednakosti. Takođe, s obzirom na to da kriterijumi optimizacije mogu biti suprotstavljeni, ovaj problem poprima formu višeciljnog optimizacionog problema, pri čemu često nije moguće pronaći jedinstveno globalno-optimalno rešenje.

U naučnoj literaturi je predložen veliki broj optimizacionih tehnika za rešavanje problema optimalnog planiranja pasivnih filtera u distributivnim mrežama, počevši od tradicionalnih metoda „pokušaja i greške” (eng. „*Try and Error*”), analitičkih tehnika, metoda linearnog, nelinearnog i kvadratnog programiranja, pa do poslednjih godina veoma popularnih metaheurističkih algoritama. U [1-4] za rešavanje ovog problema predloženi su genetski algoritam (GA) (eng. *Genetic Algorithm*) i neke od poboljšanih varijanti GA. Funkcije cilja koje su pri tome optimizirane odnosile su se na minimizaciju ukupnog harmonijskog izobličenja napona (THD_V) i/ili struja (THD_I) [1-4], minimizaciju gubitaka snage [1-4], minimizaciju troškova filtera [1,2,4], maksimizaciju faktora snage [4], poboljšanje profila napona [3] ili neku njihovu kombinaciju [1]. U [2,3] razmatrani su prosti usklađeni filteri (eng. *single tuned filters*), podešeni na frekvenciju jednog harmonika, dok su u [1,4], pored prostih filtera, razmatrani i visokopropusni filteri (eng. *high pass filters*). Autori u radu [5] su predložili algoritam optimizacije rojem čestica (PSO) (eng. *Particle Swarm Optimization*) za određivanje optimalnih lokacija i snaga pasivnih filtera u cilju minimizacije troškova filtera, gubitaka snage filtera i izobličenja napona i struja, istovremeno. U [6] za rešavanje problema optimalnog planiranja pasivnih filtera predložen je algoritam inspirisan biogeografijom (BBO) (eng. *Biogeography-based Optimization*), s ciljem minimizacije investicionih troškova filtera i ukupnog izobličenja struja. Problemom određivanja optimalnih parametara pasivnih usklađenih filtera bavili su se autori rada [7], gde je postupak optimizacije sproveden korišćenjem gravitacionog pretraživačkog algoritma (GSA) (eng. *Gravitational Search Algorithm*). Pri tome, funkcija cilja bila je minimizacija efektivne vrednosti struje u tački zajedničkog priključka filtera s ostalim uređajima iz okruženja (PCC tački) (eng. *Point of Common Coupling*). U [8] za nalaženje optimalnih parametara pasivnih C-filtera (eng. *C-filters*) predstavljen je algoritam optimizacije Haris jastrebova (HHO) (eng. *Harris Hawks Optimization Algorithm*). Funkcije cilja odnosile su se na minimizaciju gubitaka snage i harmonijskog preopterećenja frekventno zavisnih elemenata distributivnog sistema. Određivanjem parametara dvostruko usklađenih filtera (eng. *double tuned filters*) bavili su se autori [9].

Za rešavanje problema određivanja optimalnih lokacija i parametara pasivnih filtera, u ovom radu je predložen hibridni PPSOGSA algoritam, nastao kombinacijom fazorske optimizacije rojem čestica (PPSO) i gravitacionog pretraživačkog algoritma (GSA). Odlične performanse PPSOGSA su potvrđene primenom u rešavanju različitih optimizacionih problema u elektroenergetici [10-12]. To je glavni razlog zbog čega je PPSOGSA primenjen u ovom radu. Testiranje algoritma je sprovedeno na radijalnoj distributivnoj mreži IEEE 85, pri čemu je usvojeno da 15% potrošnje čine nelinearni potrošači. Primena PPSOGSA omogućila je određivanje optimalnih rešenja za različite varijante funkcija cilja. Verifikacija rezultata dobijenih primenom PPSOGSA je izvršena poređenjem s rezultatima dobijenim primenom PSO, PPSO, GSA i PSOGSA metoda.

2. PROJEKTOVANJE PASIVNIH FILTERA

Pasivni filteri predstavljaju pogodnu kombinaciju pasivnih elemenata – kalemova (L), kondenzatora (C) i otpornika (R). Eliminacija ili smanjenje harmonika napona i struja do dozvoljenih granica ostvaruje se ugradnjom pasivnih filtera u blizini lokacije izvora harmonika, gde se odgovarajućim izborom R, L, C komponenata veštački pobuđuje rezonancija u kolu i na taj način sprečava prodiranje viših harmonika u napojnu mrežu. U odnosu na izvor viših harmonika, pasivni filteri mogu biti redna ili paralelna kombinacija R, L, C komponenata. Redni pasivni filteri najčešće se koriste u monofaznim kolima u cilju minimiziranja trećeg harmonika. Paralelni pasivni filteri se priključuju na sabirnice paralelno s ostalim potrošačima, a izvedeni su kao redno-paralelne kombinacije R, L, C komponenata. U zavisnosti od nivoa filtracije, paralelni filteri se mogu naći u više različitih konfiguracija. Na slici 1 pokazani su najčešće korišćeni tipovi pasivnih filtera.



Slika 1- Najčešće korišćeni tipovi pasivnih filtera: (a) prost usklađen filter za eliminaciju jedne frekvencije; (b) visokopropusni filter prvog reda, (v) filter drugog reda, (g) filter trećeg reda i (d) C-filter

Prost usklađeni filter, prikazan na slici 1a, je najjednostavniji filter koji se koristi za eliminisanje jedne frekvencije. Ovaj filter je pogodan za eliminaciju dominantnog harmonika (5. ili 7.). Pored prostih usklađenih filtera, postoje i visokopropusni filteri koji se koriste za filtriranje harmonika na višim frekvencijama. U visokopropusne filtere ubrajaju se: filter prvog reda (slika 1b), filter drugog reda (slika 1v), filter trećeg reda (slika 1g) i C-filter (slika 1d). Ovi filteri se projektuju tako da u širokom opsegu prigušuju harmonike određene frekvencije i sve harmonike višeg reda. Filter prvog reda je najjednostavniji filter za filtriranje viših harmonika. On zahteva veliki kondenzator i ima izražene gubitke na osnovnoj frekvenciji pa se retko koristi. Filter drugog reda predstavlja najbolje rešenje u pogledu smanjenja harmonijskih izobličenja i najčešće se upotrebljava u praksi. Gubici ovog filtera na osnovnoj frekvenciji su nešto veći u odnosu na gubitke kod filtera trećeg reda. Optimalno rešenje sa stanovišta sniženja gubitaka snage predstavlja C-filter, koji je nešto osetljiviji na promene parametara R, L i C komponenta [13-15].

Shodno ekvivalentnim šemama sa slike 1, ukupne impedanse filtera na nekoj ugaonoj frekvenciji ω su:

- za prost usklađeni filter,

$$\underline{Z}_f^{(h)} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (1)$$

- za visokopropusni filter prvog reda,

$$\underline{Z}_f^{(h)} = R + \frac{1}{j\omega C} \quad (2)$$

- za visokopropusni filter drugog reda,

$$\underline{Z}_f^{(h)} = \frac{1}{j\omega C} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} \right)^{-1} \quad (3)$$

- za visokopropusni filter trećeg reda,

$$\underline{Z}_f^{(h)} = \frac{1}{j\omega C_1} + \left(\frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C_2}} + \frac{1}{j\omega L} \right)^{-1} \quad (4)$$

- za visokopropusni C-filter,

$$\underline{Z}_f^{(h)} = \frac{1}{j\omega C_1} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C_2}} \right)^{-1} \quad (5)$$

gde su: R - otpornost filtera u (Ω), L - induktivnost filtera u (H), C, C₁, C₂ - kapacitivnosti filtera u (F).

Ako je Q_f nominalna snaga filtera u (MVA_r), $\omega_r = h_r \cdot \omega_1$ rezonantna (kružna) frekvencija na koju je usklađen filter u (rad/s), V_{nL} nominalni (linijski) napon mreže u (kV), a Q faktor dobrote (Q-faktor) filtera, onda se induktivna reaktansa filtera X_L, kapacitivna reaktansa filtera X_C, ukupna kapacitivnost C, induktivnost L i otpornost R grane prostog usklađenog filtera na osnovnoj frekvenciji mogu izračunati pomoću jednačina:

$$X_C = \frac{V_{nL}^2}{Q_f} \left(\frac{h_r^2}{h_r^2 - 1} \right) \quad (6)$$

$$X_L = \frac{X_C}{h_r^2} \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{\omega_1 X_C} \quad (8)$$

$$L = \frac{X_L}{\omega_1} \quad (9)$$

$$R = \frac{h_r X_L}{Q} \quad (10)$$

Faktor dobrote Q je mera sposobnosti kola da osciluje. Obično se njegovo podešavanje vrši promenom vrednosti otpornika R . Kod filtera jedne frekvencije, faktor dobrote je najčešće između 30 do 150 [14].

Parametri visokopropusnog filtera drugog reda X_C , X_L , C i L se izračunavaju potpuno na isti način kao kod filtera jedne frekvencije (jednačine (6)-(9)), dok se parametar R izračunava kao:

$$R = Qh_r X_L \quad (11)$$

Parametri bitni za projektovanje visokopropusnog filtera trećeg reda su:

$$C_1 = \frac{Q_f}{\omega_1 V_{nL}^2} \quad (12)$$

$$L = \frac{1}{\omega_r^2 C_1} \quad (13)$$

$$C_2 = C_1 \quad (14)$$

$$R = \sqrt{\frac{2L}{C_1}} \quad (15)$$

C -filter predstavlja posebnu kombinaciju parametara filtera trećeg reda. Karakteristični parametri C -filtera su:

$$C_1 = \frac{Q_f}{\omega_1 V_{nL}^2} \quad (16)$$

$$C_2 = C_1 (h_r^2 - 1) \quad (17)$$

$$L = \frac{1}{\omega_1^2 C_2} \quad (18)$$

$$R = Q\omega_r L \quad (19)$$

3. MATEMATIČKA FORMULACIJA PROBLEMA

Rešenje problema optimalnih lokacija i parametara pasivnih filtera ima za cilj minimizaciju/maksimizaciju zadate funkcije cilja kroz optimalno podešavanje upravljačkih promenljivih, uz istovremeno zadovoljenje različitih ograničenja tipa jednakosti i nejednakosti. Ovaj matematički princip se iskazuje na sledeći način:

$$\min / \max F(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (20)$$

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0 \quad (21)$$

$$h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0 \quad (22)$$

$$\mathbf{u} \in \mathbf{U} \quad (23)$$

gde su: $F(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ - funkcija cilja koju treba minimizirati/maksimizirati, $g(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ - vektor s ograničenjima tipa jednakosti, $h(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ - vektor s 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 u čvorovima mreže (V_{RMS}), ukupna harmonijska izobličenja napona u čvorovima mreže (THD_V), pojedinačna harmonijska izobličenja napona u čvorovima mreže (IHD_V), efektivne vrednosti struja kroz kalemovne filtera (I_L^{RMS}), efektivne vrednosti struja kroz kondenzatore filtera (I_C^{RMS}), efektivne vrednosti napona na kondenzatorima filtera (V_C^{RMS}), maksimalne vrednosti napona na kondenzatorima (V_C^{peak}) i reaktivne snage kondenzatora filtera (Q_C). Shodno tome, vektor \mathbf{x} ima sledeći oblik:

$$\mathbf{x} = \left[V_{RMS,1}, \dots, V_{RMS,N_m}, THD_{V,1}, \dots, THD_{V,N_m}, IHD_{V,1}, \dots, IHD_{V,N_m}, I_{L,1}^{RMS}, \dots, I_{L,N_{pf}}^{RMS}, I_{C,1}^{RMS}, \dots, I_{C,N_{pf}}^{RMS}, V_{C,1}^{RMS}, \dots, V_{C,N_{pf}}^{RMS}, V_{C,1}^{peak}, \dots, V_{C,N_{pf}}^{peak}, Q_{C,1}, \dots, Q_{C,N_{pf}} \right]^T \quad (24)$$

gde su N_m i N_{pf} ukupan broj čvorova i pasivnih filtera u mreži, redom.

Elementi vektora upravljačkih promenljivih (\mathbf{u}) su: lokacije na kojima se planira ugradnja filtera (1), reaktivne snage filtera (Q_f), tipovi filtera (TF), redovi harmonika koji se žele eliminisati ili smanjiti (h_r) i faktori dobrote filtera (Q). Prema tome, vektor \mathbf{u} se može formulirati kao:

$$\mathbf{u} = \left[1_1, \dots, 1_{N_{pf}}, Q_{f,1}, \dots, Q_{f,N_{pf}}, TF_1, \dots, TF_{N_{pf}}, h_{r,1}, \dots, h_{r,N_{pf}}, Q_1, \dots, Q_{N_{pf}} \right]^T \quad (25)$$

3.1 Funkcija cilja

Problem određivanja optimalnih lokacija i parametara pasivnih filtera se može definisati za različite oblike funkcije cilja. U ovom radu razmatrane su dve varijante funkcije cilja.

Slučaj 1: Minimizacija maksimalne vrednosti THD_V ,

$$F_1 = \max(THD_V) = \max \left(\frac{1}{|V_i^{(1)}|} \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} |V_i^{(h)}|^2} \right) \times 100(\%) \quad (26)$$

Slučaj 2: Minimizacija investicionih i operativnih troškova pasivnih filtera,

$$F_2 = \sum_{i=1}^{N_{pf}} (k_R R_i + k_L L_i + k_C C_i + k_Q Q_{Fi} + k_P P_{Fi}) \quad (27)$$

gde su: R_i , L_i , C_i , Q_{Fi} i P_{Fi} redom otpornost u (Ω), induktivnost u (mH), kapacitivnost u (μF), reaktivna snaga injektiranja u (kVAr) i snaga gubitaka na osnovnoj frekvenciji u (kW) pasivnog filtera i ; k_R , k_L , k_C , k_Q i k_P odgovarajući koeficijenti za ponderisanje troškova. Investicioni troškovi su određeni vrednostima R , L i C elemenata i kapacitetom reaktivne snage. Operativni troškovi zavise od gubitaka aktivne snage u toku rada filtera.

3.2 Ograničenja

Ograničenja tipa jednakosti, $g(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0$, uključuju nelinearne balansne jednačine tokova snaga po čvorovima mreže za osnovni harmonik i jednačine za izračunavanje viših harmonika napona i struja. Ograničenja tipa nejednakosti, $h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0$, su funkcionalna ograničenja zavisno promenljivih stanja. Ova ograničenja uvažavaju ograničenja kvaliteta napona u svim čvorovima mreže i pogonska ograničenja kondenzatora i kalemova u filterskim postrojenjima. Ograničenja kvaliteta napona obuhvataju:

- ograničenja modula napona čvorova,

$$V_{RMS,i}^{\min} \leq V_{RMS,i} \leq V_{RMS,i}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_m \quad (28)$$

- ograničenja nivoa izobličenja talasnog oblika napona,

$$IHD_{V,i}^h \leq IHD_{V,i}^{\max,h}, \quad i = 1, 2, \dots, N_m \quad (29)$$

$$THD_{V,i} \leq THD_{V,i}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_m \quad (30)$$

gde su: $V_{RMS,i}^{\min}$ i $V_{RMS,i}^{\max}$ minimalna i maksimalna efektivna vrednost napona u čvoru i , redom; $IHD_{V,i}^{\max,h}$ maksimalna dozvoljena vrednost za pojedinačno harmonijsko izobličenje napona pri h -tom harmoniku i $THD_{V,i}^{\max}$ maksimalna dozvoljena vrednost za ukupno harmonijsko izobličenje napona u čvoru i .

Prema IEEE-519 standardu [16], u mrežama napona od 2.3 kV do 69 kV, maksimalno dozvoljene vrednosti za IHD_V i THD_V redom iznose 3% i 5% osnovnog harmonika napona. Za module napona u svim čvorovima mreže usvojene su vrednosti od 0.9 r.j. za donju, odnosno 1.1 r.j. za gornju granicu. Pogonska ograničenja kondenzatora u filterskim postrojenjima, propisana standardom IEEE-1531 [17], izražena procentualno u odnosu na nominalne vrednosti, su: efektivna vrednost napona - 110%, maksimalna vrednost napona - 120%, efektivna vrednost struje - 135%, i ukupna reaktivna snaga - 135%. Za kalemove u filterskim postrojenjima maksimalno trajno dozvoljeno strujno opterećenje je 135% nominalne struje [17]. Ograničenja upravljačkih promenljivih obuhvataju:

- ograničenja lokacija na kojima se planira ugradnja filtera,

$$2 \leq i \leq N_m, \quad i = 1, 2, \dots, N_{pf} \quad (31)$$

- ograničenja reaktivnih snaga otočnih pasivnih filtera,

$$Q_{f,i}^{\min} \leq Q_{f,i} \leq Q_{f,i}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{pf} \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{pf}} Q_{f,i} \leq Q_{total}^{\max} \quad (33)$$

gde su $Q_{f,i}^{\min}$ i $Q_{f,i}^{\max}$ minimalna i maksimalna snaga filtera i , a Q_{total}^{\max} maksimalna snaga injeckiranja svih filtera.

U ovom radu su razmatrane različite konfiguracije pasivnih filtera. Upravljačka promenljiva TF može imati vrednost 1, 2, 3, 4, 5, 6 ili 7, što redom odgovara prostom usklađenom filteru za eliminaciju 5. harmonika, prostom filteru za eliminaciju 7. harmonika, prostom filteru za eliminaciju 11. harmonika, prostom filteru za eliminaciju 13. harmonika, visokopropusnom filteru drugog reda za eliminaciju harmonika reda $h \geq 5$, visokopropusnom filteru trećeg reda za eliminaciju harmonika reda $h \geq 5$ i visokopropusnom C -filteru za eliminaciju harmonika reda $h \geq 5$. Granične vrednosti upravljačke promenljive TF su date sledećim izrazom:

$$1 \leq TF_i \leq 7, \quad i = 1, 2, \dots, N_{pf} \quad (34)$$

Analiza uticaja promena frekvencije osnovnog harmonika i varijacija induktivnosti kalemova i kapacitivnosti kondenzatora (usled starenja, promena temperature i/ili grešaka u procesu proizvodnje) na performanse pasivnih filtera, pokazuje važnost uključivanja efekta „razdešenosti“ (eng. *detuning effect*) filtera prilikom projektovanja. U ovom radu, uzimajući u obzir gore navedene varijacije, razmatrani filteri su podešeni na rezonantnu frekvenciju h_r iz opsega od $0.85h$ do $0.97h$, što je u saglasnosti sa standardom IEEE-1531 [17]. Donja i gornja granična vrednost faktora dobrote Q redom iznose 30 i 150, kod prostih usklađenih filtera, odnosno 0.5 i 5, kod visokopropusnih filtera. Ograničenja zavisnih promenljivih (\mathbf{x}) se obuhvataju uvođenjem kvadratnih penalnih članova kojima se proširuje funkcija cilja [1].

4. HIBRIDNI PPSOGSA ALGORITAM

Za rešavanje problema određivanja optimalnih lokacija i parametara pasivnih filtera u ovom radu je po prvi put predložen i primenjen hibridni PPSOGSA algoritam [10-12], nastao kombinacijom fazorske optimizacije rojem čestica (PPSO) i gravitacionog pretraživačkog algoritma (GSA). U ovoj hibridnoj varijanti PPSO i GSA rade paralelno. Ideja je da PPSO ima ulogu diversifikacije, dok GSA treba da vrši proces intenzifikacije. Suštinska razlika između PPSOGSA i originalnog PSOGSA je u tome što su kod PPSOGSA kontrolni parametri tokom iterativnog postupka promenljivi, dok su kod PSOGSA oni konstantni. Tačnije, u predloženoj hibridnoj PPSOGSA verziji koeficijenti čestica, c_1 i c_2 , modelirani su preko faznog ugla θ , korišćenjem funkcija sinusa i kosinusa.

Brzina (\mathbf{V}) i pozicija (\mathbf{X}) agenta i ažuriraju se u svakoj iteraciji (t) pomoću sledećih jednačina [10-12]:

$$\mathbf{V}_i(t+1) = r_1 \mathbf{V}_i(t) + r_2 \left| \cos(\theta_i(t)) \right|^{2 \sin(\theta_i(t))} \mathbf{a}_i(t) + r_3 \left| \sin(\theta_i(t)) \right|^{2 \cos(\theta_i(t))} (\mathbf{gbest}(t) - \mathbf{X}_i(t)) \quad (35)$$

$$\mathbf{X}_i(t+1) = \mathbf{X}_i(t) + \mathbf{V}_i(t+1) \quad (36)$$

pri čemu se fazni ugao i -tog agenta (θ_i) u narednoj iteraciji određuje kao:

$$\theta_i(t+1) = \theta_i(t) + \left| \cos(\theta_i(t)) + \sin(\theta_i(t)) \right| 2\pi \quad (37)$$

gde su: r_1 , r_2 i r_3 slučajni brojevi iz opsega $[0,1]$, $\mathbf{a}_i(t)$ ubrzanje agenta i u iteraciji t , a $\mathbf{gbest}(t)$ globalno rešenje.

Proces optimizacije započinje proizvoljnim generisanjem početnih rešenja iz skupa dopustivih rešenja. Nakon toga sledi izračunavanje vrednosti funkcije cilja svakog agenta u populaciji i sortiranje rešenja \mathbf{X}_i . U ovom slučaju se izračunavanje vrednosti funkcije cilja vrši proračunom harmonijskih tokova snaga (HTS) [18]. Posle izračunavanja vrednosti funkcije cilja sledi generisanje nove populacije primenom algoritamskih operatora izabranog algoritma sa stohastičkim mehanizmom pretrage na jedinke iz tekuće populacije. Opisani proces se ponavlja dok se ne ispuni uslov zaustavljanja. Više detalja o PPSOGSA i njegovoj primeni u rešavanju različitih problema u elektrotehnici može se naći u [10-12].

4.1. Programska realizacija i implementacija algoritama

Struktura pretraživačkih agenata prikazana je u tabeli 1. Algoritmi su realizovani u programskom paketu MATLAB i testirani na računaru sa AMD Ryzen 7 3700U procesorom (sa 4 jezgra i radnim taktom od 2.30 GHz) i 12.0 GB RAM memorije. Proračuni su izvršeni sa populacijom od 50 jedinki i maksimalnim brojem iteracija od 100. Ostali parametri za pojedine algoritme imaju sledeće vrednosti: za PSO, koeficijenti c_1 i c_2 postavljeni su na 2, a koeficijent inercije w se tokom iterativnog postupka linearno smanjuje od 0.9 do 0.4; za

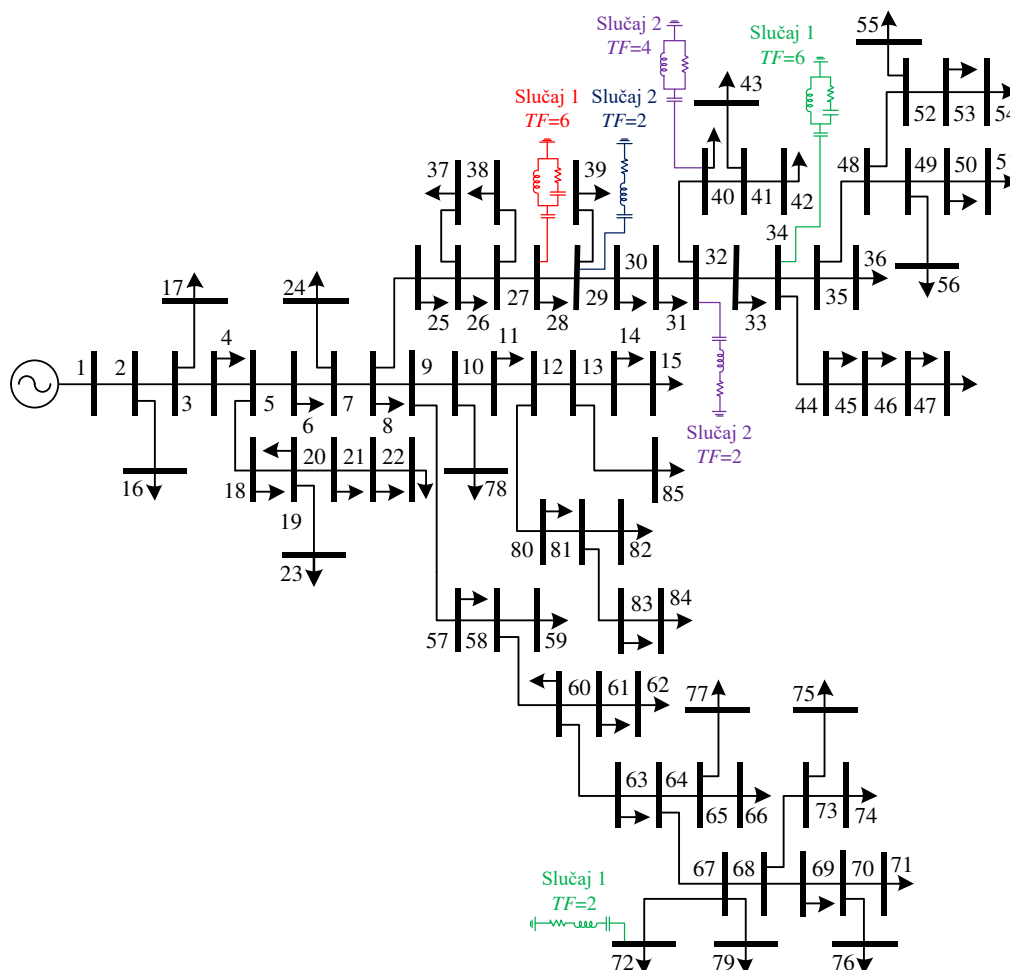
GSA, početna vrednost konstante G_0 podešena je na 100, a vrednost konstante α na 2; za PSO GSA, koeficijenti c_1 i c_2 postavljeni su na 2, a konstante G_0 i α redom na 2 i 30; za PPSOGSA, kontrolni parametri G_0 i α su identični kao za PSO GSA.

TABELA 1 - Struktura pretraživačkih agenata pri određivanju optimalnih lokacija i parametara pasivnih filtera

	Lokacije	Snage	Tipovi	Rezonantne frekvencije	Faktori dobrote
Pozicije	$1, \dots, N_{pf}$	$N_{pf}+1, \dots, 2N_{pf}$	$2N_{pf}+1, \dots, 3N_{pf}$	$3N_{pf}+1, \dots, 4N_{pf}$	$4N_{pf}+1, \dots, 5N_{pf}$
Promenljive	$l_1, \dots, l_{N_{pf}}$	$Q_{f,1}, \dots, Q_{f,N_{pf}}$	$TF_1, \dots, TF_{N_{pf}}$	$h_{r,1}, \dots, h_{r,N_{pf}}$	$Q_1, \dots, Q_{N_{pf}}$

5. REZULTATI I DISKUSIJA

Za testiranje algoritama korišćena je IEEE 85 distributivna mreža. Na slici 2 prikazana je jednopolna šema razmatrane mreže. Ukupna aktivna snaga potrošnje u mreži je 2570.3 kW, dok je ukupna reaktivna snaga 2622.1 kVAr. Podaci o elementima mreže i snagama potrošača mogu se naći u [19]. Snaga trofaznog kratkog spoja napojne mreže iznosi 1000 MVA, pri čemu je odnos rezistanse i reaktanse mreže 10. Pretpostavljeno je da je napon napojnog čvora čisto sinusoidalnog talasnog oblika amplitude 1 r.j. Usvojeno je da maksimalna snaga filtera ne sme da prelazi ukupno reaktivno opterećenje (tj. 2622.1 kVAr). Investicioni i operativni troškovi su procenjeni korišćenjem koeficijenata troškova [1]: $k_C = 2$ r.j./ μ F, $k_L = 3$ r.j./mH, $k_R = 5$ r.j./ Ω , $k_Q = 0.1$ r.j./kVAr i $k_p = 0.1$ r.j./kW. Kako bi se uvažio uticaj viših harmonika, pretpostavljeno je da u svakom čvoru mreže 85% potrošnje čine linearni, a 15% nelinearni potrošači. Pri tome, usvojen je tipični harmonijski spektar nelinearnih potrošača koji se primenjuju u industrijskim postrojenjima. Na osnovnoj frekvenciji svi potrošači su predstavljeni modelom konstantne snage, dok su pasivni filteri predstavljeni modelom konstantne impedanse. Na višim frekvencijama korišćen je paralelni RL model pasivnih potrošača [18]. Nelinearni potrošači su na osnovnoj frekvenciji tretirani kao linearni, dok su na višim frekvencijama tretirani kao izvori konstantne struje. Harmonijski spektar struje nelinearnih potrošača, korišćen u simulacijama, dat je u tabeli 2.



Slika 2 - Jednopolna šema test mreže IEEE 85 s potrošačima i pasivnim filterima

TABELA 2 - Harmonijski spektar struje pogona s podesivom brzinom (ASD) (eng. *adjustable speed drive*) [14]

Red harmonika h	1	5	7	11	13	17	19	23	25
Amplituda (%)	100	82.8	77.5	46.3	41.2	14.2	9.7	1.5	2.5
Ugao (°)	0	-135	69	-62	139	9	-155	-158	98

Optimalna rešenja su dobijena za dve varijante funkcije cilja i to za slučaj ugradnje jednog filtera i za slučaj ugradnje dva filtera. Najbolja rešenja dobijena primenom predloženog algoritma nakon 10 uzastopnih izvršavanja data su u tabeli 3. Pored navedena dva slučaja optimizacije, definisan je jedan bazni slučaj bez filtera. Preglednosti radi, na slici 2 prikazani su potrošači, kao i pasivni filteri čiji su parametri dobijeni primenom PPSOGSA algoritma.

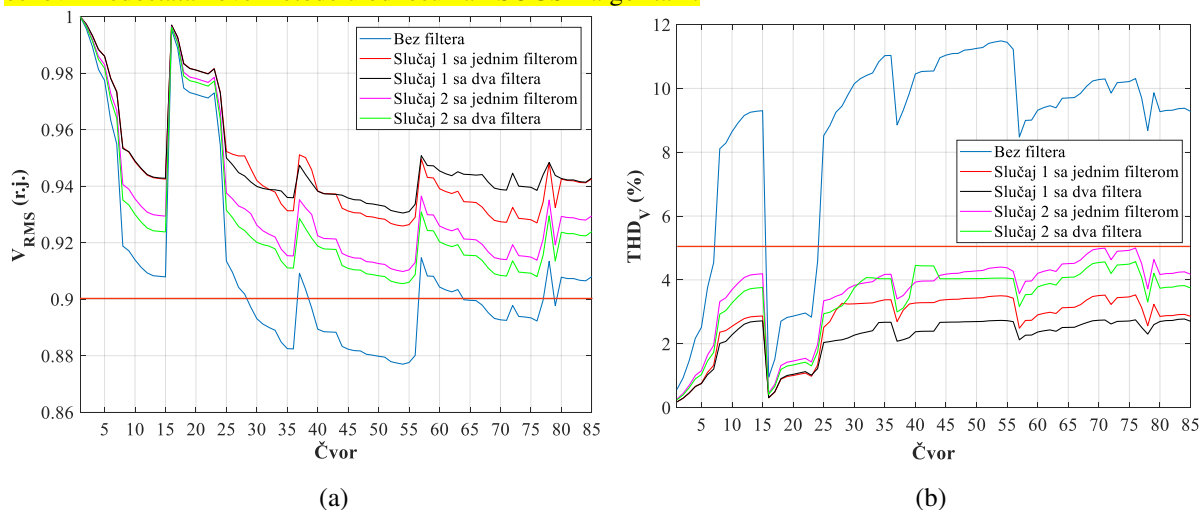
TABELA 3 - Optimalna rešenja problema optimalnog pozicioniranja i dimenzionisanja pasivnih filtera

Upravljačka promenljiva, zavisna promenljiva ili funkcija cilja	Bazni slučaj	Optimizacioni slučaj			
		Sa jednim filterom		Sa dva filtera	
		Slučaj 1	Slučaj 2	Slučaj 1	Slučaj 2
Lokacija filtera, ℓ	-	28	29	34 72	32 40
Nominalna snaga filtera, Q_f (MVar)	-	2.622	1.69	1.43 1.17	1.04 0.27
Tip filtera, TF	-	6	2	6 2	2 4
Rezonantna frekvencija filtera, h_r	-	9.65	6.69	9.82 6.27	6.11 12.61
Faktor dobrote filtera, Q	-	3.09	132.96	2.44 118.11	114.92 133.85
Otpornost filtera, R (Ω)	-	6.7669	0.0823	12.1845 0.1433	0.1699 0.2672
Induktivnost filtera, L (mH)	-	1.5792	5.2083	2.7925 8.5888	10.1731 9.0271
Kapacitivnost filtera, C (μ F) ili C_1 (μ F)	-	68.9747	43.4648	37.6184 29.9961	26.6552 7.0587
Kapacitivnost filtera, C_2 (μ F)	-	68.9747	-	37.6184 -	- -
Maksimalna ukupna distroziija, THD_V (%)	11.49	3.53	5	2.77	4.57
Maksimalna pojedinačna distroziija, IHD_V (%)	6.13	2.99	3	2.2	3
Minimalni napon, V_{RMS} (r.j.)	0.8771	0.9259	0.9098	0.9305	0.9054
Gubici aktivne snage u mreži, $P_{loss}^{(1)}$ (kW)	316.12	207.35	192.85	177.22	201.57
Gubici reaktivne snage u mreži, $Q_{loss}^{(1)}$ (kVar)	198.60	118.97	116.47	105.36	124.45
Gubici snage u filteru, P_F (kW)	-	0.041	1.68	0.02 1.445	1.284 0.136
Snaga injektiranja filtera, Q_F (MVar)	-	2.393	1.46	1.271 1.043	0.877 0.227
Ukupni troškovi filtera (r.j.)		553.81	249.21	612.32	237.86

Na osnovu rezultata iz tabele 3 može se videti da se maksimalna vrednost ukupnog harmonijskog izobličenja napona s 11.49%, u baznom slučaju, posle ugradnje visokopropusnog filtera trećeg reda za eliminaciju harmonika reda $h \geq 11$ smanjuje na 3.53%. Dakle, u odnosu na bazni slučaj, postiže se smanjenje maksimalne THD_V vrednosti za 69.28% i istovremeno smanjenje gubitaka snage za 34.41%. Dalje poboljšanje kvaliteta električne energije u pogledu smanjenja izobličenja napona postiže se ugradnjom dva filtera: prostog filtera podešenog za filtriranje harmonika reda $h = 7$ i visokopropusnog filtera trećeg reda podešenog za filtriranje harmonika reda $h \geq 11$. Maksimalna vrednost THD_V posle ugradnje ovih filtera iznosi 2.77%, što je 75.89% manje u odnosu na bazni slučaj. Priklučenjem filtera veće snage ostvaruje se bolje filtriranje, ali to rešenje zahteva veće troškove (612.32 r.j.). Minimalni troškovi filtera ostvareni u slučaju ugradnje jednog i dva filtera redom iznose 249.21 r.j. i 237.86 r.j., što je daleko manje u odnosu na prethodni slučaj. Odgovarajući naponski profili i harmonijska izobličenja napona prikazani su na slikama 3a i 3b, redom. Na osnovu ovih rezultata vidi se da se nakon priključenja pasivnih filtera vrednosti napona i ukupna izobličenja napona nalaze u okviru dozvoljenih granica.

Statistički parametri i prosečna vremena trajanja proračuna svih algoritama dobijeni nakon 10 uzastopnih izvršavanja dati su u tabeli 4. Rezultati iz tabele 4 pokazuju da PPSOGSA ima bolje performanse od PSO, PPSO, GSA i PSO GSA, kako u pogledu kvaliteta dobijenih rešenja, tako i u pogledu stabilnosti. Kvalitet rešenja nekog algoritma određuje minimalna vrednost, dok stabilnost određuju srednja vrednost i standardna devijacija rezultata.

S aspekta trajanja proračuna, za obe varijante funkcije cilja, srednje vreme trajanja proračuna PPSOGSA algoritma je nešto duže u poređenju s vremenom proračuna ostalih metoda. U predloženoj hibridnoj PPSOGSA varijanti PPSO i GSA rade paralelno, pa je potrebno izvršiti više računskih operacija, i samim tim vreme proračuna je duže u odnosu na originalne PSO, PPSO i GSA algoritme. Takođe, kontrolni parametri predloženo algoritma su tokom iterativnog postupka promenljivi – modelirani su preko faznog ugla korišćenjem sinusnih i kosinusnih funkcija, dok su kod originalnog PSO GSA oni konstantni. Tačnije, kod PPSOGSA algoritma na kraju svake iteracije vrši se izračunavanje faznog ugla, što iziskuje dodatno vreme proračuna. To je u suštini osnovni nedostatak ove metode u odnosu na PSO GSA algoritam.



Slika 3 - Prikaz (a) naponskih profila i (b) naponskih izobličenja u mreži IEEE 85 pre i posle ugradnje filtera

TABLA 4 - Statistički parametri i prosečno vreme izvršavanja primenjenih algoritama

Broj filtera	Slučaj	Algoritam	Minimalna vrednost (%) ili (r.j.)	Maksimalna vrednost (%) ili (r.j.)	Srednja vrednost (%) ili (r.j.)	Standardna devijacija (%) ili (r.j.)	Vreme izvršavanja (s)
1	1	PSO	3.5325	4.4183	3.8774	0.3894	736.83
		PPSO	3.5317	3.6692	3.5748	0.0443	776.62
		GSA	3.5504	4.7325	3.8771	0.3367	692.17
		PSOGSA	3.5317	3.9801	3.6199	0.1344	826.12
		PPSOGSA	3.5317	3.5511	3.5354	0.0057	843.63
	2	PSO	251.8764	498.5074	328.3435	77.3104	813.06
		PPSO	250.1108	292.3316	265.6187	18.4796	856.20
		GSA	254.9258	300.1384	266.8667	16.1186	753.34
		PSOGSA	250.2801	253.5555	251.3064	1.0883	864.02
		PPSOGSA	249.2077	250.3079	249.9579	0.2556	870.98
2	1	PSO	2.8280	3.8477	3.2156	0.2873	639.69
		PPSO	2.7778	2.9289	2.8257	0.0560	703.33
		GSA	2.9941	4.4195	3.4788	0.4490	540.05
		PSOGSA	2.7786	3.2997	2.9404	0.1530	735.49
		PPSOGSA	2.7651	3.0028	2.8191	0.0512	764.73
	2	PSO	269.6173	290.5285	279.3421	7.9436	713.91
		PPSO	243.3383	295.0462	265.2021	17.8678	748.28
		GSA	259.2182	3761.0667	665.4462	1090.3919	633.97
		PSOGSA	239.2914	282.4206	263.1642	6.0868	764.35
		PPSOGSA	237.8574	282.8783	261.8951	5.9726	781.34

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je primenjen hibridni algoritam fazorske optimizacije rojem čestica i gravitacionog pretraživačkog algoritma (PPSOGSA) za rešavanje problema određivanja optimalnih lokacija i parametara pasivnih filtera. U odnosu na klasičan PSOGSA, u predloženoj verziji kontrolni parametri (koeficijenti čestica) modelirani su preko faznog ugla primenom funkcija sinusa i kosinusa. Kriterijumske funkcije pri traženju optimalnog rešenja odnosile su se na minimizaciju maksimalne THD_V vrednosti i minimizaciju investicionih i operativnih troškova pasivnih filtera. Za testiranje algoritama korišćena je IEEE 85 test mreža, pri čemu je usvojeno da u svakom čvoru mreže 85% potrošnje čine linearni, a 15% nelinearni potrošači. Pokazano je da PPSOGSA ima bolje performanse u odnosu na originalne PSO, PPSO, GSA i PPSOGSA algoritme. Pored toga, utvrđeno je se pravilnim podešavanjem upravljačkih promenljivih na optimalne vrednosti, pored poboljšanja kvaliteta električne energije, mogu poboljšati i ostale tehno-ekonomske karakteristike rada distributivne mreže.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] Milovanović M, Radosavljević J, Klimenta D and Perović B, 2019, "GA-based approach for optimal placement and sizing of passive power filters to reduce harmonics in distorted radial distribution systems", *Electrical Engineering*, vol. 101, pp. 787-803
- [2] Pomalis C S M, Leborgnea R C, Herrera-Orozcob A R and Bretas A S, 2019, "NSGA-II optimization for single phase passive filter allocation in distribution systems", *Electric Power Systems Research*, vol. 176, p. 105923
- [3] Ulinuha A, 2016, "Harmonic filter design using intelligent method for mitigation of distribution system distortion", *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 6, pp. 3985-3992
- [4] Mohamed I F, Aleem S H E A, Ibrahim A M and Zobaa A F, 2014, "Optimal sizing of C-type passive filters under non-sinusoidal conditions", *Energy Technology & Policy*, vol. 1, iss. 1, pp. 35-44
- [5] Pandi V R, Zeineldin H and Xiao W, 2012, "Passive harmonic filter planning to overcome power quality issues in radial distribution systems", *IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, USA*, pp. 1-6
- [6] Mohammadi M and Samimi A, 2015, "Comparison of intelligent algorithms for economically optimum harmonic passive filter design in radial distribution systems", *Journal of Electronics Communication and Computer Engineering*, vol. 6, iss. 1, pp. 98-104
- [7] Tosun S, Oztürk A, Ertay M, Yalçın M A and Zengin A, 2015, "An approach for designing passive power filters for industrial power systems by using GSA", *Tehnički vjesnik*, vol. 22, pp. 343-349
- [8] Aleem S H E A, Zobaa A F, Balci M E and Ismael S M, 2019, "Harmonic overloading minimization of frequency-dependent components in harmonics polluted distribution systems using harris hawks optimization algorithm", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 100824-100837
- [9] Fahmy M A, Ibrahim A M, Baici M E and Aleem S H E A, 2017, "Multi-objective optimization of double-tuned filters in distribution power systems using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II", *Proceedings of the 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey*, pp. 1-6
- [10] Milovanović M and Radosavljević J, 2021, "A hybrid PPSOGSA algorithm for optimal Volt/VAr/THDv control in distorted radial distribution systems", *Applied Artificial Intelligence*, vol. 35, pp. 227-246
- [11] Milovanović M, Tasić D, Radosavljević J and Perović B, 2020, "Optimal placement and sizing of inverter-based distributed generation units and shunt capacitors in distorted distribution systems using a hybrid phasor particle swarm optimization and gravitational search algorithm", *Electr. Pow Compo. Sys.*, vol. 48, pp. 543-557
- [12] Milovanović M, Radosavljević J and Perović B, 2021, "Optimal placement and sizing of shunt capacitors in distorted systems using a hybrid algorithm", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 115-135
- [13] Brajović D and Lazarević Z, 2016, "Kvalitet električne energije: Uticaj elektrotermičkih uređaja na električnu mrežu", *Zavod za fiziku tehničkih fakulteta, Visoka škola tehničkih strukovnih studija, Čačak, Srbija*
- [14] Fuchs F and Masoum M A S, 2008, "Power quality in power systems and electrical machines", Elsevier, USA
- [15] Arrillaga J and Watson N R, 2007, "Power system harmonics", John Wiley & Sons, New Zealand
- [16] IEEE Standard 519, 1992, "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems", IEEE, New York
- [17] IEEE Standard 1531, 2003, "IEEE guide for application and specification of harmonic filters", New York

- [18] Milovanović M, Radosavljević J, Perović B and Dragičević M, 2018, “Power flow in radial distribution systems in the presence of harmonics”, *Journal of Electrical Engineering and Computing*, vol. 2, no. 1, pp. 11-19
- [19] Prakash D B, Lakshminarayana C, 2017, “Optimal siting of capacitors in radial distribution network using whale optimization algorithm”, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 56, no. 4, pp. 499-509