

EKONOMSKI EFEKTI MERA ZA SMANJENJE GUBITAKA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI U OKVIRU PRELASKA NA ODRŽIV AKTIVAN SISTEM

ECONOMIC EFFECTS OF MEASURES FOR REDUCING LOSSES IN ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORK WITHIN THE TRANSITION TO A SUSTAINABLE ACTIVE DISTRIBUTION SYSTEM

Vladica MIJAILOVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Čačak
Aleksandar RANKOVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Čačak

KRATAK SADRŽAJ

U radu je dat pregled ekonomskih efekata mera koje su, u manjem ili većem obimu, primenjene u razvijenim državama širom sveta, a koje kao rezultat imaju značajno smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži. Analizirano je ukupno 6 mera:

- Primena pametnih brojila električne energije,
- Zamena postojećih transformatora jedinicama sa amorfnim jezgrom,
- Smanjenje opterećenja energetskih transformatora,
- Povećanje poprečnog preseka postojećih vodova,
- Skraćenje NN-izvoda produžavanjem SN-izvoda i pomeranje TS ka sredini izvoda,
- Promena konfiguracije sa sadašnjeg koncepta napajanja „jedna TS-više izvoda“ na koncept napajanja „jedna TS-jedan izvod“.

Rezultati sprovedenih analiza ukazuju na potpunu opravdanost primene navedenih mera u našoj državi.

Ključne reči: distributivna mreža- gubici- rekonfiguracija - isplativost.

ABSTRACT

This paper provides an overview of the economic effects of measures that have been implemented to varying degrees in developed countries worldwide, resulting in a significant reduction of losses in the electrical distribution network. The following measures have been analyzed:

- Implementation of smart electricity meters,
- Replacement of existing distribution transformers with units featuring amorphous cores,
- Reducing the loads of distribution transformers by installing units of higher rated power,
- Increasing the cross-sectional area of existing conductors,
- Shortening low-voltage feeders by increasing the length of the medium-voltage feeders and shifting the supplying substation towards the middle of the feeder,
- Change in the configuration from the current "one substation-multiple feeders" power supply concept to the "one substation-one feeder" power supply concept.

The results of the performed analyses indicate that the implementation of these measures in our country is absolutely justified.

Key words: electrical distribution network- losses- reconfiguration- profitability.

Vladica Mijailović, vladica.mijailovic@ftn.kg.ac.rs
Aleksandar Ranković, aleksandar.rankovic@ftn.kg.ac.rs

1. UVOD

Pre nego što je intenzivirana upotreba distribuiranih izvora, distributivna mreža je tretirana kao pasivan dodatak ostatku EES-a, odnosno nije bila predmet interesovanja po pitanju održavanja i osavremenjavanja. Kada je u

pitanju konfiguracija, distributivna mreža u Srbiji je veoma slična mrežama u državama Evropske Unije. Međutim, postoje tri parametra po kojima se naša mreža bitno razlikuje:

1) Elementi su veoma stari; 2) Gubici su veoma visoki i 3) Prosečno opterećenje naših energetskih transformatora je povoljnije od prosečnog opterećenja transformatora u EU.

Na jednom od prethodnih savetovanja smo prezentovali pogonsku statistiku iz velikog broja država, koje su svoje distributivne sisteme, u manjoj ili većoj meri, rekonstruisale i postigle veoma visok stepen održive efikasnosti.

U ovom radu analiziraćemo finansijske efekte nekih mera čijom primenom se bitno smanjuju gubici električne energije (tehnički i gubici zbog neovlašćene potrošnje).

2. FINANSIJSKI EFEKTI PRIMENE MERA ZA SMANJENJE GUBITAKA

Pre nego što pokažemo rezultate sprovedenih analiza, navešćemo neke od ulaznih podataka:

- proračun je rađen za cenu električne energije od $0,2 \text{ EUR}/\text{kWh}$;

- Jedan procenat gubitaka električne energije iznosi $300 \cdot 10^6 \text{ kWh}/\text{god}$, što košta $60 \cdot 10^6 \text{ EUR}/\text{god}$;

- Za cenu opreme je usvojeno da je jednaka maloprodajnoj ceni opreme kod velikih evropskih proizvođača;

- Kompenzacija reaktivne energije nije razmatrana, jer je odavno pokazana njena opravdanost. Investicija u kompenzaciju reaktivne energije se otplati za manje od godinu dana.

Na kraju, kada je u pitanju konfiguracija distributivne mreže u Srbiji, statistički podaci su sledeći:

- Broj TS SN/NN oko 35000,

- Prosečna instalisana snaga 376 kVA,

- Prosečan stepen opterećenja $m=0,25$,

- Ukupan broj NN-izvoda 166000,

- Prosečna dužina NN-izvoda 0,672 km,

- Prosečan broj NN-izvoda po TS: 5.

2.1 Primena pametnih brojila električne energije

Ugradnjom pametnih brojila (brojila sa mogućnošću daljinskog očitavanja) se eliminišu gubici zbog neovlašćene potrošnje, troškovi fizičkog očitavanja brojila, zbog naplate potrošene električne energije i omogućava se lakše upravljanje mrežom.

U EU je planirano da se do 2030. godine kod 92% klijenata ugrade pametna brojila. Kod 266 miliona potrošača treba izvršiti ugradnju, po prosečnoj ceni od 153,3 € po brojilu. Ugradnja pametnih brojila na oko 2 miliona mernih mesta u Srbiji bi koštala oko 300 miliona evra. Ukoliko bi se na ovaj način eliminisala neovlašćena potrošnja u visini od 1% godišnje potrošnje, ova investicija bi se otplatila za oko 5 godina, pri čemu nije uzeta u obzir ušteda zbog eliminacije troškova očitavanja brojila, a što se radi jednom mesečno.

2.2 Smanjenje opterećenja i zamena energetskih transformatora

Tipično, $\frac{1}{3}$ ukupnih gubitaka u EES-e čine gubici u energetskim transformatorima (ET), pri čemu 66% tih gubitaka čine fiksni gubici (gubici praznog hoda ET).

Stepen iskorišćenja iznosi 99,4% pri opterećenju $(0,4 \div 0,5) \cdot S_n$.

U zemljama EU prosečno opterećenje transformatora u distributivnoj mreži je 18,9%, pri čemu je stepen iskorišćenja 98,38%.

U Srbiji prosečno godišnje opterećenje energetskih transformatora SN/NN je 25%.

Gubici snage u transformatoru se sastoje od:

- gubitaka u bakru P_{Cu} , koji zavise od opterećenja, i

- gubitaka u gvožđu P_{Fe} , koji su nezavisni od opterećenja.

Pri naznačenom opterećenju S_n gubici u bakru i gvožđu su P_{Cum} i P_{Fen} , respektivno. ($P_{Fe} \approx P_{Fen}$)

Pri opterećenju transformatora snagom S gubici snage u ET iznose:

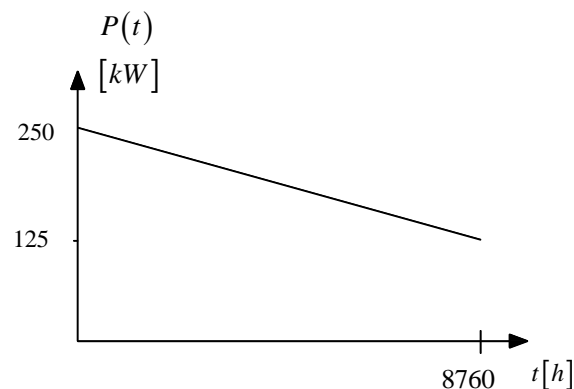
$$P_{gub} = P_{Fe} + P_{Cum} \cdot \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \quad (1)$$

Maksimalno opterećenje energetskih transformatora u Srbiji je 80% naznačene snage.

Gubici snage $\Delta P_{Cu}(t)$ i energije $\Delta W_{Cu, god}$ u bakru za tipični dijagram opterećenja energetskog transformatora, sl.1, iznose:

$$\Delta P_{Cu}(t) = \frac{P_{Cum}}{S_{nT}^2} P(t)^2 \quad (2)$$

$$\Delta W_{Cu, god} = \int_0^{8760} \Delta P_{Cu}(t) dt = \frac{P_{Cum}}{S_{nT}^2} \int_0^{8760} P(t)^2 dt \quad (3)$$



Slika 1 - Linearizovani godišnji dijagram trajanja opterećenja energetskog transformatora

U sprovedenim analizama je pokazano da je opravdano usvojiti kriterijum, kao u Nemačkoj, po kome maksimalno opterećenje energetskih transformatora ne prelazi vrednost od 60% naznačene snage. Takođe, ekonomski je opravdano koristiti transformatore sa amorfnim jezgrom umesto transformatora standardne konstrukcije. Podaci o gubicima u gvožđu i gubicima u bakru pri naznačenom opterećenju u pomenutim transformatorima navedeni su u Tabeli 1.

Tabela 1 - Gubici u gvožđu i gubici u bakru pri naznačenom opterećenju u energetskim transformatorima standardne konstrukcije i u transformatorima sa amorfnim jezgrom

S_n [kVA]	P_{Fe} [W]	P_{Cum} [W]	Energetski transformatori standardne konstrukcije
315	600	5350	
400	750	6000	
630	1030	8400	
1000	1350	12500	
S_n [kVA]	P_{Fe} [W]	P_{Cum} [W]	Energetski transformatori sa amorfnim jezgrom
315	160	3650	
400	220	3850	
630	300	5060	
1000	500	6530	

-Zamena postojećih transformatora jedinicama sa amorfnim jezgrom

Dakle, u Srbiji ima oko 35000 energetskih transformatora SN/NN, prosečne instalisane snage 376 kVA (nije baš najtačnija aproksimacija, ali ovo je približno 400 kVA) i prosečnog stepena opterećenja 0,25.

Gubici u 35000 transformatora iznose:

$$W_{ET, sada} = 35000 \cdot (0,75 + 6 \cdot 0,25^2) \cdot 8760 =$$

$$= 344,925 \cdot 10^6 \text{ kWh / god}$$

Ako ovaj iznos predstavlja trećinu gubitaka, ukupni tehnički gubici su 3,45%.

Ukoliko bismo sve postojeće transformatore zamenili transformatorima sa amorfnim jezgrom gubici bi iznosili:

$$W_{ET, amorfni} = 35000 \cdot (0,22 + 3,85 \cdot 0,25^2) \cdot 8760 =$$

$$= 141,227 \cdot 10^6 \text{ kWh} / \text{god}$$

Godišnje smanjenje gubitaka bi bilo: $\Delta W_{transf} = 344,925 \cdot 10^6 \text{ kWh} - 141,227 \cdot 10^6 \text{ kWh} = 203,7 \cdot 10^6 \text{ kWh}$

Jedna TS sa jednim ET sa amornim jezgrom, 400 kVA, košta oko 15000 EUR.

Za usvojenu cenu električne energije od $0,2 \frac{\text{EUR}}{\text{kWh}}$ prost period otplate bi bio:

$$\frac{35000 \cdot 15000 \text{ EUR}}{203,7 \cdot 10^6 \frac{\text{kWh}}{\text{god}} \cdot 0,2 \frac{\text{EUR}}{\text{kWh}}} = 12,88 \text{ god} .$$

Ovde je zanemarena preostala vrednost opreme koja bi mogla da se proda kao „staro gvožđe“.

(Za stepen opterećenja transformatora od 0,5 period otplate bi bio 8 godina.)

- Zamena postojećeg ET jedinicom veće snage radi smanjenja vršnog opterećenja sa 80% naznačene snage na 60% naznačene snage.

Novi energetski transformator će biti sa amornim jezgrom, njegova cena je oko 30% viša u odnosu na cenu ET klasične konstrukcije.

Na primer, neka je potrebno zameniti ET klasične konstrukcije, snage 315 kVA čije je vršno opterećenje 80%, dakle $315 \text{ kVA} \cdot 0,8 = 252 \text{ kVA}$. Ovo opterećenje će predstavljati 63% naznačene snage za ET od 400 kVA.

- Za ET klasične konstrukcije, snage 315 kVA: $P_{Fe} = 0,6 \text{ kW}$, $P_{Cu,n} = 5,35 \text{ kW}$,

- Za ET sa amornim jezgrom, snage 400 kVA: $P_{Fe} = 0,22 \text{ kW}$, $P_{Cu,n} = 3,85 \text{ kW}$.

Za dati dijagram opterećenja godišnji gubici energije u klasičnom transformatoru snage 315 kVA su 22456 kWh.

Gubici energije u transformatoru snage 400 kVA sa amornim jezgrom su: 9603 kWh, što znači da je godišnje smanjenje gubitaka 12853 kWh.

Vrednost godišnje uštede iznosi: $12853 \text{ kWh} \cdot 0,2 \frac{\text{EUR}}{\text{kWh}} = 2570,6 \frac{\text{EUR}}{\text{god}}$. Uz zanemarenje preostale vrednosti zamenjene opreme period otplate ove investicije je $\frac{15000}{2570,6} = 5,83 \text{ god}$.

2.3 Povećanje poprečnog preseka postojećih vodova

Neka je $I_{dT,a}$ -tablična vrednost trajno dozvoljene struje provodnika poprečnog preseka a . Ako je m -prosečan stepen opterećenja, gubici električne energije ΔW_{gub} u toku godine iznose:

$$\Delta W_{gub} = \frac{3 \cdot R \cdot (m \cdot I_{dT,a})^2 \cdot 8760}{1000} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{god}} \right) \quad (4)$$

gde je $R[\Omega]$ -aktivna otpornost provodnika date dužine.

Analize su urađene za provodnike od aluminijuma.

Ako se, u proseku, iz jedne TS napaja 5 izvoda, za stepen opterećenja TS od $m = 0,25$ prosečna vrednost struje kroz jedan izvod je:

$$\frac{1}{5} \cdot \frac{376000}{\sqrt{3} \cdot 400} \cdot 0,25 = 27,16 \text{ A} .$$

U 166000 izvoda, dužine 0,672 km, gubici energije u toku godine iznose:

$$W_{vodovi} = 166000 \cdot 0,672 \cdot 8760 \cdot 3 \cdot \frac{r \cdot 27,16^2}{1000} \text{ kWh} \quad (5)$$

Pod pretpostavkom da su svi izvodi istog poprečnog preseka i izvedeni od Al-kablova (SKS), izračunati su gubici za pojedine preseke vodova kao i ukupni gubici, Tabela 2.

Tabela 2 - Godišnji gubici u vodovima i ukupni gubici (zbir gubitaka u vodovima i ET)

Poprečni presek izvoda, mm^2	$W_{vodovi}, 10^6 kWh$	$W_{vodovi} + W_{ET,sada}, \%$
35	2249,01	8,64
50	1665,14	6,70
70	1152,62	4,99
95	832,57	3,92
120	659,57	3,35
150	536,30	2,94

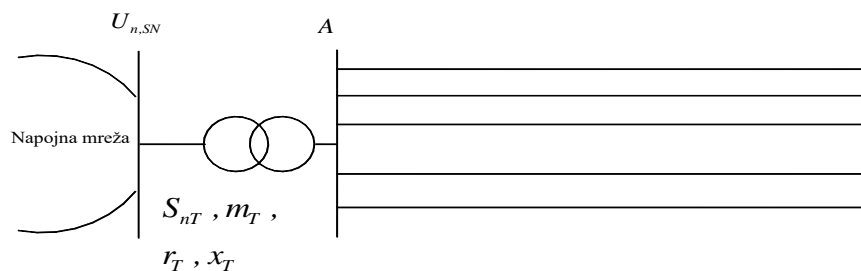
Na osnovu podataka iz Tabele 2 i maloprodajnih cena kablova datog poprečnog preseka, izračunati su prosti periodi otplate investicije ako bismo postojeće kablove zamenili kablovima većeg poprečnog preseka, Tabela 3.

Tabela 3 - Prosti periodi otplate investicije ako bismo postojeće kablove zamenili kablovima većeg poprečnog preseka (1km kabla košta (5000 ÷ 15000) EUR .)

Poprečni presek postojećeg izvoda, mm^2	Poprečni presek, mm^2 , kojim će biti zamenjen postojeći				
	50	70	95	120	150
	Period otplate, <i>god.</i>				
35	5,8	3,8	4	4,5	4,8
50		8,2	6,8	7,1	7,3
70			17,7	14,4	13,6
95				41	27,8
120					66,8

2.4 Skraćenje NN-izvoda produžavanjem SN-izvoda uz zamenu postojećih ET SN/NN veće snage sa više ET SN/NN manje snage, po principu „jedan NN izvod- jedan ET“

Prema trenutnom stanju, jedna TS, prosečne instalisane snage 376 kVA, napaja 5 izvoda prosečne dužine 0,672 km, sl.2.



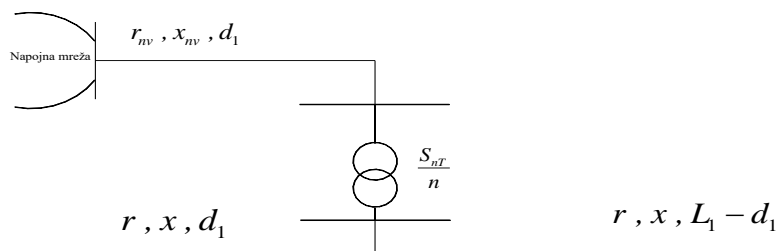
Sl.2 TS SN/NN jednim ET iz koje se napaja 5 NN-izvoda

Za trenutnu konfiguraciju, sl.2, i opterećenje godišnji gubici po jednoj TS su (gubici u ET i u 5 izvoda):

$$W_{1ET+5izvoda} = 8760 \cdot (0,75 + 6 \cdot 0,25^2) + 5 \cdot 0,672 \cdot 3 \cdot \frac{r \cdot 27,16^2}{1000} \cdot 8760 = 9855 + 65136,46 \cdot r \quad , \quad \frac{kWh}{god} \quad (6)$$

Analizirajmo sada sledeću konfiguraciju: Umesto da se n NN-izvoda napaja iz jednog ET naznačene snage S_{nT} usvojicemo da se svaki izvod napaja iz TS naznačene snage $\frac{S_{nT}}{n}$ i da je TS postavljena na sredini izvoda. Dakle, umesto konfiguracije na sl.2 ($S_{nT} = 400 kVA, n = 5$), predlažemo da se, u proseku, svaki izvod napaja iz

jednog transformatora, sa amorfnim jezgrom, naznačene snage 80 kVA pri čemu se TS nalazi na približno sredini jednog izvoda, sl.3.



Sl.3 Predložena konfiguracija napajanja NN-izvoda

Gubici za 5 TS (svaka TS ima jedan TS i 5 „prepolovljenih“ izvoda) koji se napajaju kao na sl.3 su:

$$W_{5ET+5 \text{ prepolovljenih izvoda}} = 5 \cdot 8760 \cdot (0,06 + 1,125 \cdot 0,235^2) + 10 \cdot \frac{0,672}{2} \cdot 3 \cdot \frac{r \cdot 13,58^2}{1000} \cdot 8760 =$$

$$= 5349,21 + 16284,12 \cdot r \quad , \quad \frac{kWh}{god} \quad (7)$$

Rezultati proračuna za različite poprečne preseke izvoda su dati u Tabeli 4.

Tabela 4 - Visina gubitaka za konfiguraciju na sl.2 i konfiguraciju na sl.3 i godišnja ušteda u zavisnosti od poprečnog preseka izvoda

Poprečni presek izvoda, mm^2	$W_{1ET+5 \text{ izvoda '}}$ kWh	$W_{5ET+5 \text{ prepolovljenih izvoda '}}$ kWh	Godišnja ušteda, EUR
35	77597	22285	11062
50	60010	17888	8424
70	44572	14029	6108
95	34932	11618	4663
120	29721	10315	3881
150	26009	9388	3324

Ako bi ovo bilo urađeno za svih 35000 TS godišnje smanjenje gubitaka bi iznosilo, izraženo u evrima: $(116,3 \div 387,2) MEUR$.

3. ZAKLJUČAK

Ako bismo sproveli napred analizirane mere i kompenzaciju reaktivne snage praznog hoda energetskih transformatora ukupna investicija bi iznosila:

Aktivnost	Jedinična cena	Cena
Nabavka i ugradnja 2 miliona pametnih brojila	150 EUR	300 miliona EUR
Nabavka i ugradnja 35000 TS sa po jednim ET sa amorfnim jezgrom	15000 EUR	525 miliona EUR
Rekonstrukcija (produženje) mreže 10 kV za 60 000 km	25000 EUR/km	1,5 milijardi EUR
Rekonstrukcija (povećanje poprečnog preseka) 120 000 km NN-mreže	20 000 EUR/km	2,4 milijardi EUR
Kompenzacija reaktivne snage praznog hoda 35000 energetskih transformatora	500 EUR/transf.	17,5 miliona EUR
UKUPNO		4,767 milijardi EUR

Sa cenom od 0,2 EUR/kWh period otplate investicije je 7-8 godina, a ključni efekti su: uposlena industrija i oslobađanje proizvodnih kapaciteta od oko 1000 MW.

LITERATURA

- [1] Power engineering guide, Edition 8.0, Siemens, 2017.
- [2] 2nd CEER Report on Power Losses, Council of European Energy Regulators, Ref: C19-EQS-101-03
23 March 2020
- [3] Distribution Grids in Europe- Facts and Figures 2020, Eurelectric. Brussels, Belgium
- [4] Distribution system operators observatory, European commission, 2016.
- [5] Bollen M., Hassan F., Integration of distributed generation in the power systems, Wiley and IEEE Press, 2011.
- [6] V. Mijailović, "Distribuirani izvori i sistemi za distribuciju električne energije", Akademska misao, Beograd, 2019.

ZAHVALNICA

Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS, ugovor br. 451-03-66 / 2024-03 / 200132 čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku - Univerziteta u Kragujevcu.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia, and these results are parts of the Grant No. 451-03-66 / 2024-03 / 200132 with University of Kragujevac - Faculty of Technical Sciences Čačak.