

OPTIMALNI ODNOS SNAGE INVERTORA I SNAGE FOTONAPONSKIH PANELA

OPTIMAL RATIO OF INVERTER POWER AND PHOTOVOLTAIC PANEL POWER

Nikola CVETANOVIĆ, Elektrodistribucija Srbije, DP Niš, Srbija
Andrija PETRUŠIĆ, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet Niš, Srbija
Aleksandar JANJIĆ, GOPA International Energy Consultants, Branch office Belgrade, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Proračun broja fotonaponskih panela u solarnim elektranama ograničen je dozvoljenom snagom koju elektrana može da isporuči u elektroenergetski sistem električne energije, kao i površinom na kojoj je planirana izgradnja solarne elektrane. Prema dosadašnjem iskustvu potrebno je posvetiti veću pažnju proračunu broja fotonaponskih panela povezanih na invertore. U ovom radu, je na konkretnom primeru solarne elektrane na zemlji, snage 1 MW, detaljno predstavljen proračun snage fotonaponskih panela povezanih na invertore. Analiziran uticaj najvećeg i najmanjeg broja fotonaponskih panela, odnosno najveća i najmanja DC snaga, raspoređena na svakom invertoru ponaosob. Proračun proizvodnje električne energije na AC strani u zavisnosti od snage u fotonaponskim panelima prikazan je tabelarno. Na osnovu proračuna, odnosno minimalne i maksimalne snage u fotonaponskim panelima, za datu elektranu je definisan optimalan broj panela po jednom invertoru. Cilj rada je da se ukaže na potrebu za detaljnim proračunom broja panela po invertoru, sa svrhom najefikasnijeg iskorišćenja invertora u pogledu proizvodnje električne energije tokom eksploatacije solarne elektrane.

Gljučne reči: solarna elektrana, fotonaponski panel, inverter, DC snaga, AC snaga

ABSTRACT

The calculation of the number of photovoltaic panels in solar power plants is limited by the allowed power that the plant can deliver to the electrical power system, as well as the area planned for the construction of the solar power plant. According to previous experiences, special attention needs to be devoted to the calculation of the number of photovoltaic panels connected to inverters. In this paper, using a specific example of a ground-based solar power plant with a capacity of 1 MW, a detailed calculation of the power of photovoltaic panels connected to inverters is presented. The impact of the maximum and minimum number of photovoltaic panels, i.e., the maximum and minimum DC power distributed on each inverter individually, is analyzed. The calculation of electricity production on the AC side depending on the power in photovoltaic panels is presented in tabular form. Based on the calculations, i.e., the minimum and maximum power in photovoltaic panels, the optimal number of panels per inverter is defined for the given power plant. The aim of the paper is to emphasize the need for a detailed calculation of the number of panels per inverter, with the goal of the most efficient utilization of inverters in terms of electricity production during the operation of the solar power plant.

Key words: solar power plant, photovoltaic panel, inverter, DC power, AC power

Nikola Cvetanović, nikola.cvetanovic@eds.rs
Andrija Petrušić, andrija.petrusic@elfak.ni.ac.rs
Aleksandar Janjić, aleksandar.janjic@gopa-intec.de

1. UVOD

Odnos DC/AC snage fotonaponske elektrane je uobičajena veličina pri projektovanju kako malih tako i velikih solarnih fotonaponskih (PV) sistema [1, 2]. Definiše se kao odnos DC izlazne snage PV elektrane, koja je jednaka zbiru nominalne snage svakog PV modula pod standardnim uslovima ispitivanja (STC) i ukupne izlazne AC snage invertora. Na primer, solarna elektrana od 13 MW STC izlazne snage (obično se označava u ne-SI jedinici MWp) povezana na 10 MW AC inverterski sistem ima odnos DC/AC od 1,30. Predimenzionisanje

(„oversizing“) predstavlja sisteme sa DC/AC odnosom $>1,00$ i to je uobičajena praksa budući da solarni PV moduli retko rade na svojim STC performansama [3]. Promenljiva temperatura ćelije, promenljivo zračenje, zaprljanost, gubici u ožičenju, neusklađenost i degradacija od starosti uzrokuju smanjenje performansi solarnog PV modula ispod njegove STC vrednosti.

Cilj ovog rada je da se identifikuje optimalni odnos DC/AC za solarne elektrane putem optimizacije ukupnih aktualizovanih prihoda u toku životnog veka elektrane.

2. METODOLOGIJA

2.1 Razlozi za povećanje DC/AC odnosa

Predimenzioniranje PV elektrane podrazumeva instalisanje PV modula, nizova i polja unutar elektrane sa nominalnom jednosmernom snagom (izmerenoj pri standardnim testnim STC uslovima) koja je veća od nominalne izlazne snage pretvarača naizmenične struje. Odnos DC/AC, takođe poznat kao odnos panela prema veličini invertora („oversizing“) je uobičajen parametar pri projektovanju kako malih tako i velikih sistema.

Predimenzionisanje elektrane je poželjno iz sledećih razloga:

- Veća efikasnost invertora
- Fotonaponska elektrana postiže brže svoju nazivnu AC snagu, a ostaje duže priključena na mrežu u toku dana.
- Vrednosti projektovane insolacije se retko postižu (npr. u zimskim mesecima)
- Temperatura okoline je previsoka
- Zagađenje modula
- Suboptimalna orijentacija modula tokom dana (faktor se smanjuje značajno sa sistemima za praćenje)
- Degradacija modula: modul performanse opadaju godišnje pribl. 0,5%; posle 25 godina cca. Još uvek 80% originalne nominalne snage ostaje
- Gubici usled neusklađenosti („mismatch) prouzrokovani na primer gubicima u kablju

Kratko objašnjenje za pojedinačne razloge predimenzionisanja data je u nastavku:

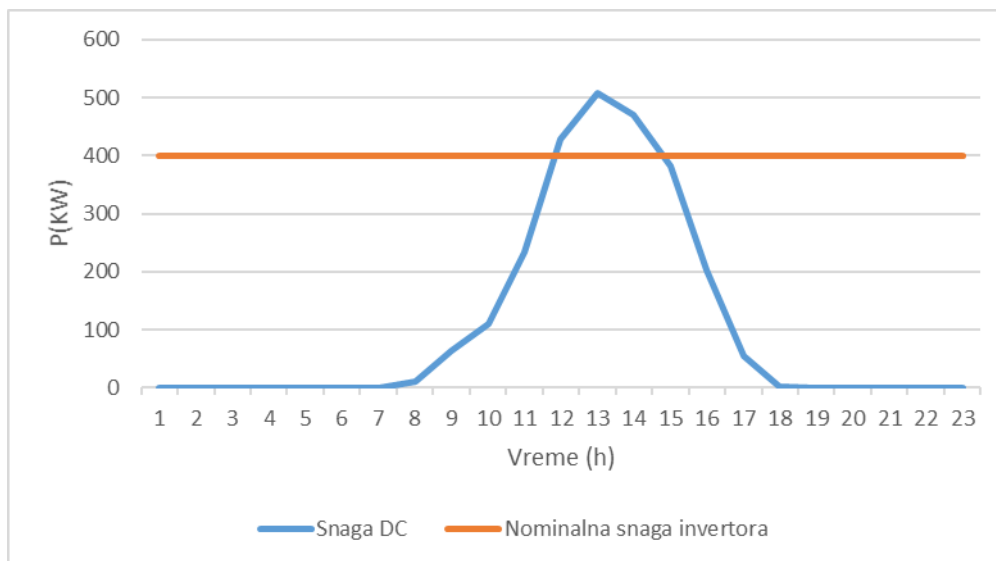
2.1.1. STC

Snaga, struja i napon PV modula su definisani pri Standardnim uslovima ispitivanja (STC) koji iznose:

- 25° C
- Koeficijent vazdušne mase AM = 1.5
- Insolacija 1000W/m²

Međutim, fotonaponski modul veoma retko radi u ovim uslovima u realnim operativnim scenarijima. Radni uslovi mogu da variraju tokom dana, a temperatura u velikoj meri utiče na izlaznu snagu PV niza („stringa“). Kako se temperatura PV niza povećava, njegov napon i snaga će se smanjiti. Obično u solarno podne (maksimalno sunčevo zračenje), PV niz će imati STC izlaznu snagu smanjenu za između 20-25%, zbog niza koji radi iznad 25°C. To bi značilo da bi u solarno podne, po vedrom sunčanom danu, PV sistem od 100kWp proizvodio približno 77kW (23% manje od nazivne snage).

Ako PV niz nikada neće isporučiti svoju nominalnu snagu, dimenzionisanjem pretvarača tako da odgovara tipičnoj vršnoj povećava se efikasnost tog pretvarača naizmenične struje. Na slici 1 prikazan je slučaj kada je za elektranu sa instaliranih 500 kWp postavljen inverter snage 400 kW. Energija se ne predaje u mrežu jedino u toku kratkog perioda „odsecanja“ vršne snage.



Slika 1 - Odsecanje vršne snage elektrane

2.1.2. Specifični troškovi isporučene energije

Predimenzioniranjem PV elektrane može se ostvariti niži trošak isporučene energije (€/kWh). Više panela će povećati troškove nabavke i modula i noseće konstrukcije, ali se povećava količina isporučene energije, što dovodi do niže specifične cene energije koju isporučuje sistem.

2.1.3. Manji troškovi invertora

Predimenzioniranjem PV elektrane može se koristiti pretvarač sa nižom snagom (dakle nižim troškovima). Shodno tome, ovo može smanjiti relativnu cenu pretvarača u poređenju sa ukupnim troškovima sistema.

2.1.4. Ograničeni prostor

Invertori ponekad moraju biti instalirani na tačno određenim lokacijama, bilo zbog zahteva investitora ili slova nadležnih preduzeća. To može značiti da ne bi bilo moguće instalirati onoliko pretvarača na lokaciji koliko bi bilo poželjno za sistem savršene veličine. Međutim, predimenzionisanjem PV elektrane moguće je postići skoro istu godišnju izlaznu energiju sa manje instaliranih pretvarača.

2.1.5. Maksimiziranje vrednost dnevne energije za investitora

Za preduzeće koje posluje tokom uobičajenog radnog vremena, vrednost dnevne energije iz njihovog fotonaponskog sistema može biti različita u zavisnosti od pojedinačnih okolnosti. PV izlaz se može koristiti da se izbegnu vršna opterećenja mreže ili da se nadoknade konstantna opterećenja koja mogu da se jave na lokaciji. U takvim slučajevima, predimenzioniranje fotonaponskih modula moglo bi preduzeću pružiti veću sigurnost u troškovima energije, posebno s obzirom na nisku cenu fotonaponskih modula na današnjem tržištu. Predimenzioniranjem PV niza, pretvarač može da dostigne svoj nazivni kapacitet naizmjenične struje ranije tokom dana i da nastavi da radi u tom trenutku do kasno popodne.

2.1.6. Veća fleksibilnost

Ponekad ako inverter koji više nije u garanciji pokvari, nije uvek moguće zameniti ga pretvaračem istog modela. U takvim slučajevima možda će biti potrebno kupiti i instalirati pretvarač druge izlazne snage naizmjenične struje. Instaliranjem pretvarača sa manjom izlaznom snagom naizmjenične struje, postojeći fotonaponski niz bi mogao biti bolje usklađen sa kapacitetom pretvarača, a troškovi zamene za vlasnika sistema svedeni na minimum.

2.1.7. Korišćenje istok-zapad orijentacije

Često se PV nizovi instaliraju da maksimiziraju izlaz energije i tako su nagnuti prema ekvatoru (okrenuti prema jugu na severnoj hemisferi, prema severu na južnoj hemisferi). Ponekad je, međutim, veća proizvedena energija

za instalaciju u smeru „istok – zapad“ što smanjuje snagu invertora, a povećava količinu isporučenej energije po jediničnom kW instalisanih fotonaponskih modula.

2.2. Ograničenje prilikom predimenzionisanja

Postoji nekoliko važnih faktora koja se moraju uzeti u obzir prilikom projektovanja i instaliranja posebno kod velikih fotonaponskih elektrana:

Najvažnija ulazna karakteristika koju ne bi trebalo prekoračiti je granica ulaznog napona. Invertori i njihove sastavne komponente su projektovani za određene nivoe ulaznog napona. Ako bi ulazni napon premašio ovu vrednost, to će gotovo sigurno dovesti do trenutnog kvara pretvarača. Kada se predimenzioniše PV niz, važno je nikada ne prekoračiti maksimalni ulazni napon pretvarača.

Takođe treba uzeti u obzir maksimalni radni opseg napona za praćenje tačaka maksimalne snage (MPPT), kako bi bili sigurni da PV niz neće izaći van tog opsega. Kada je napon PV niza izvan MPPT opsega napona, pretvarač nije u stanju da maksimizira performanse sistema.

Gubitak efikasnosti od pretvarača se ostvaruje pri povećanom grejanju. Inverter ima različitu radnu efikasnost pri različitim izlaznim snagama. Invertor od 30 kW na određenim nivoima ulaznog napona je između 0,5-1,0% manje efikasan pri punoj nazivnoj izlaznoj snazi u poređenju sa 60% ili 80% nazivne izlazne snage. Ovo bi moglo rezultirati više nego dvostruko većom proizvodnjom toplote pri 100% izlazne snage naizmjenične struje u poređenju sa 60% ili 80% izlazne snage naizmjenične struje. Kada se predimenzionira PV niz, pretvarač će češće raditi na ili blizu svoje nominalne izlazne snage, te stvaranje toplote iz pretvarača može stvoriti problem posebno ako su invertori instalirani u prostoriji gde disipacija toplote može biti ograničena.

Za visoku efikasnost važno je da invertori u PV elektranama rade isto toliko često što je moguće pod punim opterećenjem. Ovo može biti realizovano kroz inteligentno predimenzioniranje. Sa tehničkog stanovišta (odnos performansi) je oko 130% DC/ AC. Stoga je važno proceniti i ekonomske, a ne samo tehničke aspekte.

Sa izuzetkom instalacija na velikim visinama, maksimalno sunčevo zračenje snaga ostaje konstantna na oko 1.000 W/m². Međutim, poznati su efekti oblaka mogu dovesti do kratkotrajnog povećanja sunčevog zračenja PV modula, što je uzrokovano refleksijom sunčevog zračenja iz kumulusnih oblaka. Prema studiji [5], ovaj efekat može da poveća vrednost zračenja na do 25% više od uobičajenih 1.000 W/m².

Takođe, bitno je izabrati inverter koji zadovoljava tehnička ograničenja koji su projektovani za ekstra visoke DC/AC odnose kako bi izdržala i povećana opterećenja komponenti. Izvesni centralni invertori već mogu da izdrže PV nizove sa do 250% predimenzionisanja.

2.3. Ilustrativni primer

Radi ilustracije, u programskom paketu Helioscope izvršena je simulacija sistema na krovu zgrade, sa istim brojem panela (85 panela snage 410W postavljena pod uglom od 15° prema jugoistoku (azimutom od 135°) ali različitim inverterima. Rezultati su prikazani u tabelama 1 i 2.

Tabela 1 - Uporedni pregled gubitaka u sistemu

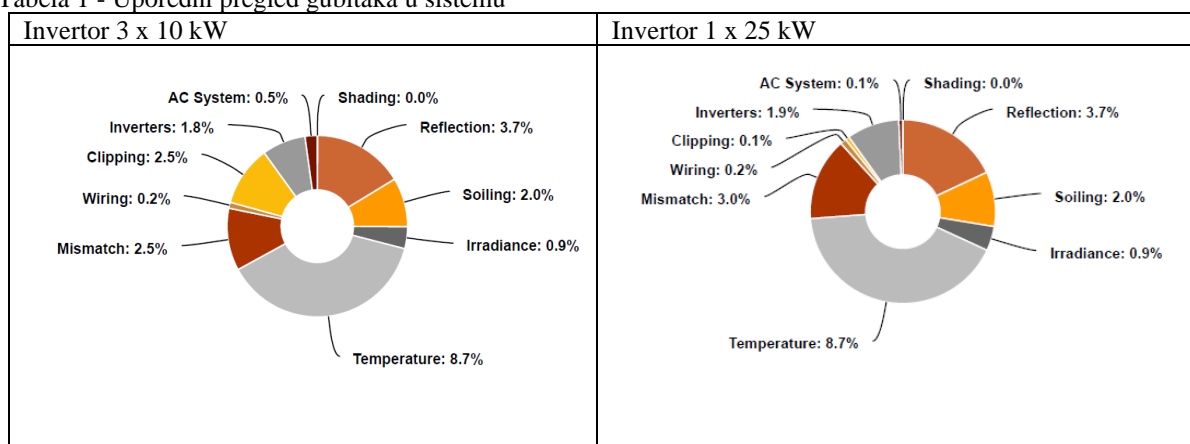


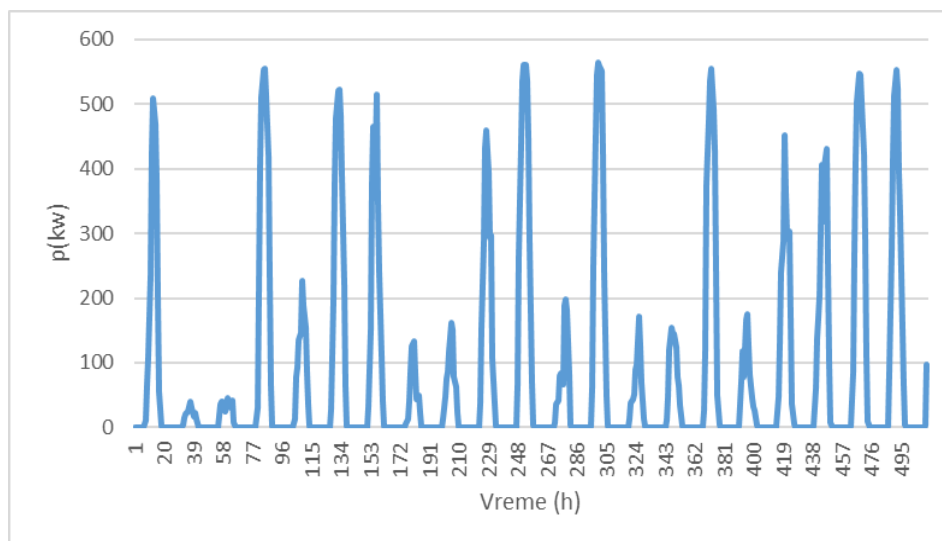
Tabela 2 - Uporedni pregled isporučene energije

Design	Design 1	Design 2
Module DCNameplate	34.9 kW	34.9 kW
Inverter ACNameplate	25.0 kWLoad Ratio: 1.39	30.9 kWLoad Ratio: 1.13
AnnualProduction	40.72 MWh	39.88 MWh
PerformanceRatio	80.8%	79.1%
kWh/kWp	1,168.5	1,144.3
Weather Dataset	TMY, 10km Grid, meteonorm(meteo	TMY, 10km Grid, meteonorm(meteo

Treba imati na umu da su gubici usled „Clippinga“ odnosno ograničenog DC izlaza zapravo 3 gubitka u jednom. Ovaj korak uključuje sve aspekte „clippinga“ – ne samo kliping prekomerne snage (tj. niz koji proizvodi više snage nego što pretvarač može da podnese), postoje još dva tipa klipinga: podnapon (prenizak za pretvarač) i prenapon (napon stringa je previsok za pretvarač).

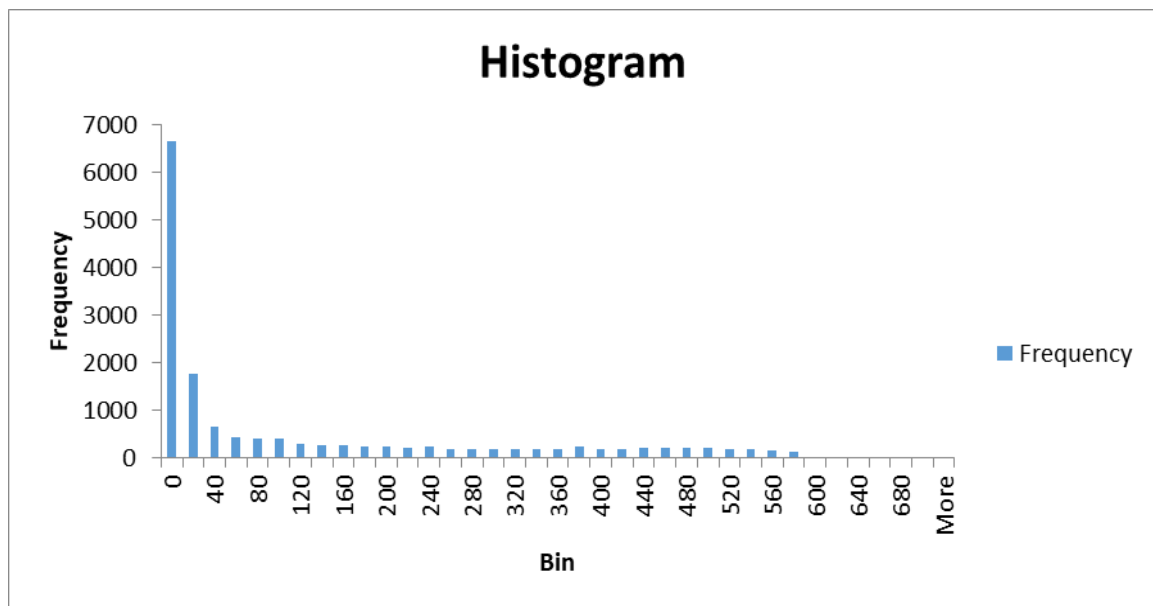
3. OPTIMIZACIJA SISTEMA

U toku godine, PV elektrana radi pod različitim operativnim i klimatskim uslovima. Ilustrativni primer izlazne DC snage jedne elektrane izlazne snage od 600 kWp za vremenski interval od desetak dana dat je na slici 2.



Slika 2 - Dijagram DC snage elektrane za kraći vremenski period

Sređivanjem podataka može da se formira histogram vrednosti ulazne DC snage (slika 2) iz kojih se vidi broj vremenskih intervala (na vertikalnoj osi prikazan je broj polusatnih intervala u toku jedne godine) za koji je postignuta određena DC snaga (na horizontalnoj osi). Vidljivo je da se maksimalna snaga postiže u kratkom periodu u toku godine.



Slika 3 - Histogram ostvarenih vrednosti DC snage

Cilj optimizacije je da se postigne optimum ukupnih prihoda elektrane u toku njenog životnog veka:

$$\text{Min D: } D = P - I - O \quad (1)$$

D – ukupna dobit tokom perioda eksploatacije

P – aktualizovani prihod od prodane energije

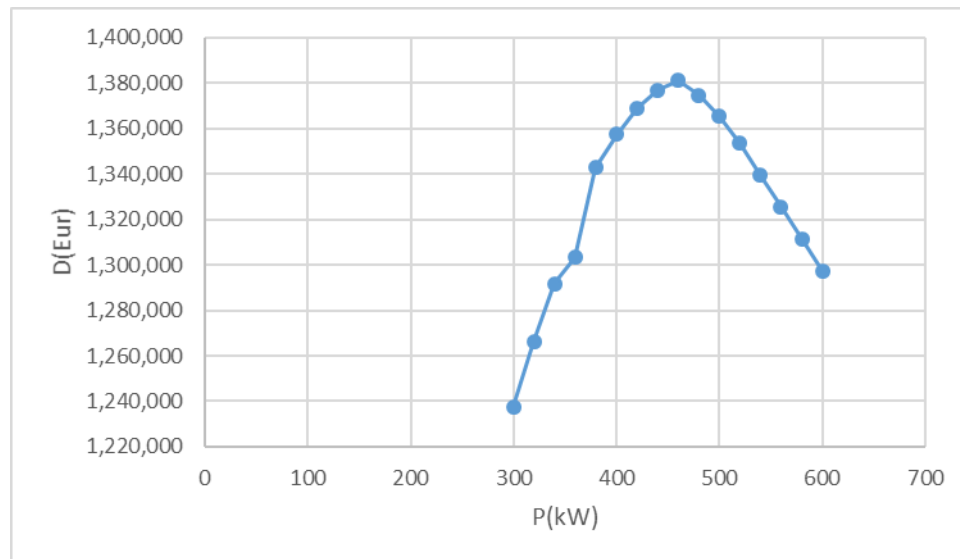
I – aktualizovani investicioni troškovi

O – aktualizovani operativnih troškovi elektrane

Za ulazne podatke elektrane prikazane u tabeli 3, dijagram vrednosti D za različite vrednosti veličina invertora data je na slici 4.

Tabela 3 - Ulazni podaci

Cena invertora	600 €/kW
Cena panela, noseće konstrukcije i ostale opreme	350 €/kW
Cena energije	90 €/MWh
Koeficijent diskontovanja	5%
Životni vek elektrane	25 godina
Instalisana DC snaga	700 kWp
Operativni godišnji troškovi	50 000 €



Slika 4 - Rezultati optimizacije

Analizom rezultata vidljivo je da postoji optimalna tačka pri kojoj se postiže maksimalna vrednost aktualizovane ukupne dobiti elektrane u toku njenog životnog veka. Ova vrednost od 1 380 000 € postiže se za vrednost invertora od 460 kW instalisane snage invertora, što predstavlja odnos od čak DC/AC = 1,52.€.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu, je na konkretnom primeru solarne elektrane na zemlji, snage 1 MW, detaljno predstavljen proračun snage fotonaponskih panela povezanih na invertore. Analiziran uticaj najvećeg i najmanjeg broja fotonaponskih panela, odnosno najveća i najmanja DC snaga, raspoređena na svakom invertoru ponaosob. Proračun proizvodnje električne energije na AC strani u zavisnosti od snage u fotonaponskim panelima prikazan je tabelarno. Na osnovu proračuna, odnosno minimalne i maksimalne snage u fotonaponskim panelima, za datu elektranu je definisan optimalan broj panela po jednom invertoru. Cilj rada je da se ukaže na potrebu za detaljnim proračunom broja panela po invertoru, sa svrhom najefikasnijeg iskorišćenja invertora u pogledu proizvodnje električne energije tokom eksploatacije solarne elektrane.

LITERATURA

- [1] Damien Vermeer DC/AC inverter oversizing ratio – what is the optimal ratio for Australian solar farms? APSRC 2020 (Melbourne)
- [2] Silvestro Cossu, Roberto Baccoli and Emilio Ghiani Utility Scale Ground Mounted Photovoltaic Plants with Gable Structure and Inverter Oversizing for Land-Use Optimization Energies 2021, 14, 3084. <https://doi.org/10.3390/en14113084>
- [3] Vladica Mijailović, “Distribuirani izvori energije: Princip rada i eksploatacioni aspekti”, Akademska Misao, Beograd, 2011.
- [4] Korišćenje sistema za skladištenje energije u cilju rasterećenja distributivne mreže, Studija rađena za potrebe JP EPS, Netico Solutions, Metronic, Beograd, 2021
- [5] SMA Oversizing whitepaper https://cdn.sma.de/fileadmin/content/global/docs/oversizing/Whitepaper_Oversizing_EN_180530_01.pdf?v=1652187056