

TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA OPRAVDANOSTI POSTAVLJANJA SOLARNIH PV PANELA NA DISTRIBUTIVNE TRANSFORMATORSKE STANICE

A. Janjić, Telvent DMS, Srbija
D. Kovačević, Institut „Nikola Tesla“, Srbija
B. Bratović, „NDC“ Srbija

UVOD

Proizvodnja električne energije iz solarnih ćelija, iako je u svetu u ogromnoj ekspanziji, u našoj zemlji gotovo i da ne postoji. Subvencionisanje cena za električnu energiju proizvedenu iz ovih izvora sigurno će doprineti većoj upotrebi sunčeve energije, čak i u domaćinstvima, ali ni u sadašnjim uslovima nema opravdanja za ovako slabo korišćenje najvećeg energetskeg resursa na planeti.

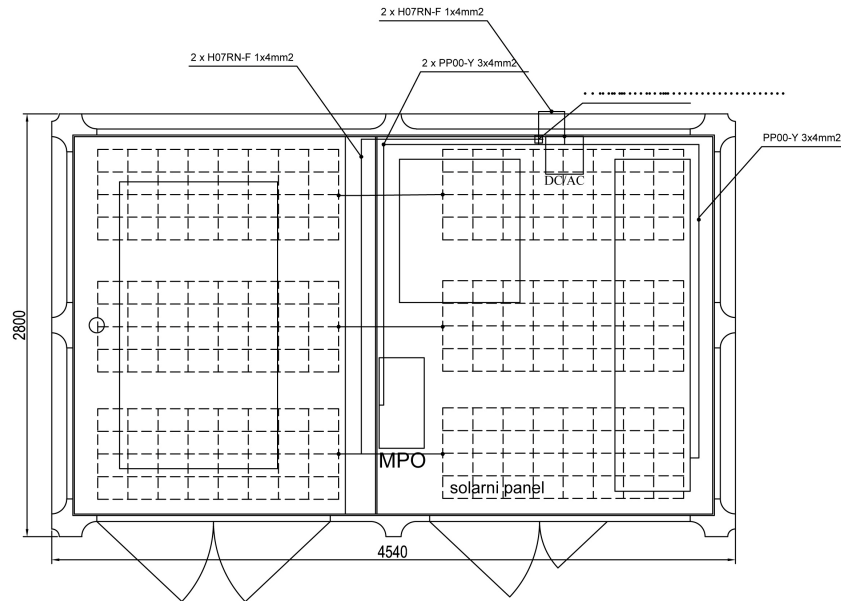
U svetskim distributivnim preduzećima, upotreba solarne energije pokazuje eksponencijalni rast tokom poslednjih dvadesetak godina. U Sjedinjenim Državama, instalisana snaga iz solarnih izvora dostići će 3000 MW u 2010. godini, dok je u Nemačkoj, uz godišnji porast snage od 40% već dostignuta instalisana snaga od 3,8 GW . Cena solarnih modula danas već dostiže cenu od 1400 €/kW, dok je cena kompletnog PV krovnog sistema danas već 2800 €/kW, dok se do 2020 godine očekuje da ova cena bude i prepolovljena [1-4].

Solarni paneli u distributivnoj mreži donose višestruku korist:

- smanjuju se gubici u distributivnoj mreži usled distribuiranih izvora smeštenih bliže potrošačima
- povlašćeni proizvođači energije iz obnovljivih izvora imaju pravo da energiju prodaju po subvencionisanim cenama
- moguće je obezbediti i autonomiju ovih izvora, za slučaj sigurnosnog napajanja određenih potrošača
- proizvodnjom energije iz obnovljivih izvora smanjuje se emisija gasova iz fosilnih goriva

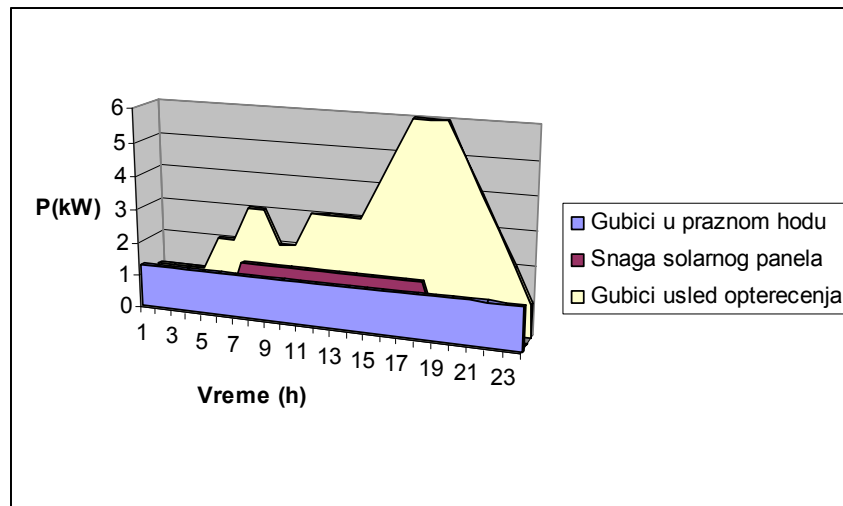
Sa druge strane, savremene konstrukcije invertora obezbedile su potpuno uklapanje solarnih generatora u distributivnu mrežu, te ne predstavljaju nikakav problem u pogledu uticaja na kvalitet napona u mreži (pre svega sadržaj harmonika i stvaranje flikera).

Iako je mogućnost primene PV panela u distributivnoj mreži vrlo široka, jedna od najpovoljnijih primena se svakako odnosi na smanjivanje gubitaka u distributivnim transformatorskim stanicama napona 20(10)/0,4kV. Ove stanice svojim gabaritima i lokacijom uglavnom obezbeđuju postavljanje panela snage od 1 - 2 kW, zavisno od tipa same stanice [5]. Orijentacija stanica takođe omogućuje da se paneli budu usmereni ka južnoj strani što omogućuje maksimalno iskorišćenje sunčanih sati u toku godine (Slika 1).



Slika 1. Šema postavljanja solarnih panela na distributivnu montažnu betonsku transformatorsku stanicu

Na slici 2. prikazana je, radi ilustracije, moguća raspodela snaga gubitaka u transformatoru snage 630 kVA uz postavljeni panel snage 1,5kW i pokrivanje ovih gubitaka u toku perioda osunčanosti.



Slika 2. Pokrivanje gubitaka energijom iz solarnih panela

U ovom radu je izvršena analiza opravdanosti ugradnje panela samo sa gledišta smanjivanja gubitaka u transformatorima. Izvršena je kapitalizacija smanjivanja gubitaka po jednom kW snage u praznom hodu, gubitaka usled opterećenja i izvršena analiza osetljivosti za određene uticajne faktore.

1. Kapitalizacija gubitaka usled praznog hoda

Pitanje koje se postavlja pred vlasnikom transformatorske stanice je: koliko je maksimalno dozvoljeno uložiti novca u smanjenje gubitaka po 1 kW smanjene snage gubitaka u praznom hodu, a da ta investicija bude ekonomski opravdana. Novčana vrednost gubitaka energije i snage po 1 kW u praznom hodu transformatora može se jednostavno prikazati proizvodom:

$$C_{p,h} = T \cdot c_E + j \cdot m \cdot c_P \quad 1)$$

T - posmatrani period (h)

c_E - cena energije (€/kWh)

c_P je cena obračunske snage (€/kW)

j - faktor jednovremenosti vršnog opterećenja potrošača i vršne snage panela.

m - broj obračunskih meseci u periodu koji se posmatra

Ušteda koja se ostvaruje u narednoj godini (svedena na početnu godinu) instalacije je jednaka zbiru uštede usled smanjenja utrošene energije i smanjenja vršne snage:

$$\Delta C_{p,h,1} = (T \cdot c_E + j \cdot 12 \cdot c_P) \cdot \frac{(1+p)}{(1+i)} \quad 2)$$

gde je:

p godišnji porast cene snage i energije ,

i diskontna stopa,

Maksimalna ušteda se ostvaruje pod uslovom da maksimalna obračunska snaga nastaje u vidnom delu dana, kada je faktor jednovremenosti j jednak jedinici, što je za industrijske pogone uglavnom uvek ispunjeno.

Suma ušteda u n godina (označićemo je sa X) jednaka je geometrijskoj progresiji sa članom $(1+p)/(1+i)$, tako da je aktualizovana vrednost akumuliranih ušteda u n godina :

$$X = (T \cdot c_E + 12 \cdot c_P) \cdot \frac{\left(\frac{1+p}{1+i}\right)^n - 1}{\left(\frac{1+p}{1+i} - 1\right)} \quad 3)$$

Da bi projekat bio ekonomski isplativ, početna vrednost investicije mora da bude manja od ukupnih aktualizovanih ušteda energije.

2. Kapitalizacija gubitaka usled opterećenja

Gubici usled praznog hoda su konstantni kada je transformator pod naponom i praktično su nezavisni od opterećenja transformatora. Suprotno gubicima u praznom hodu, gubici usled opterećenja variraju sa kvadratom trenutne struje, koja može da se menja u širokim granicama. Energija tokom godine usled promenljivih gubitaka je zbir energija u malim vremenskim intervalima Δt u toku godine. Pretpostavimo da je ovaj interval toliko mali da je struja opterećenja I_i u tom intervalu konstantna. Tada će gubici energije u tom intervalu iznositi:

$$\Delta W_i = Const \cdot I_i^2 \cdot \Delta t \quad 4)$$

Odnosno, za ceo posmatrani period:

$$\Delta W = Const \cdot \sum I_i^2 \cdot \Delta t \quad 5)$$

Radi lakšeg računanja, moguće je uvesti i novu veličinu - konstantnu struju koja proizvodi iste gubitke kao i zbir struja u pojedinačnim intervalima i nazovimo je *ekvivalentna struja*. Ova struja je jednaka konstantnoj

struji opterećenja koja izaziva iste gubitke tokom posmatranog perioda T, kao i stvarno opterećenje transformatora.

$$I_{ekv}^2 = \frac{\sum I_i^2 \cdot \Delta t}{T} \quad 6)$$

Gubici usled opterećenja proporcionalni su kvadratu odnosa ekvivalentne i nominalne struje (I_{ekv}/I_n), pa će I_{ekv} biti izraženo u relativnim jedinicama u odnosu na nominalnu struju transformatora I_n . Gubici usled opterećenja su onda proporcionalni veličini I_{ekv}^2

Analogno prethodnom odeljku, cilj je naći kapitalizovanu vrednost za gubitke usled opterećenja, odnosno odrediti kolike su uštede na smanjenju 1 kW snage gubitaka usled opterećenja akumulirane tokom određenog broja godina. Razmatraćemo opšti slučaj da pored cene energije i struja opterećenja transformatora raste sa godišnjom stopom označenom sa z. Zbog toga ćemo ekvivalentu struju u početnoj godini označiti sa I_{ekv1}

Ušteda za prvu godinu smanjenja gubitaka iznosi:

$$\Delta C_{opt.1} = I_{ekv1}^2 \cdot T \cdot c_E \quad 7)$$

Za drugu godinu, ušteda iznosi

$$\Delta C_{opt.2} = \frac{I_{ekv1}^2 \cdot (1+z)^2 \cdot T \cdot c_E \cdot (1+p)}{1+i} \quad 8)$$

Dok za n-tu godinu, ušteda iznosi:

$$\Delta C_{opt.n} = \frac{I_{ekv1}^2 \cdot [(1+z)^2]^{n-1} \cdot T \cdot c_E \cdot (1+p)^{n-1}}{(1+i)^{n-1}} \quad 9)$$

Prethodni izraz predstavlja geometrijsku progresiju sa faktorom q:

$$q = \frac{(1+z)^2 \cdot (1+p)}{1+i} \quad 10)$$

Dok je zbir geometrijske progresije:

$$S_n = \frac{q^n - 1}{q - 1} = \frac{\left[\frac{(1+z)^2 (1+p)}{1+i} \right]^n - 1}{\left[\frac{(1+z)^2 (1+p)}{1+i} \right] - 1} \quad 11)$$

Saglasno tome, zbir ušteda u toku od n godina iznosi:

$$\Delta C_{opt.} = I_{ekv1}^2 \cdot T \cdot c_E \cdot S_n \quad 12)$$

Maksimalno dozvoljenu vrednost investicije u smanjenje gubitaka usled opterećenja po 1 kW označićemo sa Y i odrediti iz sledećeg izraza:

$$Y \leq \Delta C_{opt} \quad 13)$$

U gornjim izrazima nije uračunat efekat uštede na osnovu smanjivanja vršne snage, budući da je on već uvažan u analizi ušteda gubitaka u praznom hodu.

3. Primer proračuna

U analizi efekata uštede, moguće je analizirati više različitih slučajeva, zavisno od vlasništva nad transformatorskom stanicom, kao i načinu merenja energije i snage. Kao dva tipična slučaja, analiziraćemo potrošača, u vlasništvu transformatorske stanice, u tarifnom stavu: merenje na srednjem naponu, kao i slučaj da je stanica u vlasništvu elektroprivrednog preduzeća.

3.1. Potrošač kao vlasnik stanice

Polazeći od izraza 1-13) lako je odrediti maksimalnu dozvoljenu vrednost investicije u solarne panele za različite slučajeve. U prvom slučaju, vlasnik transformatorske stanice je potrošač, koji cenu gubitaka ekvivalentira sa nabavnom cenom energije. Pretpostavimo sledeće polazne podatke:

T - godišnji broj sunčanih sati za koje se vrši smanjivanje gubitaka:	2500
c_E - cena aktivne energije na srednjem naponu:	0,035 €/kWh
c_P - cena obračunske snage na srednjem naponu:	5 €/kW
p - godišnji porast cene električne energije	8%
i - diskontna stopa	7%
n - period otplate	15 godina
z - godišnja stopa porasta opterećenja	3%
l_{ekvp} - relativna vrednost ekvivalentne struje	0,4 r.j

Za date vrednosti, primenom izraza 3) i 13), dobijamo vrednost od $X = 2\,363$ €/kW i $Y = 353$ €/kW. Prikazane vrednosti odnose se na slučaj merenja na srednjem naponu. Za slučaj da je potrošač vlasnik stanice, a da se merenje vrši na niskom naponu, uštede su još i veće, jer su cene i snage i energije veće za tarifni stav merenja na niskom naponu. Snaga solarnih panela, međutim, u tom slučaju ne pokriva gubitke u transformatoru, već se njihova upotreba optimizuje prema dnevnom dijagramu opterećenja potrošača.

Razmotrićemo i osetljivost ovih izraza na promenu tri parametra: period isplativosti, godišnju stopu porasta cene energije i diskontnu stopu.

Tabela 1. Zavisnost dozvoljenih troškova od promene ulaznih parametara

n (god)	X (€/kW)	Y (€/kW)	p (%)	X (€/kW)	Y (€/kW)	i	X (€/kW)	Y (€/kW)
pri p = 8% i=7%			n=15 i=7%			pri p = 10% n=15		
10	1474	195	7	2221	327	7	2702	412
12	1769	237	8	2361	353	8	2523	381
15	2211	327	9	2525	381	9	2360	353
17	2505	397	10	2702	412	10	2211	327
20	2947	519	11	2894	446	11	2078	305

Iz tabele 1, vidljivo je da je dominantna vrednost dozvoljenih investicija po 1 kW smanjenja snage gubitaka u praznom hodu, u odnosu na gubitke usled opterećenja. Ova vrednost zavisi najviše od perioda

isplativosti panela. Nešto manja, iako prisutna, je zavisnost od cene energije i diskontne stope. Imajući u vidu da je analiza rađena na stranu sigurnosti, sa pesimističkim vrednostima ulaznih parametara (prosečni vek panela je dvadeset godina, dok se očekuje i veći porast cena od desetak procenata godišnje), i uz trenutnu vrednost troškova instalacije panela (oko 3000 €/kW), vidljivo je da je ova investicija opravdana, za široki opseg ulaznih parametara.

Pravi izbor optimalne vrednosti solarnih panela zavisi pre svega od instalisane snage transformatora. Za, npr, transformator od 630 kVA, gubici u praznom hodu iznose 1,3 kW, tako da bi instalacija panela od 1-1,3 kW u celosti pokrila ove gubitke, te se analiza vrši samo prema izrazu 3). Za manje snage transformatora, snaga panela od 1 kW pokrivala bi, pored gubitaka u praznom hodu i gubitke usled opterećenja, te se optimizacija vrši na osnovu realnog dijagrama opterećenja.

3.2. Elektroprivreda kao vlasnik stanice

U razvijenim zemljama, solarne elektrane su uglavnom vlasništvo potrošača. Međutim, distributivna preduzeća sve više i sama postaju vlasnici ovih elektrana iz razloga potpune kontrole nad proizvodnjom, eksploatacijom i održavanjem ovih postrojenja, ali i bržim povraćajem kapitala. U slučaju da je vlasnik elektrane vertikalno integrisano preduzeće, poput EPS-a, cena gubitaka ne ekvivalentira se sa nabavnom cenom energije, već predstavlja godišnji trošak dodatnih kapaciteta elektroenergetske mreže da bi se ovi gubici, zajedno sa potrošnjom, preneli kroz sistem.

Sledstveno tome, godišnji troškovi gubitaka snage i energije iznose:

$$C = j\Delta p_{cu} \cdot c_p + \Delta w c_w \quad 14)$$

, gde je j faktor jednovremenosti vršne snage posmatranog dela mreže u vršnom opterećenju celog konzuma

Izračunavanje specifične cene gubitaka snage zasnovano je na godišnjim troškovima kapitala investiranog u objekte:

$$c_p = (p_d + p_a + p_o) \cdot I \quad 15)$$

- c_p - specifična cena gubitaka snage
- p_d - godišnja stopa dobiti
- p_a - godišnja stopa amortizacije kapitala
- p_o - godišnja stopa održavanja objekata
- I - nabavna vrednost za ekvivalentnu elektranu i deo mreže koji napaja posmatranu distributivnu mrežu

Za prosečne uslove u Srbiji, ova vrednost iznosi 157 €/kW (6). Specifična cena gubitaka energije jednaka je troškovima goriva utrošenog za proizvodnju energije, uvažavajući da su svi ostali troškovi srazmerno mali u odnosu na troškove proizvodnje energije. Za odnos termo i hidro kapaciteta u Srbiji, ova vrednost iznosi 0,025 €/kWh (6). Perspektiva EPS-a kao vlasnika značajno menja i prirodu i vrednost ostalih ulaznih parametara. Naime, realno je očekivana niža diskontna stopa, jer ona reflektuje preferenciju vlasnika da novac radije uloži danas nego u budućnosti. Period otplate takođe može biti duži, čak i da se proširi na ukupni vek trajanja elektrane, tako da je u sledećem primeru usvojena vrednost od 20 godina.

T - godišnji broj sunčanih sati za koje se vrši smanjivanje gubitaka:	2500 h
c_p - specifična cena gubitaka snage	157 €/kW
c_E - specifična cena gubitaka energije	0,025 €/kWh
p - godišnji porast cene električne energije	3%
i - diskontna stopa	7%
n - period otplate	20 godina
z - godišnja stopa porasta opterećenja	3%
I_{ekvp} - relativna vrednost ekvivalentne struje	0,6 r.j

Za navedene ulazne parametre, vrednosti dozvoljenih investicija iznose: $X = 2523 \text{ €}$ i $Y = 422 \text{ €}$, što takođe potvrđuje opravdanost ove investicije.

ZAKLJUČAK

U radu je prikazana tehnoekonomska analiza opravdanosti ugradnje solarnih panela na distributivne transformatorske stanice, samo sa gledišta smanjivanja gubitaka u transformatorima, kako gubitaka u praznom hodu, tako i gubitaka usled opterećenja. Izvršena je i analiza osetljivosti na različite parametre, pri čemu se zaključuje da je ugradnja solarnih panela opravdana investicija, kako za privatnog investitora, tako i za elektroprivredu u celini, za širi opseg ulaznih parametara i to već sa gledišta smanjivanja gubitaka. Rezultati pokazuju veliku zavisnost maksimalno dozvoljene sume od perioda isplativosti, godišnje stope porasta cene električne energije i diskontne stope, ali čak i za trenutne vrednosti ovih parametara u Srbiji, kao i za pesimističke prognoze, ova investicija može da bude opravdana. Ukoliko se vrednuju i efekti prodaje energije iz obnovljivih izvora po povlašćenim cenama, onda ugradnja panela ima puno ekonomsko opravdanje i za mnogo širi opseg ulaznih parametara.

LITERATURA

1. EPRI, **Distributed Photovoltaics, Utility Integration Issues and Opportunities**, August, 2008
2. J. Winebrake, **Alternate Energy: Assessment and Implementation Reference Book**, Marcel Dekker Inc., New York, 2004.
3. B. Sorensen, **Renewable Energy**, Elsevier Science, 2003.
4. M. R. Patel, **Wind and solar power systems**, CRC Press, Boca Raton, 1999.
5. NDC, **Projekat ugradnje solarnih panela na TS 10/0, 4 kV**, Jun, 2009.
6. Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", **Studija perspektivnog dugoročnog razvoja električnih mreža naponskih nivoa 110kV, 35 kV i 10 kV na području EPS JP "Elektrošumadija" Kragujevac, br. 105010,**