

Podešavanje usmerenih zemljospojnih zaštita u prenosnoj mreži korišćenjem unapredene metode diferencijalne evolucije

Directional Ground Overcurrent Protection Setting Calculation in Transmission Network by Using Differential Evolution Algorithm

Miljana Todorović^{*,**}, Aleksandar Savić^{*}

^{*} Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

^{**} Saturn Electric d.o.o. Beograd

Rezime - U radu je predstavljen postupak podešavanja usmerenih zemljospojnih zaštita u prenosnoj mreži na osnovu klasičnog proračuna i primenom unapređenog algoritma diferencijalne evolucije. Kako bi sistem relejne zaštite ispunio zahteve kao što su brzina, selektivnost, koordinisanost i osetljivost, definisani su uslovi koje je neophodno uvažiti prilikom podešavanja usmerenih zemljospojnih zaštita. U slučaju primene optimizacione metode, problem je rešavan na dva načina. U prvom slučaju, podešenja su formirana tako da se minimizuje ukupno vreme reagovanja usmerenih zemljospojnih zaštita na udaljeni kvar preko velikog otpora, dok su u drugom slučaju podešenja formirana tako da maksimalno vreme reagovanja na udaljeni kvar preko velikog otpora bude minimalno. Rezultati koji su dobijeni primenom klasičnog pristupa su upoređeni sa rezultatima dobijenim primenom optimizacione metode i istaknute su prednosti i mane oba pristupa.

Ključne reči - relejna zaštita, koordinacija, optimizacija, usmerena zemljospojna zaštita

Abstract - The paper presents the procedure of directional ground overcurrent protection setting calculation in the transmission network by using classical calculation procedure and by using an advanced algorithm of differential evolution. To meet the basic requirements of relay protection systems such as speed, selectivity, coordination and sensitivity, the conditions that need to be considered when setting directional ground overcurrent protection are defined. By using the optimization method, the problem was solved in two ways. In the first case, the settings are designed to minimize the total response time of directional ground overcurrent protection to remote-end high-resistance faults, whereas in the second case the settings are designed so that the maximum response time to remote-end high-resistance fault is minimal. The results obtained using the classical approach are compared with the results obtained using the optimization method and the advantages and disadvantages of both approaches are highlighted.

Index Terms - Relay protection, Coordination, Optimization, Directional ground overcurrent protection

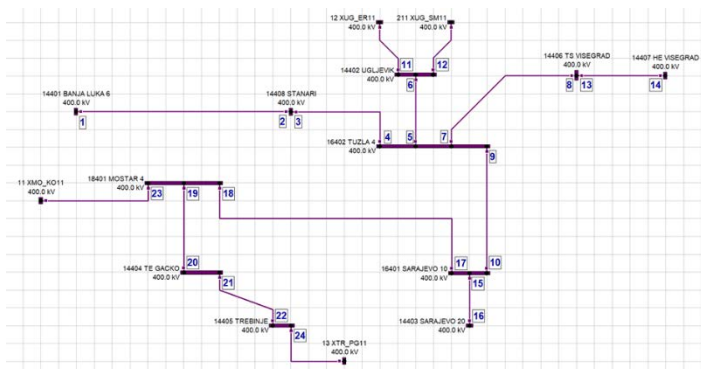
I UVOD

Zaštita visokonaponskih dalekovoda od kvarova sa zemljom se najčešće realizuje kombinacijom distantne i usmerene zemljospojne zaštite. S obzirom da zbog ograničenja prilikom podešavanja rezistivnog dosega distantna zaštita najčešće nije osetljiva na kvarove sa zemljom preko velike impedanse, za detekciju tih kvarova se koristi usmerena zemljospojna zaštita. Prilikom podešavanja usmerenih zemljospojnih zaštita je neophodno uvažiti da pored toga što zaštita treba da bude brza i osetljiva na kvarove preko velikih impedansi, ista ne sme da bude osetljiva na režime bez kvara, kao i da mora da bude koordinisana sa ostalim relevantnim zaštitama u sistemu. Metode podešavanja ovih zaštita se značajno razlikuju među kompanijama i u zavisnosti od sistema kome pripadaju, i ne postoji jedinstveno pravilo podešavanja. U radu je predstavljen jedan od načina na koji je moguće podesiti usmerene zemljospojne zaštite u delu prenosnog sistema tako da zadovoljava sve prethodno definisane zahteve, a koji se odnose na selektivnost i koordinisanost, brzinu i osetljivost, klasičnim putem, a kasnije i korišćenjem jedne od optimizacionih metoda.

Primena metoda optimizacije za podešavanje prekostrujnih zaštita sa vremenski zavisnim karakteristikama je često analizirana u literaturi. Optimalna podešenja su računata korišćenjem metoda linearnog programiranja, kao što je simpleks metoda [1], [2], zatim genetičkog algoritma [3], diferencijalne evolucije [4] i drugih. U radu je problem podešavanja usmerenih zemljospojnih zaštita rešen korišćenjem unapredene metode diferencijalne evolucije. Kriterijumska funkcija je definisana na dva načina. U prvom slučaju je cilj bio da se postigne minimalno ukupno vreme reagovanja na udaljeni kvar preko velikog otpora, dok je u drugom slučaju cilj bio da maksimalno vreme reagovanja na udaljeni kvar preko velikog otpora bude minimalno. Rezultati dobijeni primenom unapredene metode diferencijalne evolucije su upoređeni sa rezultatima dobijenim ako se podešenja računaju klasičnim putem. Poređenjem rezultata se uočilo da je smanjenje ukupnog vremena reagovanja na udaljeni kvar preko velikog otpora u slučaju proračuna podešenja optimizacionom metodom oko 15%.

II FORMULACIJA PROBLEMA

U radu su analizirane metode podešavanja usmerenih zemljospojnih zaštita u prenosnom sistemu. Kao konkretan deo prenosnog sistema izabran je 400 kV prenosni sistem Bosne i Hercegovine, formiran u okviru kompletnog modela jugoistočne Evrope u softverskom paketu CAPE (eng. *Computer-Aided Protection Engineering*), predstavljen na slici 1. Pozicije na kojima se nalaze distantni zaštitni uređaji u kojima su realizovane usmerene zemljospojne zaštite su označene brojevima od 1 do 24.



Slika 1. Jednopolna šema 400 kV prenosne mreže BiH

A. Usmerena zemljospojna zaštita

Usmerena zemljospojna zaštita se koristi za detekciju kvarova sa zemljom preko velike vrednosti prelaznog otpora, koji bi mogli da se nađu izvan zone reagovanja distantne zaštite. Merna veličina usmerenih zemljospojnih zaštita u osnovi je trostruka nulta komponenta struje zemljospoja ($3I_0$) ili tzv. „rezidualna struja“, koja se dobija u neutralnom provodniku sekundara strujnih transformatora vezanih u „zvezdu“. Usmerena zemljospojna zaštita može da se realizuje sa korišćenjem ili bez korišćenja komunikacionih šema. Ukoliko je omogućeno uvođenje usmerene zemljospojne zaštite u komunikacionu šemu, problem koordinacije i selektivnosti podešenja je praktično eliminisan. Međutim, u konkretnom primeru, analizirane su usmerene zemljospojne zaštite koje su realizovane bez komunikacione šeme.

Opšta preporuka je da se sve usmerene zemljospojne zaštite realizuju pomoću vremenski zavisnih karakteristika. Koordinaciju zaštitnih funkcija koje su realizovane pomoću vremenski zavisnih karakteristika reagovanja je najjednostavnije postići ukoliko je tip krive isti na svim pozicijama. U konkretnom slučaju, analizirana je primena jedne od tri najčešće korišćenih vremenski zavisnih karakteristika reagovanja, i to: normalno inverzne IEC karakteristike (IEC NI), veoma inverzne IEC karakteristike (IEC VI) i ekstremno inverzne IEC karakteristike (IEC EI).

U opštem obliku, jednačina vremenski zavisne karakteristike reagovanja se može definisati na sledeći način:

$$t = TD \cdot \frac{A}{\left(\frac{3I_0}{3I_{0p}} \right)^B - 1}$$

gde su:

t – vreme odlaganja delovanja zaštite;

TD – vremenski multiplikator krive;

$3I_0$ – trostruka vrednost komponente struje kvara nultog redosleda;

$3I_{0p}$ – podešene praga reagovanja zaštitne funkcije;

A i B parametri koji opisuju različite tipove karakteristika.

Ukoliko je karakteristika tipa IEC normalno inverzna, vrednost parametara iznosi: $A=0,14$ i $B=0,02$. Za IEC veoma inverznu karakteristiku vrednost parametara iznosi: $A=13,5$ i $B=1$, dok za IEC ekstremno inverznu karakteristiku važi: $A=80$ i $B=2$.

Kako bi se izbeglo da za veoma visoke vrednosti merenih struja vremena reagovanja zaštite budu jako niska, proizvođači zaštitnih uređaja uvode ili podešenje minimalnog vremena reagovanja ili je minimalno vreme reagovanja definisano pri vrednosti merene struje koja je jednaka nekom celobrojnom umnošku vrednosti podešenja praga reagovanja (najčešće je to 20 ili 30). U analiziranom primeru, vremenski zavisne karakteristike reagovanja usmerenih zaštita su realizovane tako da za sve merene struje (trostruke vrednosti komponente struje nultog redosleda) za koje važi nejednakost $3I_0/3I_{0p} > 20$, vreme odlaganja delovanja zaštite je isto kao i za slučaj da je $3I_0/3I_{0p} = 20$. Nepoznati parametri koji se određuju ili klasičnom metodom ili metodom optimizacije su podešenje prorađne vrednosti i podešenje vremenskog multiplikatora usmerene zemljospojne zaštite za svaki zaštitni uređaj od interesa. Za svaki tip zaštitnog uređaja ovi parametri mogu da se podešavaju u tačno određenim granicama. Dozvoljeni opsezi podešavanja parametara, korišćeni u konkretnom primeru, su definisani u tabeli 1.

Tabela 1. Dozvoljeni opsezi vrednosti parametara usmerenih zemljospojnih zaštita

| Parametar | Opseg podešenja |
|-------------------------|-----------------|
| Prorađna vrednost | 0,05-4 Asec |
| Vremenski multiplikator | 0,05-3 |

B. Zahtevi prilikom podešavanja zaštita

Prilikom formiranja podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita, a kako bi se obezbedio selektivan i koordinisan rad, minimalno vreme izolovanja kvarova i osetljivost zaštite, neophodno je da se ispune sledeći uslovi, a koji će kasnije biti i detaljno opisani:

- 1) Koordinisanost usmerenih zemljospojnih zaštita sa prvim i drugim stepenom distantnih zaštita za kvarove na šticeuom dalekovodu
- 2) Koordinisanost usmerenih zemljospojnih zaštita sa višim stepenima distantnih zaštita za kvarove na susednom dalekovodu
- 3) Osetljivost na kvarove preko prelaznog otpora velike vrednosti
- 4) Koordinisanost glavnih i rezervnih zaštitnih uređaja

Kako bi se definisali kriterijumi za podešavanje usmerenih zemljospojnih zaštita, a koji se odnose na koordinisanost sa distantnim zaštitama dalekovoda (prvi i drugi uslov), neophodno je dobro poznavati kompletan sistem zaštite dalekovoda u prenosnoj mreži. Zaštita dalekovoda od kratkih spojeva je u konkretnom primeru realizovana distantnom zaštitom u tri, četiri ili pet stepeni. Karakteristike reagovanja distantnih zaštita su

kvadrilateralne. Osnovna zaštita dalekovoda je ostvarena prvim i drugim stepenom, dok viši stepeni predstavljaju rezervnu zaštitu za kvarove na susednim dalekovodima i kvarove na šticienom dalekovodu preko velikih otpornosti. Prvi stepen distantne zaštite deluje bez odlaganja, dok je vreme odlaganja delovanja za drugi stepen distantne zaštite podešeno na 300 ms u 400 kV mreži. Treći i četvrti stepen se podešavaju tako da na selektivan način izoluju kvarove na susednim dalekovodima ukoliko je došlo do otkaza primarne zaštite ili prekidača. Vremena odlaganja delovanja trećeg i četvrtog stepena se najčešće dobijaju dodavanjem po jednog minimalnog koordinacionog intervala na vreme odlaganja delovanja drugog, odnosno trećeg stepena, ali u određenim situacijama to mogu biti i po dva koordinaciona intervala (ukoliko je nemoguće na drugi način postići selektivnost).

- 1) Koordinisanost usmerenih zemljospojnih zaštita sa prvim i drugim stepenom distantnih zaštita za kvarove na šticienom dalekovodu

Kvarovi na šticienom dalekovodu se ne smeju izolovati pre delovanja prvog, odnosno drugog stepena distantne zaštite dalekovoda uz uvažavanje minimalnog koordinacionog intervala. Kako bi ovaj uslov bio ispunjen, neophodno je izračunati vrednosti maksimalne trostruke nulte komponente struje zemljospoja na početku dalekovoda za jednofazni i dvofazni kratak spoj sa zemljom. Vreme reagovanja usmerene zemljospojne zaštite na kvar kome odgovara najveća vrednost trostruke nulte komponente struje ne sme biti manje od 600 ms (što predstavlja vreme reagovanja drugog stepena distantne zaštite uvećano za minimalni koordinacioni interval od CTI=300 ms). Maksimalna trostruka vrednost nulte komponente struje se određuje ili ako se prilikom proračuna kratkih spojeva napon pre kvara uveća u odnosu na nominalni (najčešće se usvaja napon koji je za 10% veći od nominalnog) ili uvođenjem koeficijenta sigurnosti kojim se multiplicira vrednost struje kvara dobijena proračunom.

- 2) Koordinisanost usmerenih zemljospojnih zaštita sa višim stepenima distantnih zaštita za kvarove na susednom dalekovodu

Kvarovi na susednom dalekovodu se ne smeju izolovati pre delovanja viših stepeni distantne zaštite u okviru istog zaštitnog uređaja, a koji predstavljaju rezervnu zaštitu za kvarove na susednom dalekovodu. Kako bi ovaj uslov bio ispunjen, neophodno je izračunati maksimalne trostruke vrednosti nulte komponente struje kvara za kvarove na kraju šticienom dalekovoda (jednofazni i dvofazni kratak spoj sa zemljom bez prelaznog otpora). Vreme odlaganja delovanja usmerene zemljospojne zaštite za ove kvarove ne sme biti manje od 1,5 s.

- 3) Osetljivost na kvarove preko prelaznog otpora velike vrednosti

Usmerena zemljospojna zaštita mora biti osetljiva na kvarove sa zemljom na dalekovodu preko velikog prelaznog otpora. Vrednost maksimalnog prelaznog otpora u analiziranom sistemu je usvojena da bude 100 Ω. Kako bi zaštita bila osetljiva na pomenuti kvar, podešena proradna vrednost mora biti manja od trostruke nulte komponente struje pri jednofaznom kvaru sa zemljom preko otpornosti od 100 Ω na udaljenim sabirnicama, sa

uvažanim koeficijentom rezerve. Sa druge strane, podešena proradna vrednost trostruke nulte struje mora biti veća od najveće očekivane trostruke nulte struje u režimu bez kvara. U konkretnom slučaju, usvojeno je da je najveća očekivana trostruka nulta struja manja od 0,1 A sekundarnih.

- 4) Koordinisanost glavnih i rezervnih zaštitnih uređaja

Prilikom podešavanja usmerenih zemljospojnih zaštita, neophodno je koordinisati karakteristike usmerenih zemljospojnih zaštita susednih dalekovoda. S obzirom da su svi zaštitni uređaji u analiziranom sistemu mikroprocesorski, dozvoljeni minimalni koordinacioni interval je CTI=300 ms.

C. Kriterijumska funkcija

Prilikom primene metode diferencijalne evolucije za rešavanje optimalnih podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita, neophodno je definisati kriterijumsku funkciju. U radu je ona definisana na dva različita načina. U prvom slučaju je cilj da se postigne minimalno ukupno vreme reagovanja svih usmerenih zemljospojnih zaštita na udaljene kvarove preko velikog otpora (konkretno 100 Ω). Taj uslov je moguće napisati u sledećem obliku:

$$\min_{3I_{opi}, TD_i} f = \sum_{i=1}^n w_i t_{i,k}$$

gde su:

$3I_{opi}$ – podešenje proradne vrednosti usmerene zemljospojne zaštite i -tog zaštitnog uređaja;

TD_i – podešenje vremenskog multiplikatora usmerene zemljospojne zaštite i -tog zaštitnog uređaja;

n – ukupan broj zaštitnih uređaja;

w_i – težinski faktor koji se određuje na osnovu verovatnoće da će se desiti kvar (usvojeno je $w_i=1$ za svako i);

$t_{i,k}$ – vreme reagovanja usmerene zemljospojne zaštite na zadati kvar.

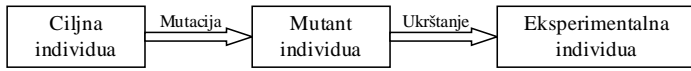
U drugom slučaju, kriterijumska funkcija je definisana tako da se postigne da maksimalno vreme reagovanja zaštita na zadate kvarove bude minimalno.

III DIFERENCIJALNA EVOLUCIJA

Diferencijalna evolucija (eng. *Differential Evolution* – DE) je jedna od često korišćenih metaheurističkih metoda za rešavanje problema globalne optimizacije. Ovaj algoritam, koji se pokazao efikasnim u rešavanju brojnih zadataka, predložili su Storn i Price 1997. godine [5]. Glavna prednost DE algoritma je ta što on koristi mali broj kontrolnih parametara, dok su mane vezane za sporu konvergenciju i stagnaciju populacije rešene u modifikovanoj verziji algoritma diferencijalne evolucije, koja se naziva MIHDE (eng. Mixed-Integer Hybrid Differential Evolution).

Kao i u slučaju većine drugih populacionih metaheuristika, početna slučajna populacija se generiše u fazi inicijalizacije. U svakoj generaciji izvršavanja, kreiraju se nove individue pomoću operatora ukrštanja i mutacije, kao što je prikazano na slici 2. Zatim se izračunava podobnost novih jedinki (eksperimentalne individue) i upoređuje se sa podobnošću starih jedinki (ciljne individue). Na osnovu rezultata ovog procesa, bolje jedinke sa

zadržavaju i prenose se u sledeću generaciju. Eksperimentalne individue se generišu ukrštanjem ciljnih individua sa jedinkama koje su nastale primenom operatora mutacije (mutant individue). U unapređenoj verziji algoritma MIHDE, koristi se dodatno i operacija migracije.



Slika 2. Primena operatora mutacije i ukrštanja

1) Inicijalizacija

Neka je D broj nepoznatih parametara, a N_p broj jedinki u populaciji. U tom slučaju je matrica nepoznatih parametara X dimenzije $N_p \times D$. Ako sa $X_i(0)$ označimo i -tu populaciju u fazi inicijalizacije, njena vrednost se dobija na sledeći način:

$$X_i(0) = X^L + r \cdot (X^U - X^L), i = 1, \dots, N_p$$

gde su:

r – nasumično izabran broj iz opsega $[0,1]$;

X^L – donja granica ograničenja nepoznatih promenljivih, matrica $1 \times D$;

X^U – gornja granica ograničenja nepoznatih promenljivih, matrica $1 \times D$.

2) Mutacija

Mutant individua se generiše na osnovu sledeće formule:

$$V_i(t) = X_{r1}(t) + r_m \cdot (X_{r2}(t) - X_{r3}(t)), i = 1, \dots, N_p$$

gde su:

r_m – mutacioni faktor; nasumično izabran realan broj iz opsega $[0,1]$;

r_1, r_2, r_3 – nasumično izabrani različiti celi brojevi iz opsega $[0, N_p]$ sa izuzećem broja i (na osnovu čega se zaključuje da je minimalan broj jedinki u populaciji 4).

3) Ukrštanje

Operacija ukrštanja se primenjuje kako bi se povećala raznovrsnost rešenja. Pomoću vrednosti izračunate mutant individue $V_i(t)$ i ciljne individue $X_i(t)$, određuje se vrednost eksperimentalne individue. Vrednosti eksperimentalne individue se ne proračunavaju, već se za svaku jedinku vrši izbor da li se vrednosti promenljivih preuzimaju iz mutant ili iz ciljne individue. Način na koji se taj izbor vrši je sledeći:

$$u_{ji}(t) = \begin{cases} x_{ji}(t), & \text{ako je } r > r_c \text{ AND } i \neq \delta \\ v_{ji}(t), & \text{ako je } r \leq r_c \text{ OR } i = \delta \end{cases}$$

gde su:

r – nasumično izabran broj iz opsega $[0,1]$ i određuje se za svaku jedinku;

r_c – zadata verovatnoća ukrštanja (veća vrednost verovatnoće rezultuje većim brojem individua koje se preuzimaju iz mutant individue);

δ – nasumično izabran celi broj iz opsega $[0, N_p]$ koji služi kao garancija da će se makar jedna jedinka sigurno preuzeti iz mutant vektora.

4) Evaluacija

Funkcija evaluacije se primenjuje poredeći vrednosti kriterijumske funkcije ciljne i eksperimentalne individue, za

svaku individuu u populaciji, a bolja jedinka se zadržava.

5) Migracija

Operacija migracije se primenjuje kako bi se povećao opseg pretrage za najboljim rešenjem, tako što će se regenerisati nova, različita, populacija jedinki. Individue koje se dobijaju migracijom se generišu na bazi najbolje individue, X_b , na sledeći način:

$$x_{ji}(t+1) = \begin{cases} x_{bi}(t) + r_i(x_j^L - x_{jb}(t)), & \text{rand} < \frac{x_{bi}(t) - x_j^L}{x_j^U - x_j^L} \cdot r_c \\ x_{bi}(t) + r_i(x_j^U - x_{jb}(t)), & \text{inače} \end{cases}$$

gde je:

r_i – nasumično izabran broj iz opsega $[0,1]$.

Operacija migracije se primenjuje samo ukoliko nije zadovoljena raznolikost populacije, tj. u slučaju kada većina jedinki ima jako bliske vrednosti parametara. Stepenn raznolikosti populacije, η , se definiše na sledeći način:

$$\eta = \left(\sum_{i=1}^D \sum_{j=1, j \neq b}^{N_p} dx_{ji} \right) / (N_p \cdot (D-1))$$

gde dx_{ji} opisuje sličnost gena između najbolje individue i posmatrane individue, i računa se na sledeći način:

$$dx_{ji} = \begin{cases} 0, & \text{ako je } \left| \frac{x_{ji}(t) - x_{bi}(t)}{x_{bi}(t)} \right| < \varepsilon \\ 1, & \text{inače} \end{cases}$$

gde je:

ε – definisani stepen odstupanja.

IV ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

U ovom poglavlju će biti prikazani rezultati dobijeni primenom MIHDE optimizacione metode, kao i rezultati koji su dobijeni na osnovu klasičnog računskog proračuna. Kako se sa povećanjem nepoznatih parametara značajno produžava trajanje proračuna primenom MIHDE metode, rešavanje optimalnih podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita je ograničeno na dva od četiri operativna područja u 400 kV prenosnoj mreži Bosne i Hercegovine, i to OP Banja Luka i OP Tuzla. Operativnim područjima Banja Luka i Tuzla pripadaju zaštitni uređaji 1-9 i 11-14. S obzirom da je dalekovod TS Višegrad – HE Višegrad električno kratak dalekovod ($SIR > 30$), njegovu zaštitu je neophodno realizovati diferencijalnom zaštitom. Usmerena zemljospojna zaštita se u tom slučaju realizuje korišćenjem komunikacione šeme, pa stoga nije neophodno koordinisati rad zaštitnih uređaja 7 i 13 na klasičan način, jer je uslov koordinacije svakako ispunjen. Stoga se problem određivanja optimalnih podešenja ograničava na zaštitne uređaje 1-9, 11 i 12.

Za potrebe proračuna parametara podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita, neophodno je u vidu ulaznih podataka obezbediti podatke o strujama kratkih spojeva od interesa. U ovom slučaju su to trostruka nulta komponenta struje u slučaju bliskog jednofaznog i dvofaznog kratkog spoja sa zemljom, trostruka nulta komponenta struje u slučaju jednofaznog i

dvofaznog kratkog spoja sa zemljom na udaljenim sabirnicama dalekovoda, kao i trostruka nulta komponenta struje pri jednofaznom kratkom spoju preko otpora od 100Ω na udaljenom kraju dalekovoda, za sve pozicije zaštitnih uređaja od interesa. Sve vrednosti struja kratkih spojeva su dobijene korišćenjem CAPE programskog paketa i prikazane su u tabeli 2. Takođe, kao ulazni podatak je neophodno izdvojiti i parove glavnih i rezervnih zaštitnih uređaja koji su prikazani u tabeli 3, a na osnovu jednopolne šeme sa slike 1.

A. Klasični proračun podešenja

Kako bi se definisao pristup koji je primenjen prilikom podešavanja klasičnim putem, polazi se od prethodno definisane jednačine vremenski zavisne karakteristike reagovanja u opštem obliku. Uslov koordinisanosti usmerenih zemljospojnih zaštita sa višim stepenima distantnih zaštita za kvarove na susednom dalekovodu, praktično znači da vreme reagovanja usmerene zemljospojne zaštite za kvar na kraju voda sa maksimalnom vrednošću nulte komponente struje zemljospoja mora biti veće ili jednako 1,5 s. Usvaja se granični slučaj, tj. da je vreme izolovanja kvara tačno 1,5 s, te stoga važi:

$$1,5s = TD \cdot \frac{A}{\left(\frac{3I_0}{3I_{op}}\right)^B - 1}$$

gde su:

TD – vremenski multiplikator krive;

$3I_0$ – veća od dve vrednosti trostruke nulte komponente struje zemljospoja za jednofazni ili dvofazni kratak spoj na kraju voda (vrednost iz tabele 2);

$3I_{op}$ – podešenje praga reagovanja zaštitne funkcije.

Time je dobijena prva jednačina sa dve nepoznate. Druga jednačina se dobija iz uslova da pri trostrukoj nultoj komponenti struje zemljospoja koja je jednaka dvadesetostrukoj vrednosti praga reagovanja zaštitne funkcije, vreme odlaganja delovanja zaštite bude tačno 1,2 s (čime se postiže koordinacija glavnih i rezervnih usmerenih zemljospojnih zaštita), to jest:

$$1,2s = TD \cdot \frac{A}{(20)^B - 1}$$

Time se jednoznačno određuje vrednost za vremenski multiplikator krive. Eventualne promene ovako generisanih podešenja se mogu javiti ukoliko trostruke nulte komponente struje bliskih jednofaznih i dvofaznih kratkih spojeva nisu veće od dvadesetostruke vrednosti podešenja praga reagovanja ili proračunato podešenje praga reagovanja usmerene zemljospojne zaštite bude manje od donje granice podešenja, što nije bio slučaj u analiziranom primeru.

Prilikom formiranja podešenja, razmatrana su tri tipa inverznih karakteristika: IEC normalno inverzna, IEC veoma inverzna i IEC ekstremno inverzna karakteristika. Ukoliko se u prethodno definisanu jednačinu za proračun vremenskog multiplikatora uvrste vrednosti parametara A i B koji odgovaraju IEC ekstremno inverznoj krivi ($A=80$, $B=2$), dobija se vrednost za vremenski multiplikator oko 6, što je značajno više od gornje granice podešavanja vremenskog multiplikatora u najvećem broju

zaštitnih uređaja (najčešće je to 1,1 ili 3). Dakle, neophodno je uporediti rezultate dobijene ukoliko je primenjena IEC NI karakteristika na svim pozicijama sa rezultatima ukoliko je primenjena IEC VI karakteristika na svim pozicijama. Ukoliko se kao kriterijum definiše ukupno vreme reagovanja na udaljene kvarove preko otpora od 100Ω , u slučaju primene IEC NI karakteristika to vreme iznosi 71,2 s, dok je u slučaju primene IEC VI karakteristika to vreme više nego dvostruko veće (152,34 s). Stoga je lako zaključiti da je optimalnije primenjivati IEC normalno inverzne karakteristike. Rezultati proračuna podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita realizovanih sa IEC NI karakteristikama su dati u tabeli 4, a kasniji proračun optimalnih podešenja primenom MIHDE metode je rađen sa pretpostavkom da su sve vremenski zavisne karakteristike takođe IEC normalno inverzne. Provera uslova koordinacije parova rezervnih i glavnih zaštita podešenih na klasičan način je data u tabeli 5.

Neophodno je napomenuti da su prilikom podešavanja zaštita klasičnim pristupom fiksirana vremena reagovanja na bliske i udaljene kvarove (na 1,2 s i 1,5 s), kako bi se obezbedio CTI od 300 ms. Međutim, dopušteno je da vreme izolovanja bliskih kvarova bude i niže (ne manje od 600 ms), kao i da vreme reagovanja na udaljene kvarove bude više od 1,5 s. Stoga se može očekivati da se rešenje unapredi primenom MIHDE algoritma, jer na ovaj način određeno rešenje svakako nije optimalno po pitanju minimizacije sume vremena reagovanja zaštita na kvarove, niti po pitanju minimizacije maksimalnog vremena reagovanja na kvarove.

B. Proračun primenom MIHDE metode

Algoritam unapredene metode diferencijalne evolucije je realizovan u programskom paketu MATLAB. Primenom algoritma su određene optimalne vrednosti struje prorade i vremenskog multiplikatora IEC NI krive usmerenih zemljospojnih zaštita tako da su zadovoljeni svi prethodno definisani uslovi koji se tiču brzine, selektivnosti, koordinisanosti i osetljivosti rada usmerenih zemljospojnih zaštita. Optimalno rešenje se definiše kroz kriterijumsku funkciju, koja je u radu definisana na dva načina. U prvom slučaju cilj je da se minimizira suma vremena reagovanja usmerenih zemljospojnih zaštita za jednofazne kvarove sa zemljom preko otpora od 100Ω na kraju dalekovoda, dok je u drugom slučaju cilj da se minimizira maksimalno vreme reagovanja usmerenih zemljospojnih zaštita za jednofazne kvarove sa zemljom preko otpora od 100Ω na kraju dalekovoda.

U tabeli 6 su data podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita dobijena MIHDE metodom, za slučaj primene prve kriterijumske funkcije. Provera uslova koordinacije parova rezervnih i glavnih zaštita je data u tabeli 7. U tabeli 8 su data podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita istom metodom u slučaju da je primenjena druga kriterijumska funkcija, dok je u tabeli 9 data odgovarajuća provera koordinacije parova glavnih i rezervnih zaštita.

C. Poređenje rezultata dobijenih primenom dve različite metode

Na osnovu poređenja rezultata dobijenih primenom klasičnog proračuna podešenja (tabela 4) i rezultata dobijenih primenom

MIHDE metode sa dve različito definisane kriterijumske funkcije (tabele 6 i 8), dolazi se do sledećih zaključaka:

- 1) Ako se kao kriterijumska funkcija posmatra suma vremena reagovanja usmerenih zemljospojnih zaštita na jednofazne kvarove sa zemljom preko otpora od 100 Ω na kraju dalekovoda, zaključuje se da je rešenje koje je dobijeno primenom MIHDE metode značajno unapređeno. Vrednost kriterijumske funkcije je snižena za više od 15%, tačnije sa 71,2 s na 60,665 s. Takođe, maksimalno vreme reagovanja svih zaštita na udaljeni jednofazni kratak spoj preko 100 Ω , je sniženo sa 9,745 s na 8,397 s.
- 2) Ako se kao kriterijumska funkcija posmatra maksimalno vreme reagovanja usmerenih zemljospojnih zaštita na jednofazne kvarove sa zemljom preko otpora od 100 Ω na kraju dalekovoda, primenom MIHDE metode se značajno smanjuje maksimalno vreme reagovanja – sa 9,745 s na 6,936 s. Potrebno je napomenuti da suma svih vremena reagovanja na udaljene jednofazne zemljospojeve preko otpora od 100 Ω u tom slučaju iznosi 73,952 s, što je vrednost jako bliska vrednosti koja se dobija klasičnim putem. Stoga se zaključuje da je sigurno ispravnije podesiti usmerene zemljospojne zaštite na način koji se dobija primenom MIHDE metode.

Tabela 2. Vrednosti trostruke nulte komponente struje zemljospoja za pet karakterističnih kvarova na 400 kV dalekovodima

| Pozicija releja | Prenosni odnos ST | Blizak k1z | Blizak k2z | k1z na kraju voda | k2z na kraju voda | k1z+100 Ω na kraju voda |
|-----------------|-------------------|------------|------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|
| 1 | 800 | 3144,7 | 3152,3 | 1836 | 1909,7 | 449,5 |
| 2 | 800 | 7102,8 | 7388 | 3089,3 | 3096,8 | 1039,1 |
| 3 | 800 | 6068,5 | 6312,1 | 2570,1 | 2541,4 | 339 |
| 4 | 800 | 14550,5 | 14388,4 | 2897,4 | 3013,7 | 709,3 |
| 5 | 1600 | 12740,5 | 12598,6 | 4772,2 | 4617,2 | 645,3 |
| 6 | 1600 | 11922,3 | 11535,1 | 4390,2 | 4341,3 | 579,1 |
| 7 | 800 | 15219,6 | 15050,1 | 1768,1 | 1921,4 | 496,3 |
| 8 | 800 | 5950,6 | 6466,4 | 1902,6 | 1881,4 | 252,1 |
| 9 | 1600 | 14871,7 | 14706 | 2611,1 | 2534 | 503,9 |
| 11 | 1600 | 14569,4 | 14096,2 | 3070,9 | 2582,2 | 444,6 |
| 12 | 1600 | 14044,4 | 13588,3 | 3650,2 | 3178,1 | 545,1 |

Tabela 3. Definisani parovi glavnih i rezervnih zaštitnih uređaja u analiziranoj prenosnoj mreži

| Rezervni | 1 | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 |
|----------|---|---|---|---|---|----|----|---|---|---|---|---|---|
| Glavni | 3 | 5 | 7 | 9 | 2 | 11 | 12 | 4 | 7 | 9 | 4 | 5 | 9 |

Tabela 4. Podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita dobijena klasičnim putem, IEC NI

| Pozicija releja | TD | PU | t (blizak k1z) | t (blizak k2z) | t (k1z na kraju voda) | t (k2z kvar na kraju voda) | t (k1z+100 Ω na kraju voda) |
|-----------------|------|------|----------------|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 1 | 0,53 | 0,21 | 1,230 | 1,229 | 1,515 | 1,489 | 3,733 |
| 2 | 0,53 | 0,35 | 1,202 | 1,202 | 1,508 | 1,507 | 2,792 |
| 3 | 0,53 | 0,29 | 1,202 | 1,202 | 1,506 | 1,513 | 9,745 |
| 4 | 0,53 | 0,34 | 1,202 | 1,202 | 1,531 | 1,506 | 3,834 |
| 5 | 0,53 | 0,27 | 1,202 | 1,202 | 1,508 | 1,529 | 9,208 |
| 6 | 0,53 | 0,25 | 1,202 | 1,202 | 1,512 | 1,519 | 9,990 |
| 7 | 0,53 | 0,21 | 1,202 | 1,202 | 1,539 | 1,486 | 3,388 |
| 8 | 0,53 | 0,21 | 1,202 | 1,202 | 1,492 | 1,499 | 9,104 |
| 9 | 0,53 | 0,15 | 1,202 | 1,202 | 1,518 | 1,537 | 4,965 |
| 11 | 0,53 | 0,17 | 1,202 | 1,202 | 1,494 | 1,612 | 7,513 |
| 12 | 0,53 | 0,2 | 1,202 | 1,202 | 1,487 | 1,579 | 6,928 |
| | | | | | | fx | 71,200 |

Tabela 5. Provera koordinacije glavnih i rezervnih zaštita podešenih na klasičan način, IEC NI

| CTI | 1-3 | 3-5 | 3-7 | 3-9 | 4-2 | 5-11 | 5-12 | 6-4 | 6-7 | 6-9 | 8-4 | 8-5 | 8-9 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| k1z | 0,31 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,33 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,29 | 0,29 | 0,29 |
| k2z | 0,29 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,30 | 0,33 | 0,33 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |

Tabela 6. Podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita dobijena MIHDE metodom, kriterijum 1

| Pozicija releja | TD | PU | t (blizak k1z) | t (blizak k2z) | t (k1z na kraju voda) | t (k2z kvar na kraju voda) | t (k1z+100Ω na kraju voda) |
|-----------------|------|------|----------------|----------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 0,62 | 0,24 | 1,509 | 1,508 | 1,879 | 1,846 | 5,059 |
| 2 | 0,47 | 0,46 | 1,079 | 1,066 | 1,514 | 1,512 | 3,137 |
| 3 | 0,64 | 0,22 | 1,451 | 1,451 | 1,626 | 1,634 | 6,790 |
| 4 | 0,53 | 0,35 | 1,202 | 1,202 | 1,551 | 1,525 | 3,954 |
| 5 | 0,59 | 0,22 | 1,338 | 1,338 | 1,543 | 1,564 | 6,773 |
| 6 | 0,66 | 0,15 | 1,496 | 1,496 | 1,544 | 1,550 | 5,199 |
| 7 | 0,5 | 0,25 | 1,134 | 1,134 | 1,571 | 1,512 | 3,816 |
| 8 | 0,61 | 0,19 | 1,383 | 1,383 | 1,647 | 1,655 | 8,397 |
| 9 | 0,52 | 0,16 | 1,179 | 1,179 | 1,531 | 1,552 | 5,339 |
| 11 | 0,55 | 0,15 | 1,247 | 1,247 | 1,472 | 1,582 | 6,206 |
| 12 | 0,55 | 0,18 | 1,247 | 1,247 | 1,478 | 1,565 | 5,996 |
| | | | | | | fx | 60,665 |

Tabela 7. Provera koordinacije glavnih i rezervnih zaštita za rešenje dobijeno MIHDE metodom, kriterijum 1

| CTI | 1-3 | 3-5 | 3-7 | 3-9 | 4-2 | 5-11 | 5-12 | 6-4 | 6-7 | 6-9 | 8-4 | 8-5 | 8-9 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| k1z | 0,43 | 0,29 | 0,49 | 0,45 | 0,47 | 0,30 | 0,30 | 0,34 | 0,41 | 0,36 | 0,45 | 0,31 | 0,47 |
| k2z | 0,40 | 0,30 | 0,50 | 0,45 | 0,46 | 0,32 | 0,32 | 0,35 | 0,42 | 0,37 | 0,45 | 0,32 | 0,48 |

Tabela 8. Podešenja usmerenih zemljospojnih zaštita dobijena MIHDE metodom, kriterijum 2

| Pozicija releja | TD | PU | t (blizak k1z) | t (blizak k2z) | t (k1z na kraju voda) | t (k2z kvar na kraju voda) | t (k1z+100Ω na kraju voda) |
|-----------------|------|------|----------------|----------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 0,64 | 0,29 | 1,674 | 1,673 | 2,121 | 2,081 | 6,729 |
| 2 | 0,54 | 0,7 | 1,451 | 1,428 | 2,176 | 2,173 | 6,077 |
| 3 | 0,65 | 0,22 | 1,474 | 1,474 | 1,652 | 1,659 | 6,896 |
| 4 | 0,55 | 0,51 | 1,247 | 1,247 | 1,926 | 1,887 | 6,923 |
| 5 | 0,59 | 0,22 | 1,338 | 1,338 | 1,543 | 1,564 | 6,773 |
| 6 | 0,64 | 0,19 | 1,451 | 1,451 | 1,633 | 1,641 | 6,907 |
| 7 | 0,51 | 0,37 | 1,156 | 1,156 | 1,962 | 1,873 | 6,872 |
| 8 | 0,64 | 0,16 | 1,451 | 1,451 | 1,616 | 1,622 | 6,565 |
| 9 | 0,54 | 0,18 | 1,224 | 1,224 | 1,677 | 1,701 | 6,719 |
| 11 | 0,55 | 0,16 | 1,247 | 1,247 | 1,511 | 1,628 | 6,936 |
| 12 | 0,55 | 0,19 | 1,247 | 1,247 | 1,511 | 1,602 | 6,555 |
| | | | | | | fx | 6,936 |

Tabela 9. Provera koordinacije glavnih i rezervnih zaštita za rešenje dobijeno MIHDE metodom, kriterijum 2

| CTI | 1-3 | 3-5 | 3-7 | 3-9 | 4-2 | 5-11 | 5-12 | 6-4 | 6-7 | 6-9 | 8-4 | 8-5 | 8-9 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| k1z | 0,65 | 0,31 | 0,50 | 0,43 | 0,48 | 0,30 | 0,30 | 0,39 | 0,48 | 0,41 | 0,37 | 0,28 | 0,39 |
| k2z | 0,61 | 0,32 | 0,50 | 0,43 | 0,46 | 0,32 | 0,32 | 0,39 | 0,48 | 0,42 | 0,38 | 0,28 | 0,40 |

V ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen proračun podešavanja usmerenih zemljospojnih zaštita na delu 400 kV prenosne mreže, na osnovu dva pristupa. Prvi pristup je klasičan proračun podešavanja, dok je drugi pristup proračun podešavanja primenom unapredene metode diferencijalne evolucije. Na osnovu poređenja rezultata, zaključuje se da su podešenja dobijena primenom optimizacione metode svakako unapredena, međutim neophodno je naglasiti i da je klasični proračun neuporedivo jednostavniji u ovom slučaju i nema ograničenja po pitanju broja releja koji se razmatraju.

Prednost primene optimizacionih metoda bi svakako bila značajnija u delu mreže nižeg naponskog nivoa (110 kV i 220 kV), gde nije moguće na jednostavan način odrediti podešenja na klasičan način (dalekovodi su kraći, pa samim tim i odnos struja kvara na početku i na kraju dalekovoda je smanjen, što onemogućava jednostavnu primenu pomenutog pristupa). Takođe, bilo bi značajno ispitati primenu drugih optimizacionih metoda na istom problemu sa ciljem da se obuhvati efikasna optimizacija većeg broja nepoznatih parametara.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Urdaneta, A. J., Restrepo, H., Marquez, S., Sanchez, J. Coordination of

- directional overcurrent relay timing using linear programming, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp. 122-129, 1996.
- [2] Braga, A. S., Tome Saraiva, J. Coordination of overcurrent directional relays in meshed networks using the Simplex method, in Proc. *8th Mediterranean Electrotechnical Conference on Industrial Applications in Power Systems, Computer Science and Telecommunications (MELECON 96)*, Vol.3, pp. 1535-1538, 1996.
- [3] Noghabi, A. S., Sadeh, J., Mashhadi, H. R. Considering Different Network Topologies in Optimal Overcurrent Relay Coordination Using a Hybrid GA, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, pp. 1857-1863, 2009. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2029057>
- [4] Krstivojević, J., Šošić, D., Savić, A. Coordination of Directional Overcurrent Relays by Using Heuristic Optimization Method, in Proc. *10th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (Med Power 2016)*, pp. 1 - 8, Belgrade, Serbia, 2016. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.1104>
- [5] Storn, R., Price, K. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. Journal of Global Optimization, Vol 11, pp. 341–359, 1997.

AUTORI/AUTHORS

- msr Miljana Todorović** - master inženjer elektrotehnike i računarstva, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Saturn Electric d.o.o. Beograd, miljana.todorovic@saturnelectric-sr.com, ORCID [0000-0002-8821-4227](https://orcid.org/0000-0002-8821-4227)
- dr Aleksandar Savić** – vanredni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, savic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1176-0123](https://orcid.org/0000-0002-1176-0123)