

OPTIMALNO ANGAŽOVANJE KONDENZATORA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI ZA PERIOD OD 24H**OPTIMAL ENGAGEMENT OF CAPACITORS IN DISTRIBUTION NETWORK FOR 24H PERIOD**

Branislav Vejnović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U radu je razmatran problem optimalnog angažovanja kondenzatora u distributivnoj mreži za period od 24h. Matematički model za njegovo rešavanje je razvijen i implementiran u programskom jeziku C++. Potom je izvršena verifikacija i praćenje toka algoritma na primeru test mreže.

Ključne reči: *Distributivna mreža, Reaktivna snaga, Faktor snage, Upravljanje kondenzatorima*

Abstract – *In this paper optimal engagement of capacitor in distribution network for period of 24h is analyzed. Mathematical model of optimization problem is described and then implemented in programming language C++. Verification of mathematical model and algorithm tracking is done on simple example of test distribution network.*

Keywords: *Distribution network, Reactive power, Power factor control, Shunt capacitor optimization*

1 UVOD

Prilikom koordinacije dva uređaja, plan angažovanja kondenzatora je sastavljen "off-line", na osnovu prognoziranih karakteristika potrošnje. Kondenzatori rade u skladu sa tako definisanim rasporedom. Pritom, otočni kondenzatori uglavnom imaju samo dva diskretna stanja, uključeno i isključeno, koja nisu dovoljna za iole finu regulaciju napona i tokova reaktivnih snaga. Nemoćnosti kondenzatorskih baterija i odstupanja prognozirano i ostvarenog režima, pokrivaju se primenom regulacioni transformatori sa mogućnošću regulacije pod naponom (ULTC Tr).

Primenom ULTC Tr sa više pozicija regulacione sklopke, omogućeno je da se u realnom vremenu obezbedi dovoljno fino regulacija napona. Da bi se što više pomoglo ULTC Tr potrebno je razviti algoritam čijom primenom bi se dobio što kvalitetniji plan angažovanja kondenzatora za ceo dan [1]. Jedan takav algoritam treba da na osnovu prognozirane potrošnje i uklopnog stanja mreže, da napravi teorijski optimalan plan po kojem kondenzatori treba da rade. Dodatnu kompleksnost algoritma uvode ograničenja dozvoljenih manipulacija nad kondenzatorima u toku dana.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji je mentor bio dr Goran Švenda, red. prof.

Nakon Uvoda u drugom delu rada je predstavljen problem optimalnog angažovanja otočnih kondenzatora za naredna 24h. U trećem delu je dat prikaz metoda za rešavanje postavljenog problema – izbor optimalnog angažovanja kondenzatora u zadatom periodu. Nakon toga u četrtom delu date su teorijske osnove genetskog algoritma. Pre svega njegove komponente i princip rada.

Peti deo se nadovezuje na četvrti. On sadrži detalje implementacije genetskog algoritma za rešenje datog problema, kao i opis parametara optimizacije i ograničenja koja genetski algoritam uvažava.

U šestom delu su prikazani rezultati verifikacije korišćenog algoritma. Nakon zaključka referentno je navedena literatura korišćena za realizaciju ovog rada.

2 POSTAVKA PROBLEMA

Dimenzija problema optimizacije, izbor optimalnog angažovanja kondenzatora u zadatom periodu, zavisi od broja i karakteristika regulacionih resursa, vrste i broj kriterijumske funkcije i naravno ograničenja koje te kriterijumske funkcije moraju da ispoštuju. Kriterijumska funkcija je funkcija kojom je izražen cilj VVO procedure. Ona može da predstavlja potrebu distributivnog preduzeća da smanji troškove, ostvari dobit, da poveća sigurnost pogona distributivne mreže (DM), itd.

Svaka kriterijumska funkcija podleže ograničenjima, što znači da njen minimum ne može uvek, po svaku cenu, da se ostvari.

Ograničenja su granice unutar kojih posmatrane veličine moraju da budu. Pri izboru konačnog, optimalnog rešenja mogu da se razmatraju samo rešenja kod kojih su sva ograničenja zadovoljena. Svaki dodatni kriterijum i svako dodatno ograničenje znatno otežava mogućnost postizanja optimalnog rešenja [2].

Cilj optimalnog angažovanja kondenzatora u naredna 24 časa jeste da se minimiziraju gubici aktivne snage u mreži i da se pritom smanji reaktivna snaga koja se preuzima iz prenosne mreže. Sve to uvažavajući naponska ograničenja i ograničenja broja manipulacija nad ULTC Tr i kondenzatorima [2].

Pritom, treba naglasiti tri velika problema koji narušavaju validnost planiranog angažovanja kondenzatora [3]:

1. Greške kratkoročne prognoze snage distribuiranih generatora i snage potrošača.
2. Neplanirana promena uklopnog stanja mreže.
3. Zavisnost snage potrošača od napona.

3 PREGLED LITERATURE

U protekloj deceniji je razvijano nekoliko metaheurističkih metoda koje su u stanju da reše optimizacione probleme koji su smatrani izuzetnom teškim ili čak nemogućim. Pod pojmom metaheurističkih metoda, prvenstveno se misli na evolucione algoritme (algoritme mravljih kolonija [4] metode roja [5], kaljenje čelika [6]), metode veštačke inteligencije [7] i druge. Izveštaji o primeni tih metoda su uveliko objavljeni. Za rešavanje tih ekstremno zahtevnih problema, ove metaheurističke metode su kombinovane. Dodatno, elementi znanja i drugi tradicionalniji pristupi, kao što je statistička analiza, su inkorporirani u metaheurističke metode.

Rešavanje optimizacionih problema sa ovim metodama nudi dve velike prednosti: i) vreme razvoja je mnogo kraće nego u slučaju korišćenja tradicionalnijih metoda optimizacije, ii) mogu se razmatrati problemi ogromnih razmera, relativno neosetljivi na šumove ili nedostajuće podatke. Osnovni nedostatak metaheurističkih metoda je da, i pored kvalitetne teorijske osnove po kojoj su sposobni da se prilagođavaju promenama stanja u DM, njihova primena još uvek nije dovoljno praktično potvrđena u realnim sistemima. Ovo je i glavna barijera za njihovu primenu u distributivnim sistemima na kojima se često vrši rekonfiguracija, ili imaju distributivne generatore.

Problem vremenskog intervala u primeni funkcije Volt/Var kontrol razmatra se u [8]. U tom radu problem pokušava da se reši primenom genetskog algoritma, tako što se kriva dnevnog opterećenja podeli na nekoliko nivoa opterećenja i za svaki od tih nivoa nađu optimalne pozicije ULTC Tr i angažovanje kondenzatora. U [6] je predstavljen i na realnoj distributivnoj mreži testiran model na bazi fuzzy logike. Model uzima u obzir ograničenja broja operacija nad resursima, i da bi rešio problem formiranja operativnog rasporeda rada kondenzatora koristi metod kaljenja čelika.

Autori rada [4] koriste algoritam kolonije mrava da reše problem određivanja optimalnog angažovanja kondenzatora na sekundaru transformatora i kondenzatora duž fidera, kao i određivanje optimalnih pozicija ULTC Tr za isti period. Algoritam je testiran na IEEE test mrežama. Metod baziran na neuronskim mrežama prikazan u [7] vrši kontrolu otopnih kondenzatora, ali pritom ne uvažavanja ULTC Tr.

4 GENETSKI ALGORITAM

U oblasti veštačke inteligencije genetski algoritam (GA) je pretraživačka heuristika koja oponaša proces prirodne selekcije. Ova heuristika (takođe ponekad nazivana metaheuristika) se rutinski koristi da generiše korisna rešenja za optimizaciju i probleme pretrage [9].

4.1 Komponente

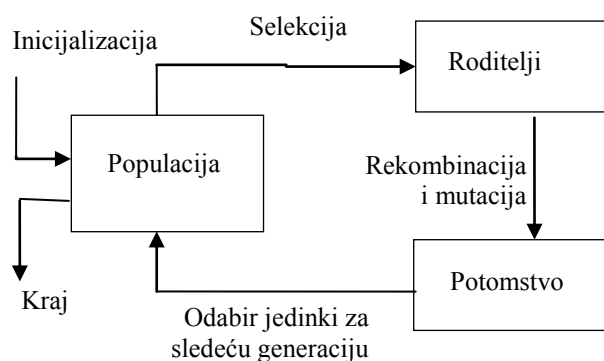
Osnovne komponente, neophodne za rad GA su [9]:

1. Reprezentacija jedinki,
2. Funkcija sposobnosti,
3. Populacija,
4. Mehanizam odabira roditelja,
5. Operatori mutacije i rekombinacije,
6. Način inicijalizacije populacije,
7. Uslov zaustavljanja.

4.2 Princip rada

Rad GA se može opisati u seldecih osam koraka [9]:

1. Definisavanje svih potrebnih parametara problema i GA,
2. Formiranje početne populacije,
3. Dekodiranje hromozoma – ovaj korak se javlja samo kod binarnih GA,
4. Određivanje cena hromozomima (funkcijom sposobnosti),
5. Odabir selekcije hromozoma koji će opstati za parenje,
6. Parenje – obično se iz boljeg dela populacije odaberu roditelji koji će na neki način ukrstiti svoj genetski materijal i dati jednog ili više potomaka,
7. Mutacija, pri kojima se menja genetski sadržaj hromozoma,
8. Ispitivanje konvergencije, da bi se utvrdilo da li ima osnova da se tok algoritma prekine. Ukoliko nije ispunjen uslov konvergencije, vratiti se na korak 3 odnosno 4.



Slika 1. Šema GA algoritma [9]

4.3 Ograničenja

Ponovljena procena funkcije sposobnosti (fitnes funkcije) za složene probleme je zaštitnički i ograničavajući segment veštačkih evolucioni algoritama. Pronalaženje optimalnog rešenja za složene visoko-dimenzione, multimodalne probleme često zahteva veoma skupe procene fitnes funkcija. Genetski algoritmi ne rade dobro srazmerno složenosti, tj kada je broj elemenata koji su izloženi mutaciji veliki često postoji eksponencijalni porast u veličini prostora za pretragu [9].

Zbog toga je teško koristiti tehniku na problemima kao što su projektovanje motora, kuće, ili aviona. Na primer, problemi optimizacije, nemaju tačan cilj, koje rešenje mora da se dostigne, već se pokušava naći najbolje moguće rešenje. Za specifične probleme optimizacije i instance problema, drugi algoritmi optimizacije mogu biti efikasniji od genetskih algoritama u pogledu brzine konvergencije. Alternativni i komplementarni algoritmi uključuju evolucione strategije, evoluciono programiranje, Gausovu adaptaciju, pretraživanje usponom i inteligenciju jata [9].

5 IMPLEMENTACIJA GA

Nakon postavke problema pravljenja operativnog rasporeda kondenzatora za naredna 24h i teoretskog pojašnjenja genetskog algoritma, na red je došlo da se prezentuje jedan od mogućih načina implementacije genetskog algoritma sa ciljem da reši problem razmatran u ovom zadatku.

5.1 Optimizacioni kriterijumi

Odabrani optimizacioni ciljevi i ograničenja nisu jedinstvena za ovaj problem i zavise od potreba distributivnih preduzeća i njihovih zahteva. Vrednovanje optimizacionih kriterijuma služi da genetski algoritam proceni vrednost svakog mogućeg rešenja, što je osnova rada genetskog algoritma.

5.1.1 Minimizacija gubitaka aktivne snage

Kriterijumska funkcija minimizacije gubitaka aktivne snage je najčešće korišćena kriterijumska funkcija. Dobija se minimizacijom sume gubitaka po vodovima u posmatranom periodu:

$$P_{loss,sum} = \sum_{t=1}^{24} P_{loss,t}, \quad (1)$$

gde $P_{loss,t}$ predstavlja snagu trofaznih gubitaka aktivne snage u satu t .

5.1.2 Minimizacija injektirane reaktivne snage

Zahtev za minimizacijom injektirane reaktivne snage se uvodi u svrhu podrške prenosnoj mreži, da se kroz nju spreči nepotreban transport reaktivne snage. Kriterijumska funkcija za minimizaciju injektirane reaktivne snage je data relacijom [2].

$$Z_{Q_{HV}} = \sum_{i=1}^{24} C_{Q_{HV}} \cdot \Delta Q_{inj,i}, \quad (2)$$

$$\Delta Q_{inj} = \begin{cases} 0, & Q_{inj} < Q^{max} \\ Q_{inj} - Q^{max}, & Q^{max} < Q_{inj} \end{cases} \quad (3)$$

gde je:

$C_{Q_{HV}}$ – cena reaktivne snage injektirane u DM;

Q^{max} – maksimalna vrednost injektirane reaktivne snage koju prenosna mreža ne naplaćuje distributivnoj;

$Q_{inj,i}$ – reaktivna snaga injektirana u DM sa primarne strane napojnog transformatora u i -tom času.

5.2 Ograničenja

Kriterijumske funkcije se moraju ograničiti standardnim ograničenjima koje mogu biti tipa jednakosti i nejednakosti. Razlika između kriterijumskih funkcija i ograničenja je prioritet u procesu optimizacije. Ograničenja su višeg prioriteta u optimizaciji. U slučaju da postoji narušenje ograničenja, prvi korak je uklanjanje tog narušenja, pa zatim u dozvoljenim granicama vršiti optimizaciju sa željenim kriterijumskim funkcijama, ako je moguće. Dakle, ograničenja su nešto što se mora ispoštovati, dok su kriterijumske funkcije cilj kome se teži što je više moguće [2].

5.2.1 Ograničenje po faktoru snage

Ograničenje po faktoru snage je jedno od standardnih ograničenja, koje direktno utiče na promenu tokova reaktivnih snaga. Uobičajeno se definiše na sledeći način:

$$\cos\varphi_{min} \leq \cos\varphi \leq \cos\varphi_{max} \quad (4)$$

gde je:

$\cos\varphi_{min}$ – minimalni dozvoljeni faktor snage;

$\cos\varphi_{max}$ – maksimalni dozvoljeni faktor snage;

$\cos\varphi$ – trenutni faktor snage [6].

5.2.2 Broj operacija na dnevnom nivou za kondenzatorske baterije

Ograničenje po broju akcija na dnevnom nivou za kondenzatorske baterije (npr. definisano specifikacijom proizvođača) je prikazano relacijom 5 [1]:

$$\sum_{i=1}^{24} (C_{n,i} \oplus C_{n,i-1}) \leq K_n; \quad n = 1, 2, \dots, n_c \quad (5)$$

gde je:

$C_{n,i}$ – status kondenzatora n u trenutku i ;

$C_{n,i-1}$ – status kondenzatora n u trenutku $i-1$;

K_n – maksimalni broj operacija nad kondenzatorom n ;

n_c – broj kondenzatora.

5.2.3 Ograničenje po naponima čvorova

Ograničenje po naponima čvorova predstavlja uslov koji se odnosi na vrednosti napona svakog čvora. Vrednosti napona svakog čvora razmatrane mreže se moraju kretati između minimalne i maksimalne vrednosti koje su definisane ograničenjem. Relacija kojom je uvaženo ovo ograničenje dato je u nastavku:

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (6)$$

gde je:

V_{min} – minimalni dozvoljeni napon;

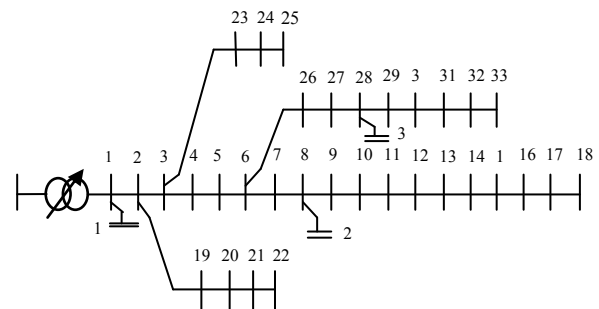
V_{max} – maksimalni dozvoljeni napon;

V_i – napon u i -tom čvoru;

i – indeks čvora [2].

6 VERIFIKACIJA ALGORITMA NA TEST MREŽI

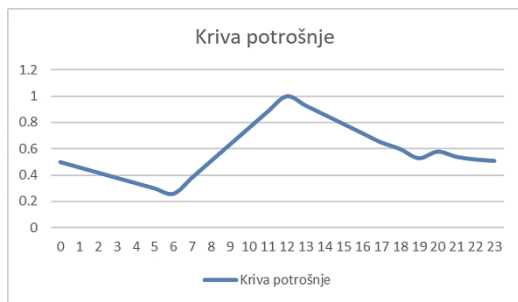
Na primeru test distributivne mreže od 33 čvora [1] korišćenjem GA, formiran je operacioni raspored rada kondenzatora za 24h. GA koristi rezultate tokova snaga, koji se izvršavaju sa predviđenim vrednostima potrošnje.



Slika 2. Izgled standardne IEEE test mreže [1]

6.1 Rešenje problema primenom GA

Algoritam je tokom izvršavanja krenuo od rasporeda koji daje rezultate prikazane u tabeli 1. U tabeli su prikazane vrednosti reaktivne energije injektirane u distributivnu mrežu iz prenosne (Q_{inj}), reaktivne energije injektirane iz distributivne u prenosnu (Q_{exp}), energiju gubitaka aktivne snage (P_{loss}) i prosečnog faktora snage. Prikazane vrednosti se odnose na period od 24h. Snaga potrošača je modelovana prema dnevnoj krivi potrošnje prikazanoj na slici 3.

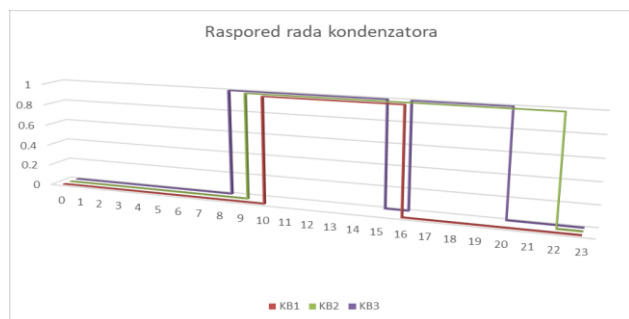


Slika 3. Dnevni dijagram potrošnje

Tabela 1. Rezultati dobijeni korišćenjem inicijalnog plana angažovanja

Q_{inj} [MVarh]	Q_{exp} [MVarh]	P_{loss} [MWh]	$\cos\phi$
4.085	22.768	2.3244	0.902

Nakon 450. iteracija GA, dobijen je operativni plan prikazan na slici 4, a rezultati korišćenja generisanog plana na test mreži su prikazani u tabeli 2

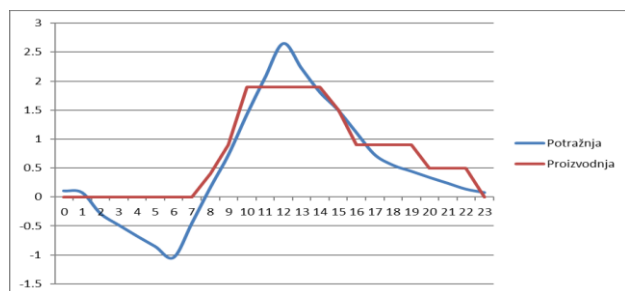


Slika 4. Grafički prikaz rasporeda rada kondenzatora

Tabela 2. Rezultati dobijeni korišćenjem generisanog plana angažovanja

Q_{inj} [MVarh]	Q_{exp} [MVarh]	P_{loss} [MWh]	$\cos\phi$
0.221	12.72	2.16	0.9699

Na slici 5 prikazan je odnos reaktivne energije koja se injektira iz prenosne u DM kad nisu uključeni kondenzatori (plava boja) i proizvodnje reaktivne snage od strane kondenzatora u skladu sa rasporedom angažovanja koji je za dati period dobijen primenom GA (crvenom bojom).



Slika 5. Potražnja reaktivne snage DM i proizvodnja reaktivne snage od strane kondenzatora za period 24h

Iz tabele 2 se vidi da je ispoštovano ograničenje po dnevnim operacijama nad kondenzatorima i da je prosečni faktor snage u granicama ograničenja. Vidi se poboljšanje rešenja u vidu manjih gubitaka aktivne snage u poređenju sa prethodno razmatranim rešenjem. Poboljšanje prosečnog faktora snage, kao i manje proizvodnje reaktivne snage u periodima niske potrošnje, što se ogleda u manjim vrednostima Q_{exp} .

7 ZAKLJUČAK

U radu je razmatran problem optimalnog angažovanja kondenzatora za period od 24h, koristeći prognoziranje vrednosti potrošnje. Nakon uvodnih razmatranja, čitaocu su ukratko predstavljene metode koje su u literaturi korišćene za rešavanje razmatranog problema. U radu je posebno razmatran genetski algoritam. Genetski algoritam je primenjen na IEEE mreži i za vreme izvršavanja od 7 sati generisao rešenje razmatranog problema. Uočeno je da se tokom vremena generišu sve kvalitetnija rešenja, u smislu boljih rezultata optimizacionih kriterijuma i pokazalo se da je jedan od problema genetskog algoritma upravo uslov zaustavljanja. Tako da je neophodno pronaći optimalan odnos kvaliteta rešenja i dozvoljenog vremena izvršavanja algoritma.

8 LITERATURA

- [1] A.Ulinuha, M.A.S.Masoum, S.M.Islam: Optimal Scheduling of LTC and Shunt Capacitors in Large Distorted Distribution Systems Using Evolutionary-Based Algorithms, *IEEE Trans. on PWRD*, vol. 23, Issue: 1, Jan. 2008.
- [2] S.Bajić: *Optimizacija napona i reaktivnih snaga u distributivnim mrežama*, master rad, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Novi Sad, 2014.
- [3] J.Park, S.Nam, J.-K.Park: Control of a ULTC Considering the Dispatch Schedule of Capacitors in a Distribution System, *IEEE Trans. on PS*, vol. 22, Issue: 2, May 2007.
- [4] R.H.Liang, Y.S.Wang: Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system; *IEEE Trans. on PWRD*, vol. 18, no. 2, pp. 610-618, Apr. 2003.
- [5] G.Carpinelli, C.Noce: Voltage Regulators and Capacitor Placement in Three-phase Distribution Systems with Non-linear and Unbalanced Loads; *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, No.4, 1-17, (2006).
- [6] T.Ghose, S.K.Goswami: Effects of unbalances and harmonics on optimal capacitor placement in distribution system; *Electric Power Systems Research*, 68, 2, 167-173, (2003)
- [7] T.Niimura, R.Yokoyama, B.J.Cory: A fuzzy coordination approach for multi-objective voltage and reactive power scheduling of an electric power system; in *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems*, pp. 267-272, Mar. 1993.
- [8] L.Zhang, W.Tang, J.Liang, P.Cong, Y.Cai: *Coordinated Day-Ahead Reactive Power Dispatch in Distribution Network Based on Real Power Forecast Errors*. IEEE Transactions on Power Systems. 31. 1-9. 10.1109/TPWRS.2015.2466435
- [9] Mitchell, Melanie (1996). *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge: MA: MIT Press. crp. 2, 2015.

Kratka biografija:



Branislav Vejnović rođen je u Novom Sadu 1994. godine. Master rad je odbranio 2019. godine na Fakultetu tehničkih nauka iz Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi.