

Ekonomski presek priključnog kabla solarne elektrane

Ivana Mitić, Dunja Grujić

Elektrotehnički fakultet

Univerzitet u Beogradu

Beograd, Srbija

ica.mitic90@gmail.com, dunjagrujic@gmail.com

Sadržaj—U radu je razvijen model za proračun ekonomskog preseka kabla za priključenje solarne elektrane na distributivnu mrežu. Kriterijum za izbor optimalnog preseka kabla je minimizacija troškova proizvodnje elektrane. U radu je prikazan model računanja gubitaka u ovom kablju, pri čemu je uvažena promena otpornosti kabla sa temperaturom. Izvršena je minimizacija gubitaka u kablju korišćenjem optimalnog preseka kabla, kao i izborom izlaznog napona invertorskog postrojenja. U radu je prikazan i model proračuna snage solarne elektrane, a na kraju rada prikazana je primena opisanih modela na primeru solarne elektrane.

Ključne reči—priključenje solarne elektrane, ekonomski presek, gubici snage.

I. UVOD

Solarna elektrana se priključuje na distributivnu mrežu radialnim kablovskim fiderima. Obračunsko merno mesto se nalazi u tački priključenja solarne elektrane na distributivnu mrežu, stoga gubici električne energije na kablovima smanjuju efikasnost solarne elektrane. Pošto je cena električne energije proizvedena iz obnovljivih izvora energije znatno viša od cene električne energije proizvedene iz konvencionalnih izvora, i cena gubitaka ima značajno veću vrednost od gubitaka u distributivnom sistemu. Da bi se smanjili gubici potrebno je izabrati optimalan presek kabla, time proizvodnja postaje efikasnija, a kabl se manje zagreva i produžuje se njegov životni vek.

Presek kabla u distributivnoj mreži se bira tako da zadovolji u pogledu maksimalne trajne struje, kratkotrajnih strujnih preopterećenja i padova napona. Gubici nisu parametar koji figuriše pri izboru kabla. U ovom radu prikazan je model za proračun optimalnog preseka kabla, tako da se dobije najekonomičnije rešenje i minimalna cena proizvedenog MWh. Povećanjem poprečnog preseka kabla smanjuju se gubici, ali se povećavaju investicioni troškovi. Potrebno je odrediti ekonomski presek kabla variranjem poprečnog preseka. Kada se odredi ekonomski presek kabla, treba proveriti da li on zadovoljava sa aspekta trajne i kratkotrajne struje opterećenja i pada napona. Ukoliko ekonomski presek kabla ne zadovoljava neko od tehničkih ograničenja, potrebno je odabrati prvi veći standardni presek koji zadovoljava kritično ograničenje.

II. TERMODINAMIČKI MODEL KABLA

Stohastična priroda Sunca uzrokuje stohastičnost u proizvodnji i promenljive gubitke energije, koji utiču na promenljivu temperaturu provodnika kabla, što uzrokuje

promenu njegove otpornosti. Da bi se što tačnije procenili godišnji gubici energije na kablju potrebno je uvažiti promenu otpornosti.

Potrebno je proračunati temperature provodnika na satnom nivou na osnovu promenljivog opterećenja tokom jedne godine. Da bi se pojednostavio postupak proračuna često se uvode određene pretpostavke koje daju zadovoljavajuće inženjerske rezultate. Pri proračunu temperature provodnika usvojene su sledeće pretpostavke:

- specifična termička otpornost i difuznost zemljišta su konstantne,
- temperatura referentne zemlje je stalna i iznosi 10°C ,
- električna otpornost provodnika kabla u okviru jednog sata je stalna i jednaka električnoj otpornosti koja odgovara proračunatoj temperaturi u prethodnom satu,
- nadtemperatura provodnika kabla u nestacionarnom stanju se može odrediti pomoću nadtemperature provodnika u odnosu na spoljnu površinu kabla i korigovane nadtemperature spoljne površine kabla (razlike temperatura spoljne površine kabla i referentne zemlje):

$$\vartheta_p(t) = \vartheta_{p0}(t) + A(t) \cdot \vartheta_k(t) \quad (2.1)$$

gde su:

$\vartheta_{p0}(t)$ – nadtemperatura provodnika u odnosu na spoljnu površinu kabla,

$A(t)$ – faktor temperaturnog dosega,

$\vartheta_k(t)$ – nadtemperatura spoljne površine kabla,

t – vreme.

Prethodna relacija je dobijena pod pretpostavkom da je snaga Džulovih gubitaka konstantna, ali pošto se sa promenom temperature menja i otpornost kabla, menjaju se i Džulovi gubici, što je potrebno uvažiti. Kako se raspolaže sa srednjom satnom temperaturom potrebno je izračunati otpornost kabla pri datoj temperaturi i sa dobijenom vrednošću računati Džulove gubitke.

Dobija se da je nadtemperatura provodnika:

$$\vartheta_{prov}(t) = \frac{\vartheta_p(t)}{1 + \frac{1}{\alpha_0 + \theta_i} (\vartheta_{prov}(\infty) - \vartheta_p(t))} \quad (2.2)$$

gde su:

α_0 – temperaturni koeficijent promene električne otpnosti,

θ_i – temperatura provodnika koja je prethodila nestacionarnom stanju,

$\theta_{prov(\infty)}$ – razlika trajno dozvoljene temperature provodnika i temperature ambijenta.

Srednji Džulovi gubici se računaju za svaki sat jer se raspolaže sa srednjim satnim vrednostima proizvodnje solarne elektrane.

$$P_g(i) = R_i \cdot I_i^2 \quad (2.3)$$

gde su:

R_i – otpornost provodnika na temperaturi $\theta_p(i)$,

$I_i = P_g / (\sqrt{3}U)$ – struja opterećenja u i-tom satu,

$P_g(i)$ – snaga generisanja u i-tom satu.

Temperatura provodnika u i-tom satu se dobija iz relacije:

$$\theta_p(i) = \theta_p(i-1) + \theta_{prov}(i) - \theta_{prov}(i-1) \quad (2.4)$$

A otpornost provodnika u i-tom satu je:

$$R_i(T) = R(90^\circ C) \frac{1 + \alpha_0 \cdot \theta_p(i)}{1 + \alpha_0 \cdot 90} \quad (2.5)$$

III. PRORAČUN GENERISANJA SOLARNE ELEKTRANE

Merni podaci obuhvataju desetominutni vremenski interval, srednju desetominutnu horizontalnu iradijaciju [W/m^2] i srednju desetominutnu temperaturu vazduha [$^\circ C$]. Merenje horizontalne solarne iradijacije je vršeno pomoću piranometra. Merni podaci se odnose na ukupnu horizontalnu iradijaciju, koju je potrebno dekomponovati na direktnu i difuzionu komponentu, da bi se odredilo zračenje na koso postavljen panel. Ukupna srednja horizontalna insolacija data je formulom 3.1.

$$\bar{I}_H = \bar{I}_{BH} + \bar{I}_{DH} \quad (3.1)$$

gde je \bar{I}_{BH} direktna komponenta insolacije, a \bar{I}_{DH} difuziona komponenta insolacije.

Da bi se horizontalna insolacija razložila na direktnu i difuzionu potrebno je odrediti indeks vedrosti (čistoće) K_T koji je odnos prosečne horizontalne insolacije i srednje horizontalne insolacije ekstraterestičkog zračenja, a izračunava se korišćenjem formule 3.2:

$$K_T = \frac{\bar{I}_H}{\bar{I}_0} \quad (3.2)$$

Veća vrednost indeksa čistoće odgovara vedrom danu kada je veći deo insolacije direktno zračenje, a male vrednosti ukazuju na oblačan dan kada je dominantna difuziona komponenta zračenja.

Srednja dnevna horizontalna insolacija ekstraterestičkog zračenja se izračunava kao srednja vrednost proizvoda normalne ekstraterestičke iradijacije i sinusa altitudnog ugla:

$$\bar{I}_0 = \frac{24}{\pi} SC(1 + 0.034 \cos(360n/365)) \cdot (\cos L \cos \delta \sin H_{SR} + H_{SR} \sin L \sin \delta) \quad (3.3)$$

gde je SC solarna konstanta i iznosi 1.377 kWh/m^2 , n je redni broj dana, L je geografska širina i iznosi 44.82° , H_{SR} je satni izlazak Sunca.

Za dekompoziciju ukupne horizontalne insolacije na direktnu i difuzionu komponentu koristi se Liu-Jordan-ova teorema:

$$\frac{\bar{I}_{DH}}{\bar{I}_H} = 1.390 - 4.027 K_T + 5.531 K_T^2 - 3.108 K_T^3 \quad (3.4)$$

Iz prethodne formule može se odrediti difuziono zračenje na horizontalnu površinu, pa se na osnovu njega mogu se odrediti difuziona i reflektovana komponenta insolacije na kolektor:

$$\bar{I}_{DC} = \bar{I}_{DH} \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) \quad (3.5)$$

$$\bar{I}_{RC} = \rho \bar{I}_{DH} \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \quad (3.6)$$

gde je Σ je nagibni ugao pod kojim je postavljen panel, a ρ je koeficijent ambijentalne refleksije.

Direktno horizontalno zračenje se računa oduzimanjem horizontalnog difuzionog zračenja od ukupnog horizontalnog zračenja.

Direktna komponenta insolacije na horizontalnu površinu izražena preko direktne insolacije računa se prema formuli 3.7:

$$\bar{I}_{BH} = \bar{I}_B \sin \beta = \bar{I}_{BC} / \cos \Theta \cdot \sin \beta \quad (3.7)$$

Direktna komponenta insolacije na kolektor nalazi se korišćenjem formule 3.8:

$$\bar{I}_{BC} = \bar{I}_{BH} \cdot \cos \Theta / \sin \beta = \bar{I}_{BH} \cdot R_B \quad (3.8)$$

gde je R_B faktor kosine, Θ ugao incidencije, β altitudni ugao.

Prethodna jednačina je tačna za trenutne vrednosti, ali pošto se radi sa mesečnim prosekom, potreban je srednji faktor kosine, koji se procenjuje kao prosečna vrednost $\cos \Theta$ u onim satima u toku dana kada je Sunce ispred kolektora i podeli se sa prosečnom vrednošću $\sin \beta$ u onim satima u toku dana kada je Sunce iznad horizonta.

Pošto je horizontalno zračenje razloženo na komponente može se izračunati ukupna insolacija na kolektor:

$$\bar{I}_C = \bar{I}_H \left(1 - \frac{I_{DH}}{\bar{I}_H}\right) R_B + I_{DH} \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2}\right) + \rho \bar{I}_H \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2}\right) \quad (3.9)$$

Kada je poznata insolacija na koso postavljen panel može se odrediti energija koju generiše solarna elektrana. Proizvođači daju $P_{DC(STC)}$ - DC snagu modula pri standardnim test uslovima (STC), tj. pri insolaciji od jednog Sunca (1 kW/m²), koeficijentu vazdušne mase 1.5 i temperaturi ćelije 25°C. Onda se iz ove snage može proceniti izlazna AC snaga (P_{AC}).

$$P_{AC} = P_{DC(STC)} \cdot \frac{\bar{I}_C}{1000W / m^2} \cdot \eta_{uk} \quad (3.10)$$

Efikasnost konverzije (η_{uk}) je proizvod efikasnosti invertora, smanjenja efikasnosti usled zaprljanosti modula, neuparenosti modula i različitih ambijentalnih uslova od standardnih. Čak i kada je Sunce u zenitu uticaj ovih gubitaka na izlaznu snagu je znatan (smanjenje izlazne snage za čak 20 – 40%).

IV. MODEL ZA PRORAČUN GUBITAKA U ELEKTRANI

Gubici u kابلu se računaju na osnovu Džulovog zakona. Pošto se odredi snaga generisanja elektrane P_{gi} i promenljiva vrednost otpornosti R_i , mogu se odrediti gubici u kابلu na osnovu formule 4.1.

$$P_{gub_i} = R_i \cdot \left(\frac{P_{g_i}}{\sqrt{3}U_n}\right)^2 \quad (4.1)$$

gde je U_n nominalni fazni napon. Uzeto je da je $\cos\varphi=1$, i da je elektrana priključena na krutu mrežu te je napon konstantan.

Ukupna energija gubitaka u toku godine računa se na osnovu formule 4.2.

$$W_{gub} = \int_0^T P_{gub_i} dt = \sum_1^{8760} R_i \cdot \left(\frac{P_{g_i}}{\sqrt{3}U_n}\right)^2 \Delta T \quad (4.2)$$

V. EKONOMSKI MODEL ZA PRORAČUN OPTIMALNOG PRESEKA KABLA

Na visinu investicionih troškova najveći uticaj imaju presek upotrebljenog kabela i visina pogonskog napona, dok pogonski troškovi zavise od troškova energetskih gubitaka i troškova održavanja. Dok su investicioni troškovi konstantni i zavise od cene kabela, pogonski troškovi variraju. Pri proračunu su zanemareni troškovi održavanja i uzimaju se u obzir samo troškovi nastali usled Džulovih gubitaka, koji zavise od cene električne energije, otpornosti kabela i struje koja kroz njega teče.

Metoda ukupnih svedenih troškova omogućava vrednovanje i poređenje različitih varijanti, u ovom slučaju to su različite vrednosti preseka kablova i izlaznog napona invertorskog postrojenja. Po ovoj metodi svi troškovi se svode

na jedan određeni trenutak, obično je to početak ili kraj eksploatacije.

U ovom primeru se svi novčani troškovi svode na kraj perioda eksploatacije. Ova metoda se zove još i metoda buduće vrednosti (Futur Worth-FW). U proračunu je uzeto da su troškovi eksploatacije kabela iz godine u godinu jednaki. Ovi troškovi zapravo predstavljaju ekvivalentnu novčanu vrednost godišnjih gubitaka energije na priključnom kablovskomvodu.

Troškovi eksploatacije se određuju na osnovu modela izloženog u prethodnom odeljku. Uzima se da je životni vek solarne elektrane $n=20$ godina, pa se aktualizacija svodi na kraj ovog perioda. Za stopu aktualizacije obično se uzimaju vrednosti u opsegu $p_n = 6-9\%$ [2],[3] (u proračunu je uzeto da je $p_n = 7.5\%$). Funkcija stope aktualizacije nije u učestvovanju u stvaranju viška vrednosti, već pravilno vrednovanje budućih efekata. To je faktor koji se koristi prilikom izbora koja investicija najviše odgovara datim uslovima. Ukupni troškovi na kraju perioda eksploatacije računaju se na sledeći način:

$$T_n = K(1 + p_n)^n + E \frac{(1 + p_n)^n - 1}{p_n} \quad (5.1)$$

gde su:

K - ukupni investicioni troškovi u trenutku početka perioda eksploatacije.

E - troškovi eksploatacije kabela

Kao parametar za optimizaciju preseka kabela u ovoj analizi korišćeni su svedeni troškovi, odnosno troškovi svedeni po jedinici dužine kabela i po proizvedenom MWh.

$$c = \frac{T_n}{L \cdot W_n} \quad (5.2)$$

gde su:

T_n (€) - ukupni investicioni i eksploatacioni troškovi kablovskog priključka definisani relacijom (5.1),

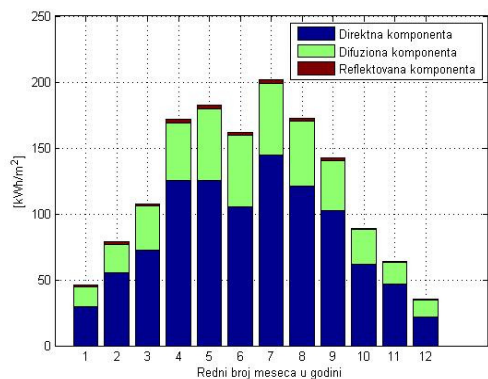
L (km) - dužina kablovskog priključka

W_n (MWh) - ukupna neto proizvedena energija na pragu vetroelektrane u toku njenog životnog veka od n godina,

c (€/MWh/km) - specifični udeo ukupnih troškova kabela u troškovima proizvodnje prosečnog MWh na životnom veku vetroelektrane.

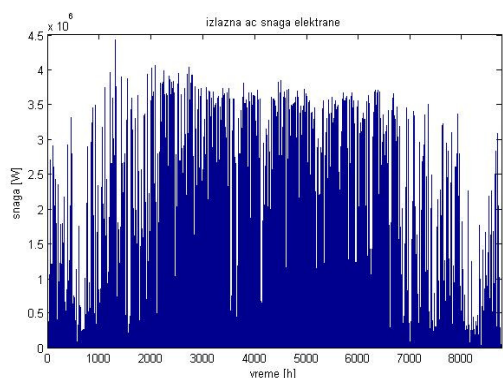
VI. PRIMER PRORAČUNA KABLA

Kao primer uzeta je solarna elektrana instalisane snage 25MW_p. Za procenu proizvodnje ove elektrane korišćeni su podaci o srednjoj desetominutnoj horizontalnoj insolaciji i temperaturi ambijenta. Paneli su postavljeni pod uglom od 33° (što je optimalan ugao za naše podneblje za elektranu koja radi tokom cele godine). Na Sl. 1 je prikazana prosečna insolacija za svaki mesec. Plavom bojom prikazana je direktna komponenta insolacije, zelenom difuziona, a crvenom reflektovana.



Slika 1. Insolacija na koso postavljen panel

Srednje satne vrednosti snaga generisanja ove elektrane tokom jedne godine prikazane su na Sl. 2.



Slika 2. Generisanje solarne elektrane

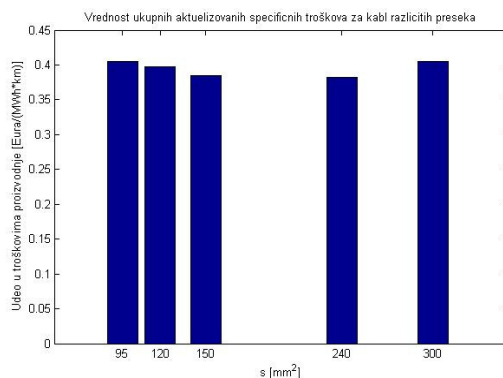
Za potrebe analize gubitaka, kablovski vod od invertorskog postrojenja solarne elektrane do najbliže transformatorske stanice je modelovan prema termodinamičkom modelu kabla prikazanom u poglavlju II. Za različite preseke kabla računata je vremenska promena temperature i otpornosti provodnika u svakom satu. Na osnovu relacija (4.1 i 4.2) izvršen je proračun snage gubitaka i ukupne godišnje energije gubitaka za svaki presek.

Cene kabla tipa XHE49-A koje su korišćene u proračunu date su u tabela I. Ovi podaci su dobijeni od proizvođača i date cene su bez PDV-a.

TABELA I. JEDINIČNE CENE KABLA XHE49-A

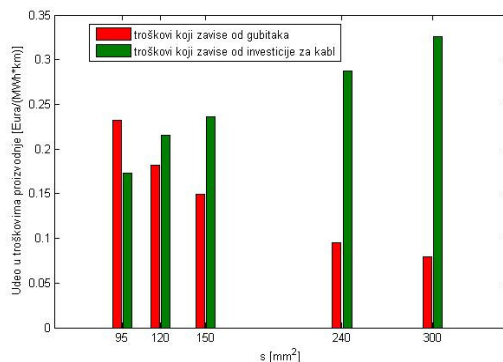
Poprečni presek provodnika mm ²	Cena RSD/m
95	523.23
120	653.72
150	714.99
240	870.88
300	986.89

Za elektranu u primeru uzimane su različite vrednosti poprečnog preseka kabla, od 95 do 300mm², a za izlazni napon iz invertorskog postrojenja uzeta je vrednost od 20kV. I za ove vrednosti računati su specifični troškovi proizvodnje, tj. cena po proizvedenom MWh po jedinici dužine kabla. Ukupni specifični troškovi za kabl prikazani su na Sl. 3.



Slika 3. Vrednosti ukupnih aktualizovanih specifičnih troškova za kabl različitih preseka

Sa povećanjem poprečnog preseka kabla rastu troškovi investicije za kabl, a troškovi usled gubitaka opadaju, jer se smanjuje otpornost. Na Sl. 4 prikazani su razdvojeni specifični troškovi koji zavise od investicije za kabl i troškovi koji zavise od gubitaka.



Slika 4. Razdvojeni specifični troškovi koji zavise od investicije za kabl i troškovi koji zavise od gubitaka.

Proračun gubitaka je vršen prema aktuelnoj zagarantovanoj ceni proizvodnje električne energije u solarnoj elektrani postavljenoj na zemlji, koja u Srbiji iznosi 162.5 €/MWh i zagarantovana je za period od 12 godina. U ovim analizama pretpostavljeno je da će na celom životnom veku solarne elektrane cena biti jednaka trenutnoj zagarantovanoj ceni od 162.5 €/MWh.

Na osnovu grafika na Sl. 3 vidi se da je optimalan kabl preseka 240mm², iz čega se jasno vidi da je znatna ušteda ako se izabere kabl nešto većeg poprečnog preseka jer se prihodi uvećavaju, zbog veće proizvodnje usled smanjenja gubitaka.

U prethodnom proračunu solarna elektrana je priključena na distributivnu mrežu 20kV vodom. Koristeći matematičke modele iz prethodnih poglavlja dobijeno je kako izlazni napon invertorskog postrojenja utiče na specifične svedene troškove kabla. Na Sl. 5 prikazani su specifični troškovi u zavisnosti od poprečnog preseka kabla i izlaznog napona invertorskog postrojenja. Sa Sl. 5 se vidi da su najmanje vrednosti specifičnih troškova pri naponu 35kV, što je posledica toga da se sa povećanjem napona smanjuju gubici.

ZAKLJUČAK

Izbor optimalnog preseka kabla predstavlja relativno složen zadatak pri planiranju i projektovanju solarne elektrane većih snaga. U ovom radu prikazana je metodologija za proračun optimalnog preseka kabla uz uvažavanje promenljive otpornosti kabla zbog temperaturnih varijacija. Na primeru solarne elektrane snage 25MW_p pokazano je da se optimalnim izborom preseka kabla mogu značajno smanjiti troškovi proizvodnje, odnosno povećati profit. Izabrani ekonomski presek kabla potrebno je proveriti u pogledu zadovoljenja kriterijuma dozvoljenih promena napona.

ZAHVALNICA

Autori žele da se zahvale svom profesoru Željku Đurišiću na pomoći prilikom izrade ovog rada.

LITERATURA

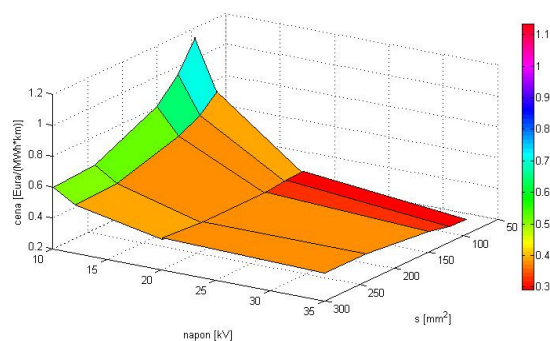
- [1] D. Tasić "Osnovi elektroenergetske kablovske tehnike", Edicija Osnovni udžbenici, Elektronski fakultet, Niš, 2001,
- [2] N. Rajaković „Analiza elektroenergetskih sistema 2”, Akademska misao, Beograd 2008,
- [3] I. A. Škokljev "Planiranje elektroenergetskih sistema", Taurus Public, Beograd, 2000,
- [4] Gilbert M. Masters, "Renewable and Efficient Electric Power Systems", John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004
- [5] Izbor optimalnog preseka priključnog kabla vetroelektrane, Dunja Grujić, Dejan Bajović, Danka Todorović, Željko Đurišić, INFOTEH-JAHORINA Vol. 13, March 2014, pp 231-235

ABSTRACT

This paper presents mathematical model for optimal estimation cross-section of the cable for interconnection of solar power plants to the distribution network. Cable cross section criteria is minimization of solar power plant production costs. This paper presents a calculating model losses in the cable and calculating resistance with temperature changes. Performed the minimization of losses in the cable using the optimal cross-section of the cable, as well as a selection of the output voltage of the inverter. This paper presents a model and calculation production of solar power plant, and at the end of the paper shows the application of the developed model has been described in the example of solar power plant.

ECONOMIC CABLE CROSS SECTION OF SOLAR POWER PLANT

Ivana Mitić, Dunja Grujić

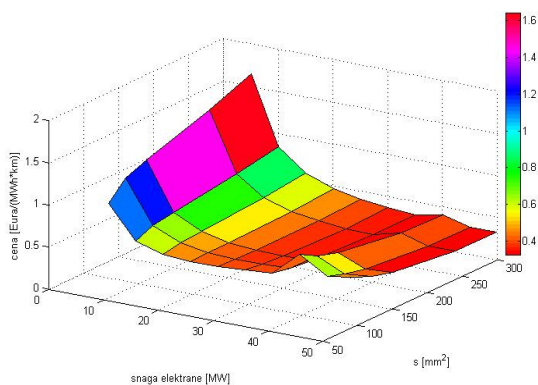


Slika 5. Izbor optimalnog preseka kabla za različite vrednosti izlaznog napona invertorskog postrojenja

Na Sl. 6 prikazane su svedene cene po km kabla i proizvedenom MWh solarne elektrane u zavisnosti od preseka kabla i instalisane snage solarne elektrane. U tabeli II prikazani su optimalni preseki za elektrane različitih instalisanih snaga.

TABELA II. OPTIMALNI PRESEK ZA ELEKTRANE RAZLIČITIH SNAGA

Snaga solarne elektrane [MW]	Presek [mm2]
5	95
10	95
15	95
20	95
25	240
30	240
35	240
40	300
45	300
50	300



Slika 1. Vrednosti ukupnih aktualizovanih specifičnih troškova za različite poprečne preseke i elektrane različitih snaga