Optimizacija dimenzija kablovske posteljice i trajno dozvoljene struje kablova u trougaonoj formaciji korišćenjem gravitacionog pretraživačkog algoritma

BOJAN D. PEROVI, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica

DARDAN O. KLIMENTA, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica

JORDAN N. RADOSAVLJEVIĆ, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica

MIRO LJUB D. JEVTIĆ, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica

Stručni rad

UDC: 621.315.21

DOI: 10.5937/tehnika1603431P

U ovom radu je razmatran problem određivanja optimalnih vrednosti za dimenzije kablovskog voda i kablovske posteljice, rastojanja između energetskih kablova u trougaonoj formaciji i trajno dozvoljene struje kablova. Ovaj nelinearni višeciljni optimizacioni problem sa ograničenjima je rešen primenom gravitacionog pretraživačkog algoritma (GPA). Primijenjena tehnika je omogućila istovremeno uključivanje svih upravljačkih promenljivih u proces optimizacije i obezbedila dobijanje optimalnog rešenja u skladu sa definisanim kriterijumom optimizacije. U datom slučaju, optimalno rešenje je dobijeno na osnovu sledećih kriterijuma optimizacije: (i) minimizacija ukupnih troškova instalacije kablovskog voda, (ii) maksimizacija struje kablova i (iii) istovremena minimizacija ukupnih troškova instalacije kablovskog voda i maksimizacija struje kabla. Ograničenja zavisnih promenljivih su uključena preko penalizacionih faktora pomoću kojih se proširuje funkcija cilja. Pretpostavljeno je da trajno dozvoljena struja kablova odgovara faktoru opterećenja $m=0.8$. Postupak je sproveden uz uvažavanje efekta isušivanja okolnog zemljišta.

Ključne reči: gravitacioni pretraživački algoritam (GPA), kablovska posteljica, optimizacija, trajno dozvoljena struja, troškovi instalacije

1. UVOD

Polaganjem kablova u kablovsku posteljicu čija je specifična toplotna otpornost niža od specifične toplotne otpornosti okolnog zemljišta postiže se bolje odvođenje toplote generisane u kablovima. Ovo vodi sniženju temperature elemenata konstrukcije kablova i značajnom povišenju njihove trajno dozvoljene struje [1, 2]. Utvrđeno je da i mala količina materijala kablovske posteljice može doprineti povećanju struje kablova [3-7]. To znači da trajno dozvoljena struja kablova direktno zavisi od zapremine kablovske posteljice [4,8] što svakako zahteva veće ukupne troškove instalacije jednog kablovskog voda. Osim toga, u gradskim sredinama se ograničava prostor za izgradnju kablov-

skih vodova [8] što vodi uslovljenom smanjenju rastojanja između kablova i dalje smanjenju njihove trajno dozvoljene struje. Prema tome, postoji veći broj parametara koji direktno ili indirektno utiču na trajno dozvoljenu struju kablova i ukupne troškove instalacije kablovskog voda i čije se vrednosti mogu optimizirati.

Problem optimizacije podzemnih kablovskih vodova nije nov. U [9] je razmatrana minimizacija ukupnih troškova instalacije jednog kablovskog voda za zadatu donju granicu opterećenja kablova. Postupak optimizacije je sproveden korišćenjem metode nelinearnog programiranja. Razmatran je samo jedan kabl u posteljici. Kasnije je isti autor, koristeći se istom optimizacionom metodom, generalizovao dati problem optimizacije na primeru sa većim brojem kablova i drugim funkcijama cilja [3]. Prilikom uopštavanja problema uticaj isušivanja okolnog zemljišta nije uzet u obzir, a proces optimizacije je sproveden za faktor opterećenja $m=1$. U [8] je razmatrana optimizacija dimenzija kablovske posteljice za dvostruki kablovski

Adresa autora: Bojan Perović, Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Kneza Miloša 7

Rad primljen: 22.02.2016.

Rad prihvaćen: 24.04.2016.

vod primenom metode kona nih elemenata, pri emu nisu uzeti u obzir ekonomski faktori. U [4] je, tako e primenom metode kona nih elemenata, analiziran uticaj dimenzija i oblika kablovske posteljice na trajno dozvoljenu struju kablova. Optimizacija razmeštaja kablova u ravanskoj formaciji primenom numeri kih metoda uz zanemarenje uticaja kablovske posteljice razmatrana je u [10].

U ovom radu je GPA [11] iskoriš en za rešavanje problema optimizacije dimenzija kablovskog rova i kablovske posteljice, kao i rastojanja izme u kablova. GPA se pokazao kao veoma efikasan alat za rešavanje razli itih optimizacionih problema u elektroenergetici [12-14], a detaljno je opisan u [14]. Primena GPA omogu ila je odre ivanje optimalnih rešenja za razli ite tipove funkcija cilja sa uvažavanjem svih tehnokonskih ograni enja svojstvenih podzemnim kablovskim vodovima. Analizirani su 35 kV-ni kablovi i to za tri slede e funkcije cilja: (i) minimizacija ukupnih troškova instalacije kablovskog voda za unapred definisanu ja inu trajno dozvoljene struje koja se uspostavlja u provodnicima, (ii) maksimizacija struje kabla za unapred definisane troškove instalacije kablovskog voda i (iii) istovremena minimizacija ukupnih troškova instalacije kablovskog voda i maksimizacija struje kabla. Predloženi postupak optimizacije mogao bi da uklju i i druge promenljive koje su u vezi sa mogu im razmeštajem kablova u posteljici.

2. FORMULACIJA PROBLEMA

U inženjerskoj praksi, energetski kablovi se naješ e polazu na dva na ina: u trougaonoj ili ravanskoj formaciji. Izbor formacije zavisi od nekoliko faktora kao što su na in uzemljenja elektri nih zaštita, površina popre nog preseka provodnika i raspoloživi prostor za polaganje kablova. Na slici 1 prikazan je popre ni presek standardnog podzemnog kablovskog voda koji e se koristiti za formulaciju problema i ilustraciju postupka optimizacije. Na slici su nazna ene odgovaraju e veli ine. Naravno, razmatranja koja važe za konkretnu konfiguraciju sa slike su opšteg karaktera i mogu se primeniti i na druge tipove i konfiguracije kablova.

Slika 1 - Standardni podzemni kablovski vod

2.1. Funkcija cilja, zavisne i upravlja ke promenljive

U problemima optimizacije neophodno je definisati funkciju cilja koju algoritam minimizira ili maksimizira, kroz optimalno podešavanje upravlja kih promenljivih iz oblasti definisanosti i istovremeno zadovoljavanje ograni enja tipa jednakosti i nejednakosti.

Ovaj matemati ki princip se iskazuje na slede i na in [15]:

$$\min F(x, u) \quad (1)$$

pri ograni enjima

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

$$u \in U \quad (3)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (4)$$

gde je:

$F(x, u)$ – funkcija cilja,

$g(x, u)$ – vektor sa ograni enjima tipa jednakosti ,

$h(x, u)$ – vektor sa ograni enjima tipa nejednakosti

x – vektor zavisnih promenljivih,

u – vektor upravlja kih promenljivih,

U – vektor grani nih vrednosti upravlja kih promenljivih.

Vektor upravlja kih promenljivih u ima slede i oblik:

$$u = [W \ D \ B \ S]^T \quad (5)$$

gde je: W – širina posteljice, D – visina posteljice, B – dubina centra posteljice i S – me uosno rastojanje izme u kablova. Sve veli ine su u izražene u metrima.

Sa promenom vrednosti svake od prethodno definisanih promenljivih menjaju se ukupni troškovi instalacije kablovskog voda C i trajno dozvoljena struja kablova I , na osnovu ega se vektor zavisno promenljivih može definisati kao:

$$x = [C \ I]^T \quad (6)$$

Zavisno promenljive ujedno predstavljaju i ciljne funkcije. Funkcija C obuhvata uklanjanje asfaltnih površina, iskop i odlaganje zemlje, cenu kablovske posteljice, instalaciju posteljice i presvla enje rova afatom i ima slede i oblik [3]:

$$C = 31.3 \cdot (W + 0.6) + 47 \cdot W \cdot B + 47 \cdot W \cdot D \quad (7)$$

Ovi troškovi su izraženi u \$/m. Struja I je složena funkcija upravlja kih promenljivih i ra una se prema Neher-McGrath-ovom izrazu za odre ivanje trajno dozvoljene struje kablovskog voda za slu aj kada se

ima isušivanje zemljišta oko kablova i kada je faktor opterećenja m [2]; gde se podrazumeva da je I u A.

U tabeli 1 su date granice izmeću kojih se mogu naći i vrednosti upravljačkih promenljivih. Gornje granice su identične onima iz [5] i izabrane su proizvoljno, a donje granice su uslovljene parametrima kabla i sledećim standardnim uslovima za polaganje kablova: dubinom polaganja koja za 35 kV-ne kablove iznosi $L=1$ m, minimalnim međuosnim rastojanjem koje je jednako prečniku kabla, rastojanjem izmeću osa kablova i njima najbližih bočnih stranica rova koje ne može da bude manje od 0.15 m [16], debljinom posteljice ispod kablova koja ne može da bude manja od 0.075 m i debljinom posteljice iznad kablova koja ne može da bude manja od 0.17 m [16].

Tabela 1. Granice upravljačkih promenljivih

Upravljačka promenljiva	Donja granica (m)	Gornja granica (m)
B	0.5534	3.5
W	0.34026	5
D	0.32	5
S	0.04026	2

U ovom radu su razmatrane tri različite funkcije cilja F :

Slučaj 1. Minimizacija ukupnih troškova instalacije kablovskog voda

$$F_1 = C(D, W, B) \quad (8)$$

za unapred definisanu trajno dozvoljenu struju koja se uspostavlja u provodnicima

$$I^{\min} \geq I(D, W, B, L, S, \dots, s_s(\dots, s_{dry})) \quad (9)$$

i druga ograničenja tipa nejednakosti, koja se u radu detaljnije razmatrati.

Slučaj 2. Maksimizacija struje kabla

$$F_2 = -I(D, W, B, L, S, \dots, s_s(\dots, s_{dry})) \quad (10)$$

za unapred definisane troškove instalacije kablovskog voda

$$C^{\max} \leq C(D, W, B) \quad (11)$$

i druga ograničenja tipa nejednakosti. Ovde treba napomenuti da je maksimizacija I ekvivalentna minimizaciji F_2 .

Slučaj 3. Istovremena minimizacija ukupnih troškova instalacije kablovskog voda i maksimizacija struje kabla

$$F_3 = w_C \cdot F_1 + w_I \cdot F_2 \quad (12)$$

gde su w_C i w_I odgovarajuć i težinski faktori za funkcije ukupnih troškova instalacije kablovskog voda i struje

kabla, respektivno [17]. Ovde se traži minimum funkcije F_3 .

2.2. Ograničenja tipa jednakosti i nejednakosti

Imajući u vidu prethodno date minimalne vrednosti za udaljenosti kablova od graničnih površina kablovske posteljice i međuosna rastojanja kablova, ograničenja tipa nejednakosti (4) se definišu na sledeći način:

$$W \geq 2 \cdot 0.15 + S \quad (13)$$

$$y \leq 3 \cdot x \quad (14)$$

gde je

$$x = \min(W, D) \quad (15)$$

$$y = \max(W, D) \quad (16)$$

$$B < r_b \quad (17)$$

a r_b je ekvivalentni poluprečnik posteljice pravougaonog preseka [1, 2] za koju bi trebalo zadovoljiti:

$$L - 0.17 - d/2 + D/2 > B \quad (18)$$

$$B > L + \sqrt{3} \cdot S/2 + 0.075 + d/2 - D/2$$

$$B \geq D/2 \quad (19)$$

$$S \geq d \quad (20)$$

Vertikalni raspored kablova u posteljici takođe se može obuhvatiti preko ograničenja tipa jednakosti (2). Tada važi $B-L=0$ [3,5], što se u ovom radu nije moglo primeniti.

2.3. Proširena funkcija cilja

Ograničenja definisana izrazima (9) i (11), kao i druga ograničenja tipa nejednakosti (4) uzimaju se u obzir preko penalizacionih faktora pomoću kojih se proširuje funkcija cilja.

Shodno tome, proširena funkcija cilja koja se minimizira postaje:

$$F_e = F + p \cdot \sum_{i=1}^q |x_i - x_i^{\lim}| \quad (21)$$

gde je p odgovarajući i penalizacioni faktor a q broj ograničenja. $x_i^{\lim}$ je granična vrednost upravljačke ili zavisne promenljive x , koja se definiše na sledeći način:

$$\begin{aligned} x_i^{\lim} &= x_i^{\max} \text{ ako je } x > x_i^{\max}, i \\ x_i^{\lim} &= x_i^{\min} \text{ ako je } x < x_i^{\min} \end{aligned} \quad (22)$$

pri čemu granične vrednosti $x_i^{\max}$ i $x_i^{\min}$ ne moraju da budu konstante, već se mogu definisati i izrazima.

Vrednost penalizacionog faktora p definiše korisnik u skladu sa prirodom problema optimizacije. p za ograničenja koja se odnose na minimalnu vrednost struje (9) – slučaj 1 i maksimalnu vrednost ukupnih

troškova instalacije (11) – slu aj 2 iznosi 10, dok za sve ostale slu ajeve iznosi 200. Do ovih vrednosti se došlo nakon sprovedene analize u vezi mogu ih vrednosti prekora enja zadatih ograni enja sa jedne strane i o ekivanih vrednosti ciljnih funkcija sa druge.

3. TEST PRIMER

Gravitacioni pretraživa ki algoritam iz MATLAB 2012b softverskog paketa izvršavan je na personalnom ra unaru 1.9 AMD-A 8 GHz sa 4.0 GB RAM-a. Sva vremena izvršenja algoritma bila su manja od 200 s.

Autori su pri odre ivanju optimalnih dimenzija kablovskog rova i kablovske posteljice varirali vrednosti kontrolnih parametara GPA [11]. Glavni kriterijumi za izbor vrednosti kontrolnih parametara bili su brzina konvergencije i ujedna enost dobijenih rezultata za više uzastopnih izvršenja algoritma. Na osnovu izvršenih analiza predložene su slede e vrednosti kontrolnih parametara GPA za odre ivanje rešenja zadatka koji se ovde razmatra:

Veli ina populacije: $N=200$.

Maksimalan broj iteracija: $T=200$.

Po etna vrednost gravitacione konstante: $G_0=100$.

Konstanta koja definiše preciznost GPA: $\epsilon=20$.

Optimizaciona procedura primenjena je na standardnom 35 kV-nom kablu [18], tipa XHE 49 1x95/16 mm² 20/35 kV. Površina popre nog preseka i pre nik jednog provodnika razmatranog kabla iznose 95×10^{-6} m² i 0.0114 m. Pre nik izolacije provodnika od umreženog polietilena sa pripadaju im slaboprovodnim slojem iznosi 0.0308 m.

Elektri na zaštita je površine 16×10^{-6} m², a njen pre nik iznosi 0.03412 m. Pre nik zaštitnog PVC plašta kabla iznosi 0.04026 m. Trajno dozvoljena temperatura provodnika iznosi $T_C=90$ °C, a za temperaturu elektri ne zaštite usvojena je vrednost $T_S=70$ °C. Smatra se da su tri jednožilna kabla položena u formaciju trougao i da su njihove elektri ne zaštite uzemljene na oba kraja.

Uobi ajeno je da se srednjenaponski jednožilni kablovi polažu u formaciju trougla tako da se isti me-

usobno dodiruju. Debljina materijala kablovske posteljice iznad i ispod kablova trebalo bi da iznosi 0.3 i 0.1 m [19], respektivno. Za udaljenosti osa kablova od njima najbližih grani nih površina posteljice obi no se uzima minimalna vrednost koja, kao što je navedeno u ta ki 4, iznosi 0.15 m [16]. Ovim vrednostima konstrukcionih parametara kablovskog rova i kablovske posteljice odgovaraju trajno dozvoljena struja $I=377.2962$ A i ukupni troškovi instalacije $C=51.7003$ \$/m.

4. REZULTATI

U sva tri slu aja, vršena je optimizacija upravlja kih promenljivih D , W , B i S dok su za ostale parametre usvojene slede e konstantne vrednosti za: dubinu polaganja kablova $L=1$ m, specifi nu toplotnu otpornost neisušenog zemljišta $\gamma_s=1$ K·m/W, specifi nu toplotnu otpornost isušenog zemljišta $\gamma_{dry}=2.5$ K·m/W i maksimalnu temperaturu okolnog zemljišta $T_a=20$ °C. Sve ove vrednosti su preuzete iz [20] i odnose se na uslove polaganja koji važe za Nema ku, a identit ni su onima koji važe za Srbiju.

Kao materijal za posteljicu izabrana je mešavina šljunka i peska u odnosu 1:1 sa 5% granulata pre nika manjeg od 0.063 mm, ija specifi na toplotna otpornost sa 0 % vlage iznosi $\gamma_b=0.76$ K·m/W [19]. Protra un trajno dozvoljene struje je izvršen za slu aj faktora optere enja $m=0.8$.

Trajno dozvoljene temperature provodnika su iznosile 90 °C u svim slu ajevima. Temperature elektri ne zaštite T_S su navedene u odgovaraju im tabelama koje slede i razlikovale su se u manjoj meri od pretpostavljene vrednosti od 70 °C. Greška koja je zbog toga napravljena je zanemarljiva.

Slu aj 1. Minimizacija ukupnih troškova instalacije kablovskog voda.

Razmatrana su tri slu aja i to sa slede im vrednostima minimalne struje kablova I^{min} : 380, 400 i 430 A.

U tabeli 2 prikazani su rezultati dobijeni rešavanjem problema minimizacije ukupnih troškova instalacije kablovskog voda.

Tabela 2. Rešenja problema minimizacije ukupnih instalacionih troškova

I^{min} (A)	Optimalne vrednosti upravlja kih promenljivih				C (\$/m)	I (za $m=0.8$) (A)	T_S (°C)
	W (m)	D (m)	B (m)	S (m)			
380	0.3403	0.5126	0.8737	0.0403	51.5998	380	71.1273
400	0.3589	0.9949	0.6844	0.0589	58.3440	400	69.0946
430	0.5815	1.2240	0.7381	0.2815	90.6041	430	65.8474

Slu aj 2. Maksimizacija struje kablova

Optimizacija upravlja kih promenljivih D , W , B i S izvedena je za etiri razli ite maksimalne vrednosti

ukupnih troškova instalacije kablovskog voda C^{max} i to za: 50, 60, 70 i 80 \$/m. Rešenja dobijena maksimizacijom struje kablova data su u tabeli 3.

U tabeli se vidi da dobijene vrednosti za ukupne troškove instalacije kablovskog voda C malo odstupaju od zadatih vrednosti zbog velike osetljivosti trajno

dozvoljene struje na promenu vrednosti dimenzija kablovske posteljice i dubinu njenog centra ali su razlike neznatne.

Tabela 3. Rešenja problema maksimizacije struje kablova

C^{max} (\$/m)	Optimalne vrednosti upravlja kih promenljivih				C (\$/m)	I (za $m=0.8$) (A)	T_s (°C)
	W (m)	D (m)	B (m)	S (m)			
50	0.3403	0.3403	0.9700	0.0403	50.0601	369.6897	72.1373
60	0.3783	0.9784	0.6737	0.0783	60.0004	404.9644	68.5748
70	0.4484	1.0811	0.6832	0.1484	69.9972	416.6722	67.3205
80	0.5180	1.1369	0.7116	0.2135	79.9973	423.9613	66.5207

Slu aj 3. Istovremena minimizacija ukupnih troškova instalacije kablovskog voda i maksimizacija struje kablova

U ovom slu aju nisu zadata nikakva ograni enja u vezi sa maksimalnom vrednoš u ukupnih troškova C^{max} ili minimalnom vrednoš u struje I^{min} .

Funkcija cilja F_3 (12) je formirana primenom metode težinskih suma [17].

U tabeli 4 dati su rezultati dobijeni rešavanjem problema istovremene minimizacije ukupnih troškova instalacije kablovskog voda i maksimizacije struje kablova i to za razli ite vrednosti težinskih faktora w_C i w_I . Za slu aj kada je $w_C=w_I=1$, funkcijama F_1 i F_2 se dodeljuje isti zna aj pri optimizaciji. Ako je $w_C=1$ a $w_I=2$, funkcija F_2 ima dvostruko ve i zna aj od funkcije F_1 , i obratno [17]. U zavisnosti od prioriteta, korisnik bira vrednosti faktora w_C i w_I . Na slede oj slici

prikazan je profil konvergencije GPA za slu aj kada je $w_C=w_I=1$.

Slika 2 - Konvergencije GPA pri rešavanju problema istovremene minimizacije ukupnih troškova instalacije kablovskog voda i maksimizacije struje kablova za slu aj kada je $w_C=w_I=1$.

Tabela 4. Rešenja problema istovremene minimizacije ukupnih troškova instalacije kablovskog voda i maksimizacije struje kablova

w_C i w_I		Optimalne vrednosti upravlja kih promenljivih				C (\$/m)	I (za $m=0.8$) (A)	F_3	T_s (°C)
w_C	w_I	W (m)	D (m)	B (m)	S (m)				
2	1	0.3518	0.9263	0.6839	0.0544	56.4154	398.3173	-285.4865	69.2692
1	1	0.4187	1.0205	0.6822	0.1124	65.3974	411.4592	-346.0618	67.8838
1	2	0.6061	1.2034	0.7503	0.2966	93.4116	431.2070	-769.0024	65.7116

U cilju uvažavanja efekta isušivanja zemljišta koje okružuje kablovsku posteljicu, u algoritmu je postavljen uslov koji upore uje pre nik sloja zemljišta oko kablova koji prati promenu optere enja sa pre nikom sloja zemljišta koje se isušuje kao i sa ekvivalentnim pre nikom posteljice pravougaonog preseka. U zavisnosti od njihovog odnosa (prvo se pretpostavi određena situacija a kasnije utvrdi da li je pretpostavka bila ispravna) [2], utvr uje se da li do isušivanja okolnog zemljišta dolazi ili ne, odnosno algoritam postupa u skladu sa postavljenim uslovom. Interesantno je naglasiti da do isušivanja zemljišta dolazi samo u slu ajevima dimenzija kablovske posteljice datim u drugim redovima tabela 2 i 3. U svim ostalim slu ajevima ne dolazi do isušivanja zemljišta ali je algoritam birao

vrednosti dimenzija kablovske posteljice i dubinu njenog centra tako da je pre nik sloja zemljišta koje se isušuje neznatno manji od ekvivalentnog pre nika kablovske posteljice.

5. DISKUSIJA REZULTATA

Na osnovu dobijenih rezultata se vidi da je visina kablovske posteljice ve a od širine iste za sva tri slu aja optimizacije. Tako e, algoritam teži da pozicionira kablove uz donju grani nu površinu posteljice, tj. da odstojanje dva donja kabla od donje grani ne površine posteljice izjedna i sa ili približi minimalnoj vrednosti od 0.075 m. To zna i da na vrednost struje kablova najviše uti e visina kablovske posteljice, što se slaže sa zaklju cima iz [3, 5, 8]. Ovo se objašnjava

injenicom da površina zemlje predstavlja hladnjak za kablove, tako da se sa povećanjem visine posteljice u smeru prema površini zemlje formira provodni put za toplotu generisanu u kablovima.

Prema tome, pri izboru dimenzija kablovske posteljice, u skladu sa raspoloživim budžetom, treba težiti povećanju visine kablovske posteljice a kablove treba polagati tako da debljina materijala posteljice ispod kablova bude minimalna.

Algoritam uvek teži da poveća rastojanje između kablova za onoliko koliko dozvoljavaju širina posteljice i minimalno odstojanje levog (ili desnog) kabla od leve (ili desne) grani ne površine posteljice. To znači da polaganje kablova u formaciju trougla gde se kablovi međusobno dodiruju ne obezbeđuje najveću vrednost trajno dozvoljene struje. Povećanje rastojanja između kablova dvostruko utiče na vrednost struje. Sa jedne strane, povećanje rastojanja između kablova istovremeno vodi međusobnom udaljavanju izvora toplote i povećanju struje usled slabijeg efekta blizine. Sa druge strane, dolazi do povećanja faktora gubitaka u električnoj zaštiti kablova (i mehaničkoj ako ista postoji) što dovodi do smanjenja struje kablova. U zavisnosti od konstrukcije kablova i naponskog nivoa istih zavisi intenzitet datih efekata a samim tim i vrednost optimalnog međusobnog rastojanja kablova.

Shodno tome, za konkretan tip kabla, zadate uslove polaganja i način uzemljenja električnih zaštita, treba utvrditi da li sa povećanjem međusobnog rastojanja kablova dolazi do povećanja trajno dozvoljene struje ili ne.

Kod istovremene minimizacije ukupnih troškova instalacije kablovskog voda i maksimizacije struje kablova, algoritam se slaže sa definisanim prioritetom, odnosno sa vrednostima w_C i w_I . U slučaju kada maksimizacija struje kabla ima dvostruko veće i značajnije od minimizacije ukupnih troškova instalacije ($w_C=1$, $w_I=2$), algoritam povećava dimenzije kablovske posteljice. Međutim, one ostaju blizu svojih donjih granica (naročito širina). Razlog za to je što bi sa velikim povećanjem dimenzija posteljice došlo do drastičnog povećanja ukupnih troškova i neznatnog povećanja trajno dozvoljene struje što algoritam prepoznaje kao neekonomično.

U 8 od 10 razmatranih slučajeva optimizacije, ukupni troškovi instalacije kablovskog voda su veći i od ukupnih troškova za slučaj klasičnog polaganja kablova. Tada su veće i trajno dozvoljene struje kablova. Ove razlike se ne mogu direktno uporediti zbog toga što se ukupni troškovi instalacije nekog kablovskog voda znaju tek u fazi realizacije projekta (investicioni troškovi), a potencijalna dobit (usled prenosa veće količine energije) se zna tek na kraju radnog veka tog kablovskog voda koji u proseku iznosi 40 godina [21].

U Italiji, u ukupnoj ceni električne energije koja iznosi 11.43 €/kWh, prenos električne energije u estvuje sa 0.33 €/kWh [21], a distribucija sa 2.16 €/kWh. Koristeći se ovim primerom, lako se može proceniti u kojem bi se vremenskom periodu isplatili dodatni troškovi za instalaciju razmatranog kablovskog voda na optimalan način. Procena vremenskog perioda otplate dodatnih troškova izvršena je sa cenom od 0.33 €/kWh. Međutim, 35 kV-ni kablovski vodovi pripadaju distributivnim mrežama i zbog toga je trebalo usvojiti veću cenu za 1 kWh. Ovo definitivno obezbeđuje sigurnost dobijenih rezultata.

Saglasno drugom redu tabele 2, ukupni troškovi instalacije kablovskog voda i trajno dozvoljena struja kablova iznose $C=58.344$ \$/m i $I=400$ A. Dakle, struja se u datom slučaju može povećati za 22.7038 A, što znači da se na naponskom nivou od 35 kV može prenositi dodatnih 1376.34 kW u poređenju sa klasično projektovanim vodom (pod pretpostavkom da je faktor snage jednak jedinici). Sa druge strane, ukupni troškovi za slučaj instalacije kablovskog voda na klasičan način jesu niži za 6.6437 \$/m. A

Ako bi ekvivalentno vreme trajanja vršne snage kablovskog voda i cena sa kojom prenos u estvuje u ukupnoj ceni električne energije respektivno iznosili $T_{max}=7008$ h/god i 0.33 €/kWh, onda bi se u periodu od godinu dana na osnovu razlike od 22.7038 A na 35 kV ostvario profit od:

$$Profit=1376.34 \cdot 7008 \cdot 0.0033=31829.8 \text{ EUR.} \quad (23)$$

gde je $T_{max}=m \cdot 8760=0.8 \cdot 8760=7008$ h/god, a $m=0.8$ vrednost faktora opterećenja sa kojom je računato trajno dozvoljeno opterećenje kablova.

Ako se posmatra dužina voda od 5 km i ako se vodi računa o tome da 1 USD vredi 0.885 EUR, onda se razlika između ukupnih troškova instalacije za optimiziran i klasično projektovan kablovski vod u iznosu od 6.6437 \$/m može isplatiti posle 1.08 godine. Identična analiza je sprovedena i za sve ostale slučajeve, a rezultati iste dati su u tabeli 5.

Ovde još treba istaći i da se niža temperatura provodnika, pri istoj vrednosti trajno dozvoljene struje, imati u slučaju optimalno projektovanog kablovskog voda. Prema tome, kablovi optimalno projektovanog voda imaju duži životni vek od kablova klasično projektovanog voda.

Praktična realizacija dobijenih rešenja u pogledu održavanja takođe definisanog međusobnog rastojanja između kablova i njihovog rasporeda u formaciju trougla moguće je koristiti enjem specijalno napravljenih blokova od istog materijala od koga je napravljena i kablovska posteljica. Način polaganja kablova u ovim blokovima i njihova konstrukcija detaljno su opisani u [8].

Tabela 5. Uporedni prikaz ukupnih troškova instalacije i trajno dozvoljenih struja za optimiziran i klasi no projektovan kablovski vod

C (\$/m)		Procentualna razlika (%)	I (A)		Procentualna razlika (%)	Vremenski period otplate razlike izme u ukupnih troškova instalacije za optimiziran i klasi no projektovan kablovski vod (u godinama)
Slu aj optimizacije	Klasi no projektovan kablovski vod		Slu aj optimizacije	Klasi no projektovan kablovski vod		
Sl aj 1. Minimizacija ukupnih troškova instalacije kablovskog voda						
51.5998	51.7003	-0.19	380.0	377.2962	+0.72	*
58.3440		+12.85	400.0		+6.02	1.08
90.6041		+75.25	430.0		+13.97	0.43
Slu aj 2. Maksimizacija struje kablova						
50.0601	51.7003	-2.86	369.6897	377.2962	-1.58	1.47**
60.0004		+16.05	404.9644		+7.33	1.06
69.9972		+35.39	416.6722		+10.44	0.68
79.9973		+54.73	423.9613		+12.37	0.52
Slu aj 3. Istovremena minimizacija ukupnih troškova instalacije kablovskog voda i maksimizacija struje kablova						
56.4154	51.7003	+9.12	398.3173	377.2962	+5.57	1.41
65.3974		+26.49	411.4592		+9.05	0.79
93.4116		+80.68	431.2070		+14.29	0.41

* Ukupni troškovi instalacije za slu aj optimalno projektovanog voda su niži od ukupnih troškova instalacije za slu aj klasi no projektovanog voda.

** U ovom sluaju se dobija vremenski period otplate razlike u troškovima izrade klasi no projektovanog voda u odnosu na optimalno projektovani za razliku od ostalih vrednosti u ovoj koloni gde je situacija obrnuta.

6. ZAKLJUČAK

Rezultati dobijeni primenom GPA saglasni su definisanim funkcijama cilja, a sva zadata ograničenja su zadovoljena. Iako je matematički izraz za trajno dozvoljenu struju izrazito nelinearan i ima diskontinuitet pri prelasku sa sluaja sa isušivanjem na sluaj bez isušivanja okolnog zemljišta, pokazalo se da GPA konvergira ka globalnom optimumu bez poteškoća.

Pokazano je da klasičan naipolaganja kablova u trougaonu formaciju gde se kablovi međusobno dodiruju ne obezbeđuje maksimalnu vrednost trajno dozvoljene struje za iste ukupne troškove.

Takođe je pokazano da sa povećanjem budžeta dolazi do značajnog povećanja trajno dozvoljene struje, tj. prenosne moći kablovskih vodova. Na ovaj način se može odložiti ili izbeći investicija izgradnje kablovskog voda sa kablovima većeg poprečnog preseka.

Za razmatrane sluajevе optimizacije, vremenski period otplate razlike između ukupnih troškova instalacije za optimalno i klasično projektovan kablovski vod je kraći od 1.47 god.

GPA se može jednostavno primeniti i na druge probleme optimizacije kod jednostrukih i višestrukih podzemnih vodova sa kablovima u horizontalnim i/ili vertikalnim ravanskim formacijama.

7. ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – Section 1: General. IEC Standard 60287-1-1, First edition, 1994-12.
- [2] Neher J. H, McGrath M. H, The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems, AIEE Trans. Part III—Power App. Syst., vol. 76, pp. 752–772, Oct. 1957.
- [3] El-Kady M. A, Optimization of power cable and thermal backfill configurations, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems; PAS-101(12):4681-4688, 1982.
- [4] León F, Anders G. J, Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite element method, IEEE Transactions on Power Delivery; 23(2):537-543, 2008.
- [5] Anders G. J, Rating of electric power cables in unfavorable thermal environment, John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2005.
- [6] CIGRE: The calculation of the effective thermal resistance of cables laid in materials having different

- thermal resistivities, *Electra*, No. 98, pp. 19–42, 1985.
- [7] León F, Major factors affecting cable ampacity, IEEE Power Engineering Society General Meeting 2006, Montreal, Quebec, Canada, pp 1-6, October 16, 2006.
- [8] Klimenta D, Perovic B, Jevtic M, Radosavljevic J, Arsic N. A thermal FEM-based procedure for the design of energy-efficient underground cable lines, *Humanities and Science University Journal – Technics*, ISSN: 2222-5064, No. 10 (2014), pp. 162-188, 2014.
- [9] El-Kady M. A. Computer-aided design of cable thermal backfill, *Proc. Symposium on Underground Cable Thermal Back-Fill*, pp. 19-33, Toronto, Canada, 1981.
- [10] De Mey G, Xynis P, Papagiannopoulos I, Chatziathanasiou V, Exizidis L, Wiecek B, Optimal Position of Buried Power Cables, *Elektronika ir elektrotehnika*, ISSN 1392–1215, VOL. 20, NO. 5, 2014.
- [11] Rashedi E, Nezamabadi-pour H, Saryazdi S, GSA: A gravitational search algorithm, *Information Sciences*, Vol. 179, pp. 2232-2248, 2009.
- [12] Radosavljevi J, Jevti M, Arsi N, Klimenta D, Optimal power flow for distribution networks using gravitational search algorithm, *Electrical Engineering*, Vol. 96, Iss. 4, pp. 335-345, 2014.
- [13] Radosavljevi J, Gravitational search algorithm for solving combined economic and emission dispatch, *INFOTEH-JAHORINA*, Vol. 14, pp. 148-153, March 2015.
- [14] Radosavljevi J, Tomovi M, Odre ivanje optimalnih tokova snaga primenom modifikovanog gravitacionog algoritma, *INFOTEH-JAHORINA*, Vol. 14, pp. 154-159, mart 2015.
- [15] Vasant P. M, Meta-heuristics optimization algorithms in engineering, business, economics, and finance. IGI Global, 2012.
- [16] Goyal Er. PK. Installation, Testing and Jointing of LT and HT Power Cables up to 33 KV, *Industrial Engineering Letters*, Vol. 4, No. 8, pp. 15-20, 2014.
- [17] Marler R. T, Arora J. S, The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights, *Structural Multidisciplinary Optimization* Vol. 41, pp. 853-862, 2010.
- [18] Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). IEC Standard 60502-2, Second edition, 2005-03.
- [19] King S. Y, Halfter N. A, Underground power cables (1st edn). Longman: London and New York, 1982.
- [20] Electric cables – Calculation of the current rating – Part 3-1: Sections on operating conditions – Reference operating conditions and selection of cable type. IEC Standard 60287-3-1, Edition 1.1, 1999-05.
- [21] Overview of the Potential for Undergrounding the Electricity Networks in Europe, Report by ICF Consultants to the European Commission, February 2003.

SUMMARY

OPTIMIZING OF THE CABLE BEDDING AND THE AMPACITY OF UNDERGROUND POWER CABLES IN TREFOIL FORMATION BY USING THE GRAVITATIONAL SEARCH ALGORITHM

This paper considers the problem of the determination of the optimum values for dimensions of cable trench and cable bedding, interaxial spacings between power cables in trefoil formation and cable ampacities. This non-linear multi-objective optimization problem with constraints is solved by using the gravitational search algorithm (GSA). The procedure used in this paper has allowed the simultaneous inclusion of all control variables into the optimization process and the determination of an optimal solution in accordance with specified optimization criteria. In the present case, the optimal solution is obtained based on the following optimization criteria: (i) minimization of the total installation cost for cable line, (ii) maximization of the cable ampacity and (iii) a simultaneous application of the minimization of the total installation cost for cable line and the maximization of the cable ampacity. The constraints on control variables are introduced through penalty factors which expand the objective function. It is also assumed that the cable ampacity corresponds to a load factor of 0.8. The procedure is carried out with respect to the drying out effect in the soil surrounding the cables.

Key words: ampacity, cable bedding, gravitational search algorithm (GSA), optimization, installation costs