

Optimizacija mjera za smanjenje broja ispada 110kV nadzemnog voda zbog pojave povratnih preskoka

Božo Đukanović

Sektor za razvoj i investicije
Crnogorski Elektroprenosni Sistem AD
Podgorica, Crna Gora
Bozo.Djukanovic@cges.me

Jovan Milović

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet Crne Gore
Podgorica, Crna Gora
jovan.milovic1@edu.ucg.ac.me

Vladan Durković

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet Crne Gore
Podgorica, Crna Gora
vladan.d@ucg.ac.me

Vladan Radulović

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet Crne Gore
Podgorica, Crna Gora
vladanra@ucg.ac.me

Sažetak—U radu su analizirane mjere koje dovode do smanjenja broja ispada 110 kV nadzemnog voda usljed povratnih preskoka. Tehnički efekti mjera dobijeni su sprovođenjem simulacija u programskom paketu EMTP-ATP. Pored toga, u radu su definisani i troškovi potrebni za primjenu mjera proračunati po dalekovodnom stubu. Koristeći dobijene zavisnosti između nivoa ispada voda i vrijednosti troškova implementacije mjera, izvršena je višekriterijumska optimizacija pomoću GUI aplikacije pripremljene u Python-u.

Index Terms—povratni preskok, EMTP-ATP, višekriterijumska optimizacija

I. UVOD

Povratni preskok predstavlja glavni uzrok ispada 110 kV nadzemnih vodova, u slučajevima kada se dalekovod prostire preko terena kojeg karakteriše visok specifični otpor zemljišta. Postoji niz mjera koje je moguće primjeniti u cilju snižavanja nivoa povratnih preskoka, od kojih su najefikasnije smanjenje otpora uzemljivača stubova i ugradnja linijskih odvodnika prenapona. Pored navedenih mjera u radu je analizirana i treća mjera, a to je povećavanje izolacionog nivoa dalekovoda. Za pobrojane mjere, analizirana je pojedinačna i istovremena primjena, i izvršen proračun godišnjeg broja ispada dalekovoda. Za analizirane mjere, izvršen je i proračun troškova primjene mjera po dalekovodnom stubu. Na osnovu dobijene tehnokonomске zavisnosti između nivoa ispada voda i vrijednosti troškova izvršena je višekriterijumska optimizacija.

U radu je detaljno razmotren postupak modelovanja atmosferskih pražnjenja, kao i povratni uticaj ovih procesa na elemente elektroenergetskog sistema. Poseban akcenat stavljen je na tehničke i ekonomske mjere koje se primjenjuju radi smanjenja broja ispada dalekovoda usljed povratnih preskoka. Budući da su tehnički i ekonomski interesi često međusobno suprotstavljeni, za optimizaciju navedenih mjera primijenjena je Pareto optimizacija. Ova višekriterijumska optimizaciona tehnika omogućava dobijanje skupa rješenja koja zadovoljavaju definisanu kriterijumsku funkciju, ali se međusobno razlikuju u pogledu ekonomskih i tehničkih parametara, čime se obezbjeđuje sveobuhvatna analiza kompromisa između performansi i troškova.

Preostali djelovi rada su organizovani na sljedeći način. Poglavlje II opisuje modelovanje atmosferskog pražnjenja i elemenata elektroenergetskog sistema, uključujući dalekovodne stubove, provodnike, izolaciju i uzemljivače. U Poglavlju III predstavljene su tehnički efekti primjene mjera, dok Poglavlje IV analizira ekonomske aspekte kroz definisanje troškova svake pojedinačne mjere. U Poglavlju V data je višekriterijumska optimizacija mjera zasnovana na Pareto pristupu i GUI aplikaciji razvijenoj u Python-u, dok su na kraju rada izloženi odgovarajući zaključci i spisak korišćene literature.

II. MODELOVANJE ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA I ELEMENATA ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

U svrhu definisanja efikasnosti mjera za smanjenje ispada dalekovoda usljed povratnih preskoka, potrebno je izvršiti modelovanje atmosferskog pražnjenja, i dijela posmatranog 110 kV dalekovoda. Koristeći pripremljeni model, izvršen je numerički proračun u programskom paketu EMTP-ATP, gdje su dobijene minimalne struje atmosferskog pražnjenja koje dovode do preskoka na izolaciji dalekovoda. Dobijene vrijednosti struje groma su korišćene za proračun godišnjeg broja ispada dalekovoda usljed povratnih preskoka (*Back Flashover Rate - BFR*) [1]:

$$BFR = 0,6 \cdot N_L \cdot P(I) \quad (1)$$

pri čemu korekcionni faktor 0,6 u izrazu (1) označava da je napon na izolaciji voda analiziran samo za slučajeve atmosferskog pražnjenja u vrh stuba, N_L predstavlja broj atmosferskih pražnjenja u nadzemni vod dužine 100 km tokom jednogodišnjeg perioda. Na osnovu geometrije stubova analiziranog dalekovoda i geografske pozicije prostiranja trase dalekovoda proračunata je vrijednost za N_L koja iznosi 68,41. $P(I)$ je vjerovatnoća pojave minimalne struje atmosferskog pražnjenja čija amplituda dovodi do pojave povratnog preskoka na stubu i računa se preko izraza:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (2)$$

prikazan je u [5]. Metoda površine u radu je realizovana je programskom paketu EMTP-ATP primjenom programskog jezika MODELS [7].

F. Modelovanje uzemljivača dalekovodnog stuba

Otpornost uzemljivača dalekovodnog stuba ima veliki uticaj na pojavu preskoka, zbog čega se prilikom modelovanja posvećuje posebna pažnja odabiru odgovarajućeg modela koji će biti primjenjen u simulacijama. Prilikom proticanja struje atmosferskog pražnjenja usljed različitih nelinearnih efekata, koji se pojavljuju na uzemljivaču, dolazi do promjene otpora uzemljenja u odnosu na vrijednost izmjerenu pri injektiranju struje industrijske frekvencije, odnosno dolazi do pojave jonizacije okolnog zemljišta. Otpornost u slučaju pojave efekta jonizacije se računa pomoću izraza (9) [8]:

$$R_{vj} = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{I}{I_g}\right)}} \quad (9)$$

gdje je:

- R_0 - vrijednost rasprostiranja uzemljivača pri maloj struji i industrijskoj frekvenciji
- I - struja groma kroz uzemljivač
- I_g - granična struja za nastanak jonizacije u tlu

Struja I_g se određuje pomoću sljedećeg izraza:

$$I_g = \frac{\rho E_0}{2\pi R_0^2} \quad (10)$$

gdje je:

- ρ - specifična otpornost tla
- E_0 - gradijent jonizacije tla, gdje se za preporučenu vrijednost uzima vrijednost od $400kV/m$

G. Modelovanje odvodnika prenapona

Odvodnik prenapona predstavlja nelinearni otpornik, koji ima veliku otpornost pri radnom naponu dok mu se otpornost naglo smanjuje prilikom pojave prenapona. U radu model odvodnika prenapona biće predstavljen kao nelinearna otpornost koja je definisana preko naponsko-strujne (U-I) karakteristike odabranog odvodnika dobijene iz kataloga proizvođača odvodnika prenapona. Dobijeni skup tačaka sa U-I karakteristike se unosi u model nelinearne otpornosti *MOV Type 92*, koji postoji u programskom alatu EMTP-ATP.

III. REZULTATI PRORAČUNA NIVOVA POVRATNIH PRESKOKA

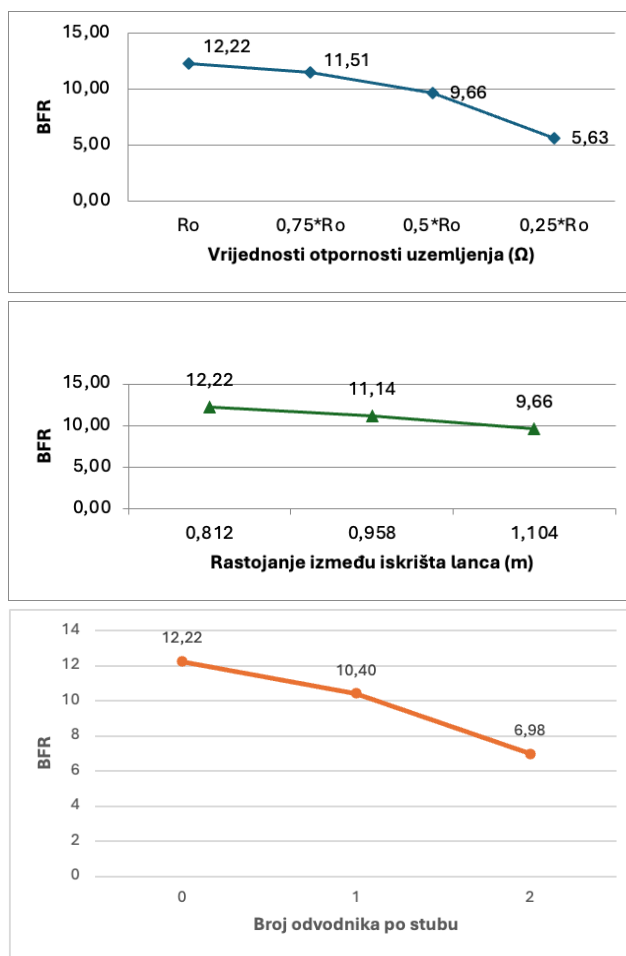
Osnovni parametri analizirane sekcije 110 kV dalekovoda koja se sastoji od 5 stubova i 6 raspona kao i dimenzije stuba korišćenog u simulacijama prikazani su u Tabeli I i Slici 1.

Dobijeni rezultati proračuna za analizirani 110 kV vod prikazani su na Slikama 2 i 3. Prvo su prikazani rezultati za slučaj pojedinačne primjene mjera (Slika 2), nakon toga su prikazani efekti istovremene primjene sve 3 mjere (Slika 3).

Analizom dobijenih rezultata za pojedinačnu primjenu mjera, najveće smanjenje broja ispada dalekovoda postiže se snižavanjem vrijednosti otpornosti uzemljivača stubova. Za vrijednost otpora uzemljivača od 30Ω (75% smanjenje) broj

Tabela I: Parametri analizirane sekcije 110 kV dalekovoda

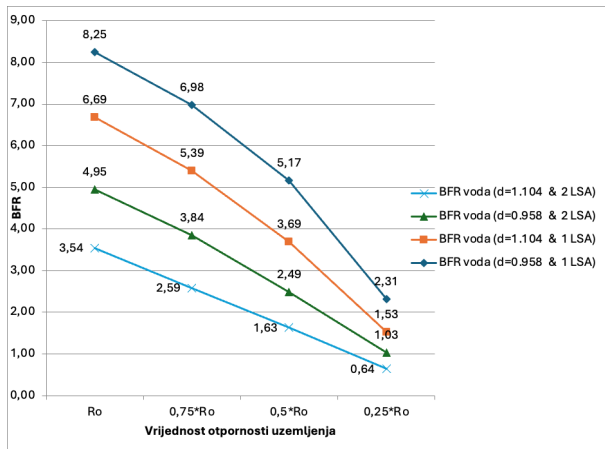
Otpornost uzemljivača stubova R_0 [Ω]	120
Preskočno rastojanje [m]	0,812
Karakteristike izabranog odvodnika prenapona	Cink oksidni (ZnO) odvodnik prenapona bez iskrišta Preostali napon odvodnika 254 kV pri nominalnoj struji pražnjenja 10 kA Naznačeni napon odvodnika U_r 108 kV Energetska sposobnost od 8 kJ/kVUr



Slika 2: Vrijednosti BFR-a za slučaj primjene pojedinačnih mjera

ispada zbog povratnih preskoka iznosi 5,63 ispada godišnje, što iznosi 53,9% manje u odnosu na nulto stanje. Ugradnjom dva odvodnika prenapona po stubu postiže se smanjenje broja ispada od 5,24 ispada godišnje (42,9% smanjenje). Najmanji efekat na smanjenje broja povratnih preskoka na stubu postiže se povećanjem preskočnog rastojanja na vrijednost od 1,104 metara. Iako je najmanje smanjenje posmatrajući pojedinačnu primjenu mjera, ono je značajno i iznosi 2,56 ispada godišnje.

Kombinovanjem prethodnih mjera dobijaju se bolji rezultati, ali najbolji su pri kombinovanju sve 3 mjere, što je i očekivano



Slika 3: Vrijednosti BFR-a za scenario primijenjenih svih mjera

(Slika 3). Najpovoljniji slučaj prilikom istovremene primjene tri mjere, predstavlja ugradnja dva odvodnika prenapona na stubu, snižavanje vrijednost otpora uzemljivača stubova na 25% početne vrijednosti kao i odabir izolacionog rastojanje od 1,104 m. Na taj način dobija se vrijednost broja ispada dalekovoda usljed povratnih preskoka od 0,64 ispada godišnje, što je smanjenje od 94,7% od u odnosu na početno stanje prije primjene bilo kakvih mjera.

IV. TROŠKOVI PRIMJENE MJERA ZA SMANJENJA BROJA POVRATNIH PRESKOKA

Prilikom donošenja odluke o primjeni mjera (pojedinačna ili kombinovana) pored tehničkog parametra (nivo povratnih preskoka), neophodno je odrediti i ekonomski efekat odnosno trošak primjene. U ovom poglavlju će biti izračunato koliki je trošak primjene mjera proračunat po stubnom mjestu.

A. Troškovi smanjivanja otpora uzemljivača stuba

Smanjivanje vrijednosti otpora uzemljivača stuba postiže se povećavanjem dimenzija uzemljivača i/ili postavljanje vertikalnih uzemljivačkih sondi. Ako to nije dovoljno, u kritičnim slučajevima dodaje se prirodna provodna smjesa – bentonit. Pošto je u radu razmatran postojeći 110 kV dalekovod, sa već ugrađenim osnovnim uzemljivačem, potrebno je opisati moguće dodatne mjere kojim se može smanjivati otpornost uzemljivača stuba, a nakon toga i izračunati koliko iznosi trošak primjene mjere.

Pošto specifična otpornost zemljišta u kojem se nalaze uzemljivači dalekovodnih stubova nije poznat podatak, potrebno je određivanje njihove vrijednosti koristeći poznate vrijednosti otpornosti uzemljivača stubova kao i dimenzije osnovnog uzemljivača stuba. Uzemljivač stubova na posmatranoj sekciji dalekovoda, realizovan je kao uzemljivač tipa I (prstenasto oko svake stope), koji se sastoji od donjeg prstena oko svakog temelja na nivou temeljne stope, i gornjih međusobno povezanih prstenova oko svakog temelja na dubini od 0.6 m od površine zemlje.

Prelazni otpor osnovnog uzemljivača (dva prstena oko temelja svake noge stuba) izračunava se kao otpor ekvivalentne sonde [8] preko izraza:

$$R_S = \frac{\rho}{2\pi L_e} \cdot \ln \frac{4L_e}{d_e} (\Omega) \quad (11)$$

gdje je ρ specifični električni otpor tla na stubnom mestu, L_e je ekvivalentna dužina sonde, a d_e je ekvivalentna dubina sonde. Oba parametra su proračunata na osnovu geometrije uzemljivača stuba pri čemu su dobijene vrijednosti $L_e = 1,2$ m, $d_e = 0,11$ m.

Na osnovu geometrije uzemljivača određen je ukupni otpor osnovnog uzemljivača stuba, koji se može računati kao 4 paralelna otpora po izrazu:

$$\frac{1}{R_O} = 4 \cdot \frac{1}{R_S} = \frac{4}{0,503 \cdot \rho} \rightarrow R_O = 0,126 \cdot \rho (\Omega) \quad (12)$$

Koristeći izraz (12) kao i na osnovu poznate vrijednosti otpornosti uzemljivača stuba koja iznosi 120Ω dobija se da je specifični otpor zemljišta na lokaciji stubnog mjesta iznosi $952,38 \Omega m$.

Da bi postigli smanjenja otpora uzemljivača, moguće je koristiti pocinkovani trakasti uzemljivač (žice prečnika $\phi 10$) dužine L horizontalno položen u zemlju, čija se otpornost računa prema izrazu:

$$R_T = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{2L}{d} = \frac{\rho}{\pi \cdot L} \ln \frac{2 \cdot L}{10 \cdot 10^{-3}} \quad (13)$$

Pošto je traka u paralelnoj vezi sa osnovnim uzemljivačem stuba, ukupni otpor stuba iznosi:

$$\frac{1}{R_{O+T}} = \frac{1}{R_O} + \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,126 \cdot \rho} + \frac{1}{R_T} \quad (14)$$

U slučajevima kada nije dovoljno postavljanje i povezivanje jednog trakastog uzemljivača na prstenasto uzemljenje jedne stope stuba, potrebna je ugradnja više njih (maksimalno 4) dok se ne snizi vrijednost uzemljivača na željeni nivo. Za slučaj upotrebe više trakastih uzemljivača, prethodni izraz (14) se može napisati u sledećem obliku:

$$\frac{1}{R_{STUBA}} = \frac{1}{0,126 \cdot \rho} + \frac{n}{R_T} \quad (15)$$

gdje je n broj ugrađenih traka dužine L povezanih na prstenasto uzemljenje stuba.

Koristeći izraz (15) proračunate su dužine uzemljivačkih traka koje je neophodno nabaviti kako bi se izvelo smanjenje otpora uzemljivača stuba u koracima od 30Ω . Na osnovu prikupljenih podataka, za cijenu nabavke materijala i izvođenja radova definisana je vrijednost od 100 EUR po metru ugrađene trake. U Tabeli II je prikazan broj i količina uzemljivačke trake potrebne za postizanje vrijednosti otpora uzemljivača stuba razmatranih u Poglavlju III, kao i trošak ugradnje.

Važno je istaći da rezultate prikazane u Tabeli II moguće je dobiti primjenom na terenu samo u slučaju ako se trake postavljaju u zemljište čija je specifična otpornost $952,38 \Omega m$.

Tabela II: Trošak smanjenja vrijednosti otpornosti uzemljivača

Broj traka n	Dužina trake L (m)	Dobijeni otpor uzemljivača (Ω)	Trošak nabavke i ugradnje (EUR)
1	6	90	600
2	9,5	60	1900
4	15	30	6000

Prije same primjene mjera za smanjenje otpora uzemljivača stubova, neophodno je izvršiti mjerenja specifične električne otpornosti tla na stubovima od interesa u cilju provjere izvodljivosti primjene.

B. Troškovi povećanja izolacionog nivoa dalekovoda

U radu je analiziran postojeći vod, pa je povećanje izolacionog nivoa dalekovoda razmatrano ugradnjom električno pojačane izolacije voda koja se postiže dodavanjem jednog ili više izolatorskih članaka po vodu. Konkretno, razmatrano je povećanje broja izolatorskih članaka za jedan i dva komada. Osnovna izolacija analiziranog voda ima 7 kapastih staklenih izolatorskih članaka tipa U 120B, pri čemu izolaciono rastojanje između iskrišta izolatorskog lanca iznosi 0,812 m. Jedinična cijena nabavke kapastog staklenog izolatorskog članka tipa U 120B iznosi 30 EUR. Pošto je razmatrana električno pojačana izolacija koja ima 8 i 9 izolatorskih članaka, trošak za nabavku izolacije za jednu fazu sistema iznosi 30 EUR i 60 EUR, respektivno. Trošak montaže jednog ili dva izolatorskog članka po fazi sistema, procjenjen je na iznos od 200 EUR. Ukupan trošak implementacije poboljšane izolacije po dalekovodnom stubu, zavisi od toga na koliko faza se analizira ugradnja električno pojačane izolacije kao i od izabranog broja izolatorskih članaka.

C. Troškovi ugradnje odvodnika prenapona

Troškovi ugradnje odvodnika prenapona sastoje se od troškova nabavke odvodnika sa pratećom opremom kao i od troškova prevoza i montaže na odgovarajućem stubu. Cijena nabavke odvodnika prenapona koji je analiziran u proračunima u Poglavlju III, iznosi 2400 EUR po komadu i uključuje sam odvodnik, brojač prorada, rastavljač, zemljovodno uže kao i kleme sa pratećom opremom potrebne za povezivanja odvodnika na fazni provodnik. Trošak prevoza i ugradnje odvodnika prenapona sa pratećom opremom na dalekovodnom stubu po komadu procjenjen je na iznos 100 EUR po komadu. Na osnovu prethodnog, dobija se ukupna cijena ugradnje jednog odvodnika prenapona na stubu, koja iznosi 2500 EUR. Prilikom ugradnje jednog linijskog odvodnika prenapona na stubu, instalacija se vrši na najnižoj (najizloženoj) fazi dalekovoda. U slučaju ugradnje dva odvodnika prenapona, odvodnici se postavljaju na najnižoj i srednjoj fazi.

V. OPTIMIZACIJA MJERA ZA SMANJENJE BROJA ISPADA DALEKOVODA USLJED POVRATNIH PRESKOKA

Optimizacija je ključni proces u mnogim poslovnim, menadžerskim i inženjerskim primjenama. U tim oblastima često postoji više ciljeva koje treba zadovoljiti, a koji su međusobno u sukobu. Tradicionalno, rješavanje takvih problema

podrazumijevalo je pretvaranje svih ciljeva u jednu jedinstvenu funkciju cilja (SO – Single Objective). Krajnji cilj je pronaći rješenje koje minimizuje ili maksimizuje taj jedinstveni cilj, uz očuvanje fizičkih ograničenja sistema ili procesa. Umijeće u ovom procesu leži u pravilnom formulisanju funkcije kako bi se postigao željeni kompromis [9]. Najčešće SO nije najbolji način optimizacije, jer ako se jedna od objektivnih funkcija ograniči, donosioci odluka neće imati uvid u kompromis koji postoji između različitih rješenja. Zbog toga, često je bolja opcija višekriterijumska optimizacija (MO - Multi Objective Optimisation), koja se definiše na sljedeći način:

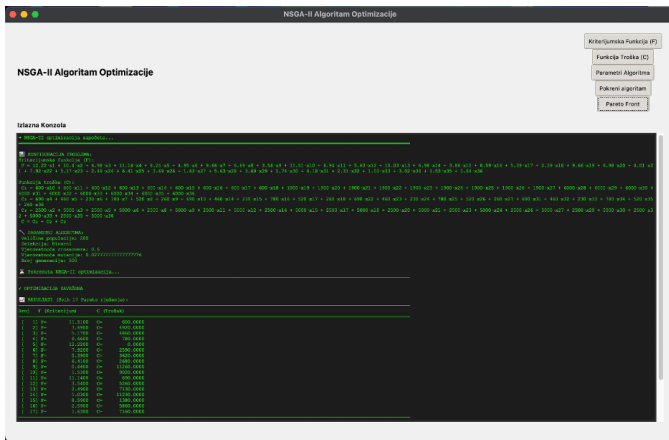
$$\min \vec{y} = \vec{F}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_N(\vec{x})]^T, \\ \text{uz ograničenje } g_j(\vec{x}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (16) \\ \vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_p]^T \in \Omega$$

y je objektivni vektor, g su ograničenja, a x P dimenzioni vektor, koji predstavlja upravljačke promjenljive unutar prostora. U slučaju da je vrijednost $N = 1$, problem MO postaje SO, i tada bi imali jedno rješenje, ili globalni optimum. Međutim, kada je $N > 1$, to jest kada optimizujemo set funkcija, onda najčešće globalni optimum ne postoji, jer su kriterijumske funkcije u konfliktu. Umjesto toga postoji neprebrojiv skup rješenja, takozvanih nedominiranih rješenja, za koje se neki cilj ne može poboljšati, a da se pritom ne pogorša barem još jedan, koji predstavljaju različite kompromise ili razmjene između ciljeva. Jedan od pristupa rješavanja problema višekriterijumske optimizacije jeste Pareto baziran pristup.

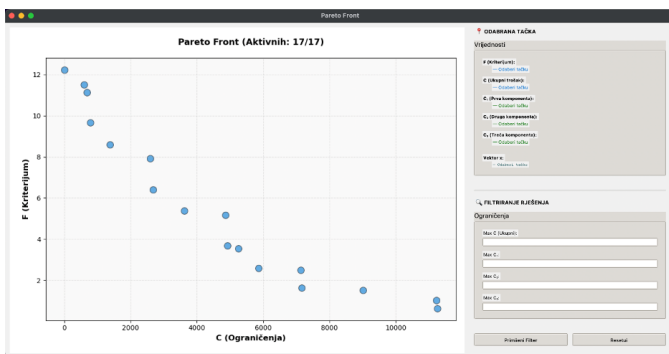
Evolucionni algoritmi eksplicitno koriste Pareto-rangiranje da bi odredili vjerovatnoću replikacije pojedinačnih jedinki. Osnovna ideja je da se u populaciji pronađe skup nedominiranih jedinki. Njima se dodjeljuje najviši rang i one se uklanjaju iz daljeg razmatranja. Postupak se zatim ponavlja sa preostalim jedinkama dok cijela populacija ne bude rangirana i dok svaka ne dobije fitness funkciju. Nakon toga formira se set Pareto optimalnih rješenja, koji se naziva Pareto Front. [10]

U Poglavlju III i IV predstavljeni su tehnički i ekonomski efekti primjene mjera, na osnovu kojih je potrebno izvršiti optimizaciju. Potrebno je smanjiti broj ispada dalekovoda uz istovremeno minimizovanje troškova za primjenu mjere i/ili mjera. Međutim navedene zavisnosti su u suprotnosti, smanjenjem broja ispada uvećavaju se troškovi primjene mjera, i obrnuto. Samim tim optimizacija mjera predstavlja višekriterijumski optimizacioni problem. Potrebno je minimizovati funkciju ispada voda označenu sa F , uz istovremeno smanjenje funkcija troškova koje su definisane na sledeći način: C_1 - trošak primjene mjere za popravku uzemljenja, C_2 - trošak primjene mjere za poboljšanje izolacionog nivoa voda i C_3 - trošak primjene mjere za ugradnju linijskih odvodnika prenapona. U cilju pojednostavljenja postupka optimizacije, funkcije troškova su objedinjene u jednu funkciju $C = C_1 + C_2 + C_3$.

Za potrebe rada, napravljen je kod u Python-u, koji formira Pareto Front, to jest prikazuje dobijena rješenja MO. Napravljen je GUI aplikacija, prikazana na Slici 4, čiji je cilj da pruži na uvid donosiocu odluka set optimalnih rješenja, koji bi on kasnije koristio da odluči njemu najbolje rješenje.



Slika 4: Pregled GUI aplikacije



Slika 5: Pareto front MO za predložene funkcije F i C

Aplikacija je interaktivna i daje korisniku slobodu da unosi ulazne podatke. Pod ulaznim podacima se smatra kriterijumska funkcija F i funkcija troška C , koje su u prethodnom poglavlju pomenute, kao i parametri algoritma.

Kod je razvijen u skladu sa [11], gdje je implementiran *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) u Python-u. Funkcije F i C se definišu u prozorima, koji su dostupni klikom na dugme “Kriterijumska Funkcija (F)” i “Funkcija Troška (C)”, respektivno. Moguće je i drugačije definisati funkcije, mijenjajući broj promjenljivih. Klikom na “Pareto Front”, otvoriće se prikaz Pareto Front-a, sa dodatnom mogućnošću filtriranja rješenja, kao što je to prikazano na Slici 5. Na konkretnoj slici dat je prikaz Pareto Front-a za slučaj optimizacije funkcija F i C koje su definisane u ranijem poglavlju.

Klikom na neko od dobijenih Pareto rješenja, dobija se podatak o pojedinačnim vrijednostima funkcija F , C_1 , C_2 , C_3 , samim tim korisnik je upoznat sa preporučenim mjerama za smanjenje broja ispada dalekovoda. Filtriranje podataka je dato na slobodu korisniku, sa ciljem da ukoliko postoji neko ograničenje funkcija troška (C_1 , C_2 ili C_3), da se određena rješenja izbace. Na primjer, u praksi za stub koji je izgrađen na stijeni, uzemljivačke trake se vrlo teško mogu polagati u tlo, ti radovi su veoma skupi i mala je efikasnost tih dodatnih traka, tako da primjena te mjere nije tehnički opravdana, i tu

filtriranje dobijenih rezultata ima smisla.

VI. ZAKLJUČAK

Analiza sprovedenih mjera za smanjenje ispada 110kV nadzemnih vodova pokazuje da kombinovana primjena smanjenja otpora uzemljivača, ugradnje linijskih odvodnika prenapona i povećanja izolacionog nivoa može redukovati nivo povratnih prekoka i do 94,7% u odnosu na početno stanje. Korišćenjem višekriterijumske optimizacije i Pareto Front-a, donosioci odluka mogu izabrati optimalno rješenje koje balansira između željenog nivoa smanjenja ispada i ekonomske opravdanosti implementacije.

LITERATURA

- [1] Guide To Procedures For Estimating The Lightning Performance Of Transmission Lines. Cigre Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination), 1991
- [2] Canadian-American EMTP User Group, ATP Rule Book (distributed by the European EMTP-ATP Users Group Association), 2011.
- [3] Some aspects of overhead transmission lines lightning performance estimation in engineering practice”, Mladen S. Banjanin, Milan S. Savić Int. Trans. Electr. Energ. Syst. (2015)
- [4] International Standard IEC 62305-1:2010, Protection against lightning - Part 1: General principles
- [5] M. S. Banjanin, M. S. Savić, J. Tuševljak, “Modelovanje atmosferskih prenapona na nadzemnim vodovima”, ETRAN 2014, str. EE1.5. 1-6, Vrnjačka Banja, jun 2014. godine
- [6] International Standard IEC 60071-4: 2004 Insulation co-ordination —Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks
- [7] MODELS in ATP, language manual, L. Dubé, February 1996.
- [8] Modeling of Transmission Line and Substation for Insulation Coordination Studies TRAINING DUBROVNIK, CROATIA - APRIL, 27 - 29 2009 - Prof. Ivo Uglesic - University of Zagreb, Croatia
- [9] P. Ngatchou, A. Zarei and A. El-Sharkawi, "Pareto Multi Objective Optimization," Proceedings of the 13th International Conference on, Intelligent Systems Application to Power Systems, Arlington, VA, USA, 2005, pp. 84-91, doi: 10.1109/ISAP.2005.1599245.
- [10] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002, doi: 10.1109/4235.996017.
- [11] J. Blank and K. Deb, pymoo: Multi-Objective Optimization in Python, in IEEE Access, vol. 8, pp. 89497-89509, 2020, doi: 10.1109/AC-CESS.2020.2990567