

Radislav Gulam
HEP-ODS d.o.o.
radislav.gulam@hep.hr

Krešimir Belko
HEP-ODS d.o.o.
kresimir.belko@hep.hr

Ante Veža
HEP-ODS d.o.o.
ante.veza@hep.hr

Mario Radić
HEP-ODS d.o.o.
mario.radic@hep.hr

Ivan Dundović
HEP-ODS d.o.o.
ivan.dundovic@hep.hr

Boris Nikolić
HEP-ODS d.o.o.
boris.nikolic@hep.hr

Jasenko Švorinić
HEP-ODS d.o.o.
jasenko.svorinic@hep.hr

PILOT PROJEKT NAPREDNE MREŽE U HEP ODS-U: PROJEKTNJA AKTIVNOST 2 RAZVOJ I OPTIMIZACIJA KONVENCIONALNIH MREŽA – MJERENJE I IZRAČUN GUBITAKA TRANSFORMATORA

SAŽETAK

Projektna aktivnost 2: Razvoj i optimizacija konvencionalne mreže u sklopu Pilot projekta uvođenja naprednih mreža [1] obuhvatila je zamjenu 449 postojećih SN/NN transformatora starijih od 1975. godine s novim energetski učinkovitim transformatorima sukladno Uredbi EU Komisije br. 548/2014 [2]. Cilj projektne aktivnosti je povećanje učinkovitosti distribucije električne energije smanjenjem tehničkih gubitaka, prvenstveno gubitaka praznog hoda u distribucijskim transformatorima SN/NN. Smanjenje gubitaka, odnosno praćenje učinaka mjere provest će se mjerenjem i izračunom gubitaka temeljem podataka sa sumarnih brojila te procjenom gubitaka radne snage koji nastaju u željezu.

Ključne riječi: napredna mreža, gubici transformatora, energetska učinkovitost

SMART GRID PILOT PROJECT IN HEP DSO: PROJECT ACTIVITY 2 DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF CONVENCIONAL GRID – MEASURING AND CALCULATION OF TRANSFORMER LOSSES

SUMMARY

Project activity 2: Development and optimization of conventional grid as part of Smart grid pilot project [1] included replacement of 449 existing MV/LV transformers older than year 1975 with energy efficient transformers according to commission regulation EU No 548/2014 [2]. Goal of this project activity is increase of energy efficiency through reduction in technical losses, mainly no load losses in distribution transformers MV/LV. Monitoring effects of project activity will be carried out by measuring and calculation of losses based on data from smart meter and assessment of transformer no load losses.

Key words: smart grid, transformer losses, energy efficiency

1. CILJ I OBUHVAT PROJEKTNE AKTIVNOSTI 2

U sklopu projektne aktivnosti 2: razvoj i optimizacija konvencionalne mreže koja je dio Pilot projekta uvođenje naprednih mreža u HEP ODS-u zamijenjeno je 449 postojećih transformatora 10/0,4 kV starijih od 1975. godine energetski učinkovitim transformatorima sa smanjenim gubicima sukladno Uredbi EU br. 548/2014 u 5 distribucijskih područja: Elektra Zagreb, Elektroslavonija Osijek, Elektra Zadar, Elektrodalmacija Split i Elektrojug Dubrovnik [1]. (Tablica I.)

Tablica I. Raspodjela transformatora po distribucijskim područjima

Distribucijsko područje	250 kVA	400 kVA	630 kVA	Ukupno
Elektra Zagreb (4001)	14	181	53	248
Elektroslavonija Osijek (4008)	23	54	44	121
Elektrodalmacija Split (4013)	13	26	10	49
Elektra Zadar (4014)	3	4	8	15
Elektrojug Dubrovnik (4016)	4	7	5	16
UKUPNO	57	272	120	449

Provedba ove projektne aktivnosti doprinosi povećanju učinkovitosti distribucije električne energije kroz smanjenje tehničkih gubitaka, konkretno smanjenju gubitaka u energetskim transformatorima SN/NN.

Zamjena postojećih transformatora doprinijet će sljedećim financijskim koristima:

- smanjenje troška buduće zamjene postojećih transformatora
- smanjenje troška buduće modernizacije transformatorskih stanica pri njihovom uključivanju u naprednu mrežu
- smanjenje troškova za pokriće gubitaka

2. MJERENJE GUBITAKA TRANSFORMATORA

Prema Studiji izvodljivosti Pilot projekta uvođenje naprednih mreža procijenjeno je da će se zamjenom postojećih transformatora postići godišnje smanjenje tehničkih gubitaka u iznosu od 4.457 MWh. U svrhu ocjene uspješnosti projektne aktivnosti provoditi će se konstantno praćenje iznosa gubitaka koji nastaju u energetskim transformatorima u transformatorskim stanicama gdje su zamijenjeni transformatori. Mjerenje gubitaka transformatora vršit će se pomoću sumarnih brojila koja se ugrađuju u sklopu projektne aktivnosti 1: napredna mjerna infrastruktura.

Praćenje učinaka projektne aktivnosti provest će se na dva načina:

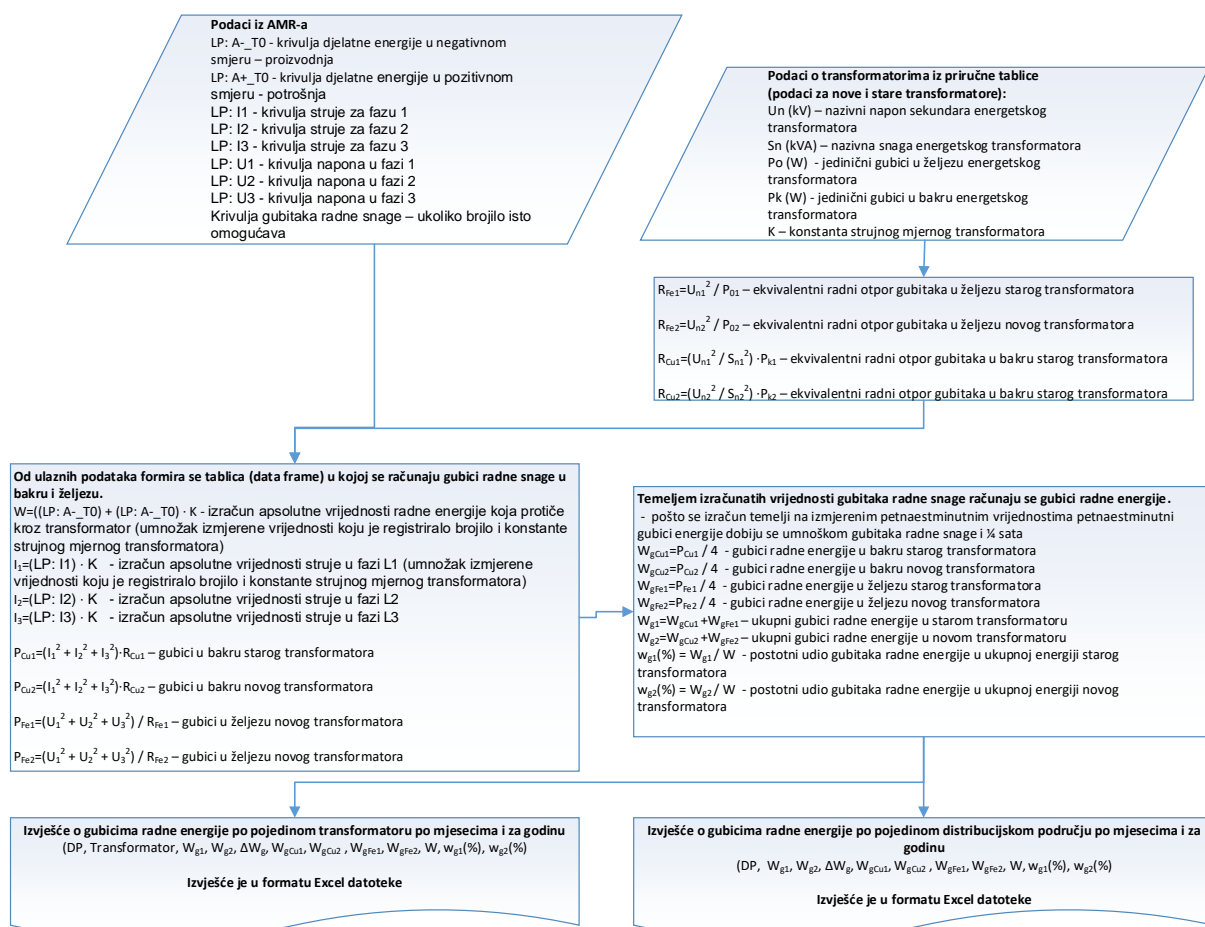
- mjerenjem i izračunom gubitaka temeljem podataka sa sumarnih brojila
- procjenom gubitaka radne snage koji nastaju u željezu u slučaju da nije ugrađeno sumarno brojilo u transformatorskoj stanici

Podaci potrebni za izračun odnosno praćenje gubitaka energetskih transformatora sa sumarnih brojila su:

- LP: A-_T0 - krivulja djelatne energije u negativnom smjeru – proizvodnja
- LP: A+_T0 - krivulja djelatne energije u pozitivnom smjeru - potrošnja
- LP: I1 - krivulja struje za fazu 1
- LP: I2 - krivulja struje za fazu 2
- LP: I3 - krivulja struje za fazu 3
- LP: U1 - krivulja napona u fazi 1
- LP: U2 - krivulja napona u fazi 2
- LP: U3 - krivulja napona u fazi 3

U svrhu automatiziranog prikupljanja podataka sa sumarnih brojila za mjerenje i izračun gubitaka energetskih transformatora temeljem izmjerenih veličina razvijena je aplikacija u programskom jeziku Python koji je prilagođen za rad s vremenskim serijama podataka.

Osnovni dijagram toka načina rada aplikacije prikazan je na slici 1.



Slika 1. Dijagram toka načina izračuna gubitaka transformatora

Da bi se dobile stvarne vrijednosti energije i struje potrebno je podatke iz sumarnih brojila pomnožiti sa konstantom strujnog mjernog transformatora na koje su spojene strujne grane brojila, a koja predstavlja omjer između nazivne vrijednosti primarne i sekundarne struje strujnih mjernih transformatora. U pravilu prijenosni omjeri strujnih mjernih transformatora određeni su nazivnom snagom energetskog transformatora (Tablica II.).

Tablica II. Prijenosni omjeri strujnih mjernih transformatora za sumarno mjerenje

SNAGA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA (kVA)	NAZIVNI PRIJENOSNI OMJER STRUJNIH MJERNIH TRANSFORMATORA (A)	KONSTANTA STRUJNOG MJERNOG TRANSFORMATORA
250	400/5	80
400	600/5	120
630	1000/5	200

Ostali podaci koji su neophodni za izračun gubitaka radne snage energetskog transformatora unose se u pomoćnu tablicu, a to su:

- Oznaka distribucijskog područja
- Naziv distribucijskog područja
- Naziv transformatora koji se mijenja – prema nazivu transformatorske stanice
- Nazivna vrijednost gubitaka u bakru starog transformatora - P_{k1} (W)
- Nazivna vrijednost gubitaka u željezu starog transformatora - P_{o1} (W)
- Nazivni napon sekundara starog transformatora – U_{n1} (kV)

- Nazivna snaga starog energetskog transformatora – S_{n1} (kVA)
- Nazivna vrijednost gubitaka u bakru novog transformatora - P_{k2} (W)
- Nazivna vrijednost gubitaka u željezu novog transformatora - P_{02} (W)
- Nazivni napon sekundara novog transformatora – U_{n2} (kV)
- Nazivna snaga novog energetskog transformatora – S_{n2} (kVA)
- Tvornički broj sumarnog brojila
- Konstanta strujnih mjernih transformatora (prijenosni omjer)
- Napon mjerenja – U (kV)
- Datum zamjene transformatora
- Datum ugradnje sumarnog brojila

Kako bi se osigurala što točnija registracija (izračun) gubitaka radne snage (energije) u energetskom transformatoru podaci o gubicima energetskog transformatora u željezu (P_{01} i P_{02}) i bakru (P_{k1} i P_{k2}) uzimaju se sa:

- ispitnog lista transformatora za nove transformatore - transformatori koji se ugrađuju,
- ispitnog lista za stare transformatore, a ako ispitni list starog transformatora nije raspoloživ podatke je moguće uzeti sa natpisne pločice energetskog transformatora,

U krajnjem slučaju ukoliko za stare transformatore nisu dostupni podaci iz ispitnih listova i sa natpisnih pločica uzimaju se podaci o gubicima u željezu (P_{01}) i gubicima u bakru (P_{k1}) ovisno o godini proizvodnje transformatora prema tablicama iz Studije izvodljivosti Pilot projekta uvođenja naprednih mreža [1].



Slika 2. Energetski učinkoviti transformator snage 630 kVA, tip 6TBNO 630-24x/AC, proizvođača Končar D&ST

Podaci o gubicima radne energije i snage iz aplikacije izvoze se u formatu Excel datoteke što je prikladno za daljnje analize. Podaci koji se dobiju kao rezultat su:

- W_{gCu1} - gubici radne energije u bakru starog transformatora
- W_{gCu2} - gubici radne energije u bakru novog transformatora
- W_{gFe1} - gubici radne energije u željezu starog transformatora
- W_{gFe2} - gubici radne energije u željezu novog transformatora
- $W_{g1}=W_{gCu1} +W_{gFe1}$ – ukupni gubici radne energije u starom transformatoru
- $W_{g2}=W_{gCu2} +W_{gFe2}$ – ukupni gubici radne energije u novom transformatoru
- $w_{g1}(\%) = W_{g1} / W$ - postotni udio gubitaka radne energije u ukupnoj energiji starog transformatora
- $w_{g2}(\%) = W_{g2} / W$ - postotni udio gubitaka radne energije u ukupnoj energiji novog transformatora
- $\Delta W_g = W_{g1} - W_{g2}$ – razlika gubitaka starog i novog transformatora za istu godišnju krivulju opterećenja

3. PROCJENA GUBITAKA TRANSFORMATORA

Gubici u željezu energetskih transformatora u transformatorskim stanicama u kojima nisu ugrađena sumarna brojlila izračunati će se procjenom. Procjena se temelji na činjenici da su gubici radne snage i energije u transformatoru koji nastaju u željezu približno konstantni. Gubici radne snage i energije koji nastaju u željezu ovise isključivo o naponu (što je napon veći, veći su i gubici). Jakost struje u namotima nema nikakvog utjecaja na magnetske gubitke. [3]

$$P_{Fe} = \frac{U_2^2}{U_{2n}^2} \cdot P_0 \quad (1)$$

Odnos stvarnih gubitaka u željezu (P_{Fe}) transformatora i nazivnih gubitaka u željezu (P_0) ovisi o kvadratu omjera napona na transformatoru i nazivne vrijednosti napona transformatora.

Iz navedenog razloga procjena smanjenja gubitaka u pojedinačnoj transformatorskoj stanici računati će se po formuli:

$$\Delta W_{pgFe} = [(P_{02} \cdot T) - (P_{01} \cdot T)] \cdot K_{DP} \quad (2)$$

gdje je:

- ΔW_{pgFe} – procjena smanjenja gubitaka radne energije u željezu (Wh)
- P_{01} – nazivni gubici radne snage u željezu starog transformatora (W)
- P_{02} – nazivni gubici radne snage u željezu novog transformatora (W)
- T – period analize jedna godina (h)
- K_{DP} – koeficijent korekcije zbog odstupanja vrijednosti napona u odnosu na nazivni napon transformatora za određeno distribucijsko područje (DP)

Koeficijent korekcije zbog odstupanja vrijednosti napona u odnosu na nazivni napon transformatora za određeno distribucijsko područje (K_{DP}) računa se kao srednja vrijednost ukupnih izračunatih smanjenja gubitaka u transformatorskim stanicama gdje su ugrađena sumarna brojlila i ukupnog smanjenja gubitaka radne energije u željezu temeljem nazivne vrijednosti gubitaka radne snage koji nastaju u željezu u analiziranom periodu (jedna godina), u transformatorskim stanicama gdje su ugrađena sumarna brojlila, za pojedino distribucijsko područje.

$$K_{DP} = \frac{\sum_1^n \Delta W_{mgDPFe} - \Delta W_{pgDPFe}}{n} \quad (3)$$

gdje je:

- n – broj mjeseci promatranog perioda (u pravilu $n = 12$);
- ΔW_{mgDPFe} – smanjenje gubitaka radne energije u željezu izmjerenih (izračunatih) temeljem podataka sa sumarnog brojlara na razini mjeseca za određeni DP;
- ΔW_{pgDPFe} - smanjenje gubitaka radne energije u željezu izračunatih temeljem podataka o nazivnoj snazi gubitaka u željezu transformatora na razini godine za određeni DP (za transformatore u transformatorskim stanicama gdje su ugrađena sumarna brojlara).

Učinak projektne aktivnosti 2 promatra se kroz ukupno smanjenje gubitaka radne energije koji nastaju u željezu (jezgri) transformatora 449 zamijenjenih transformatora u vremenskom periodu od jedne godine. Smanjenje gubitaka predstavlja razliku između izračunatih ili procijenjenih gubitaka za novo ugrađene transformatore i izračunatih gubitaka za postojeće transformatore (stare transformatore).

$$\Delta W_{pgFe_{uk}} = \sum_{n=1}^{449} (W_{pgFe1} - W_{pgFe2})_n \quad (4)$$

Dodatno, iako nije nužno za praćenje učinaka mjere za transformatore koji su zamijenjeni u transformatorskim stanicama u kojima su ugrađena sumarna brojlara moguće je izmjeriti (izračunati) gubitke koji nastaju u bakru (namotima) transformatora.

$$\Delta W_{gCu_{uk}} = \sum_{i=1}^K (W_{Cu2} - W_{Cu1})_i \quad (5)$$

gdje je:

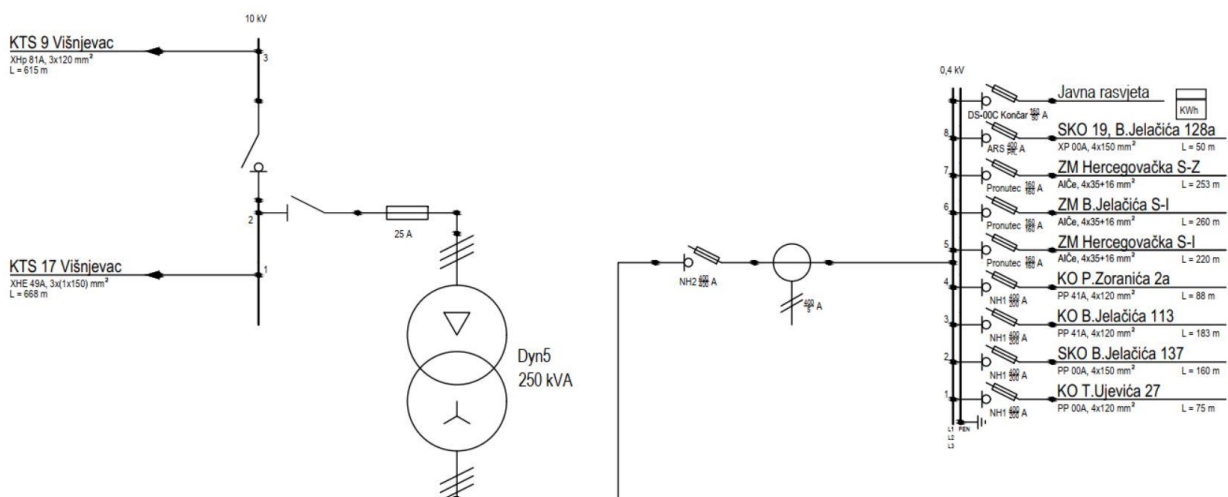
- i - transformator u transformatorskoj stanici u kojoj je ugrađeno sumarno brojlara
- K – ukupan broj transformatorskih stanica u koje je ugrađeno sumarno brojlara

Protekom dvanaest mjeseci na temelju izmjerenih odnosno izračunatih gubitaka transformatora izraditi će se završno izvješće o uspješnosti projektne aktivnosti.

4. PRIMJER IZRAČUNA GUBITAKA TRANSFORMATORA SNAGE 250 kVA

Temeljem trenutno dostupnih mjernih podataka prikazat će se vrijednosti gubitaka transformatora snage 250 KVA dobivenih prethodno navedenom metodom izračuna gubitaka. Analiza je učinjena na primjeru transformatorske stanice PTTS Višnjevac 3 koja se nalazi na distribucijskom području Elektroslavonije Osijek za razdoblje od jednog mjeseca, konkretno za prosinac 2022.

PTTS Višnjevac 3 napajana je iz TS 110/20/10 kV Osijek 4 preko SN izvoda KTS 262 te napaja ukupno 222 korisnika mreže s ukupnom priključnom snagom od 2.708,04 kW. (Slika 3.)



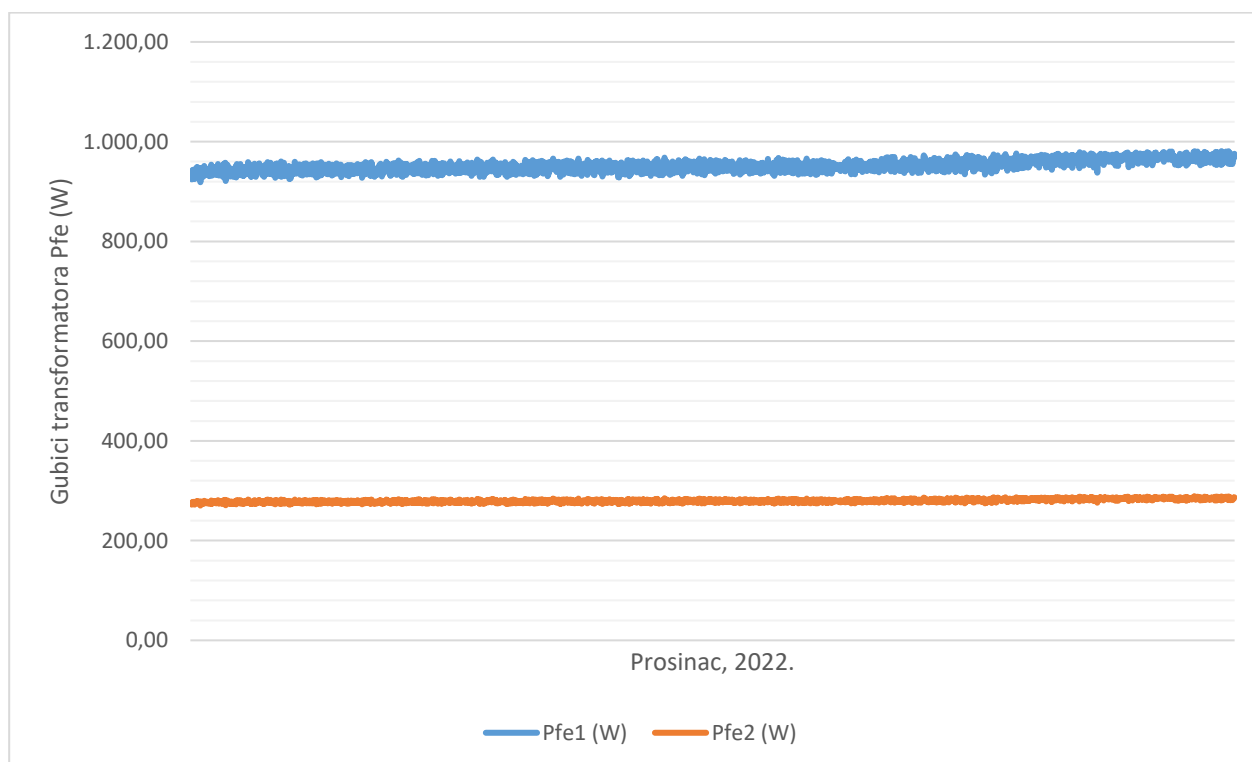
Slika 3. Jednopolna shema transformatorske stanice PTTS Višnjevac 3

U tablici III. prikazane su osnovne tehničke karakteristike postojećeg transformatora te energetski učinkovitog transformatora koji je ugrađen.

Tablica III. Osnovne tehničke karakteristike postojećeg i energetski učinkovitog transformatora

Tehničke karakteristike	Transformator postojeći	Energetski učinkoviti transformator
Godina proizvodnje	1967	2021
Nazivna snaga (kVA)	250	250
Prijenosni omjer	10/0,4	10(20)/0,42
Nazivni napon sekundara (kV)	0,4	0,42
Gubici u praznom hodu (W)	925	300
Gubici u kratkom spoju (W)	3.823	3.250
Gubici radne energije u željezu (kWh)	707,87	208,24
Gubici radne energije u bakru (kWh)	296,87	278,25
Gubici radne energije ukupno (kWh)	1.004,75	486,48
Razlika radne energije gubitaka ΔW_g (kWh)	518,26	
Postotna razlika radne energije gubitaka ΔW_g (%)	48,42%	
Ukupna radna energije kroz transformator W (kWh)	14.605,60	

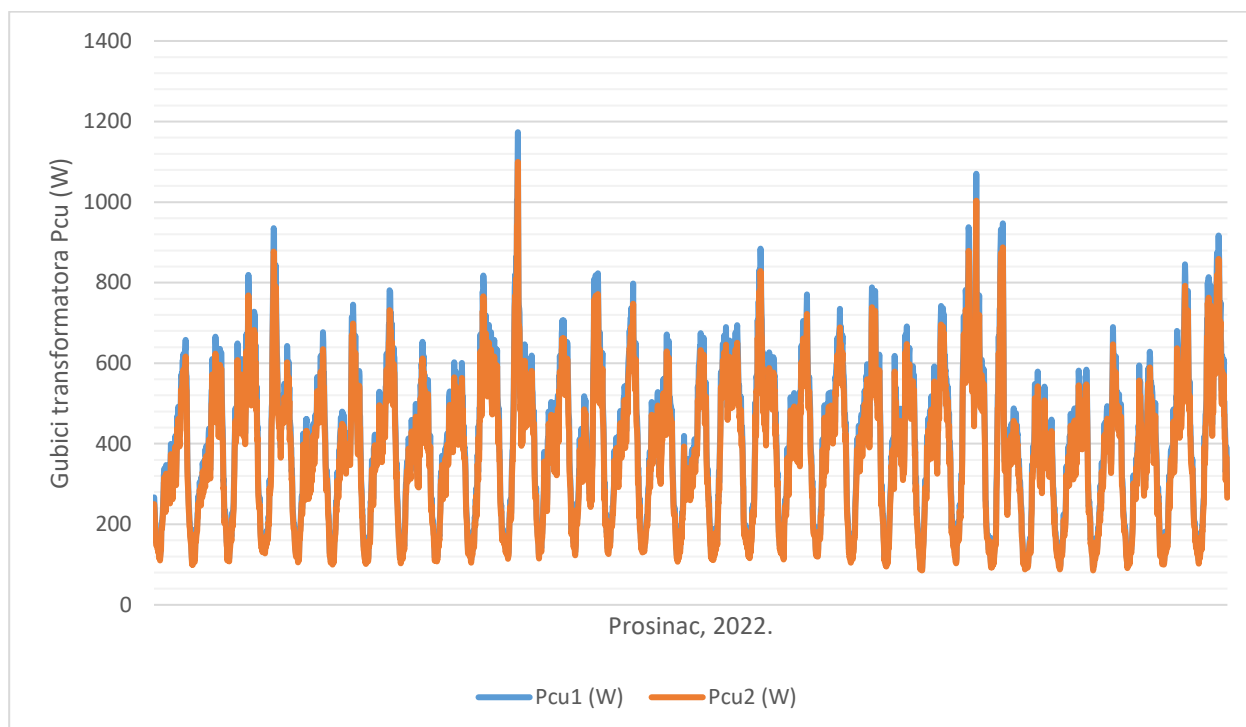
Na slici 4. prikazana je usporedba gubitaka u željezu postojećeg i energetski učinkovitog transformatora iz koje je vidljiv njihov nepromjenjivi karakter neovisan o opterećenju transformatora, a male promjene u iznosu rezultat su promjene napona. U konkretnom slučaju, gubici radne energije u željezu u prosincu 2022. godine u postojećem transformatoru iznosili bi 707,87 kWh dok za energetski učinkoviti transformator oni iznose 208,24 kWh.



Slika 4. Usporedba gubitaka u željezu postojećeg i energetski učinkovitog transformatora snage 250 kVA u PTTS Višnjevac 3

Na slici 5. prikazana je usporedba gubitaka u bakru postojećeg i energetski učinkovitog transformatora iz koje je vidljiv njihov promjenjivi karakter ovisan o opterećenju transformatora. Gubici radne energije u bakru

u prosincu 2022. godine u postojećem transformatoru iznosili bi 296,87 kWh dok za energetski učinkoviti transformator oni iznose 278,25 kWh.



Slika 5. Usporedba gubitaka u bakru postojećeg i energetski učinkovitog transformatora snage 250 kVA u PTTS Višnjevac 3

Iz izračuna gubitaka transformatora u tablici III. vidljivo je da razlika energije gubitaka starog transformatora i energetski učinkovitog transformatora za prosinac 2022. iznosi 518,26 kWh što u postotnoj razlici iznosi nešto manje od 50 %.

5. ZAKLJUČAK

Projektna aktivnost 2: Razvoj i optimizacija konvencionalne mreže je trenutno u završnoj fazi odnosno u fazi postepenog prikupljanja mjernih podataka u skladu s dinamikom ugradnje sumarnih brojila. Iz dosadašnjih podataka gubitaka transformatora dobivenih izračunom može se zaključiti da će se zamjenom starih transformatora novim energetski učinkovitim transformatorima ostvariti značajno smanjenje tehničkih gubitaka transformatora. Temeljem učinjene analize ove projektne aktivnosti naposljetku će se moći donijeti odluka o strategiji budućih zamjena starih transformatora u cilju povećanja energetske učinkovitosti. Također, šira implementacija sumarnih brojila u transformatorskim stanicama te prikupljanje velikog broja mjernih podataka omogućit će između ostaloga detaljniju analizu pogona distribucijskih transformatora.

LITERATURA

- [1] Studija izvodljivosti Pilot projekta uvođenja naprednih mreža, EY, svibanj 2018.
- [2] Uredba Komisije (EU) br. 548/2014 od 21. svibnja 2014. o provedbi Direktive 2009/125/EZ Europskog parlamenta i Vijeća u pogledu malih, srednjih i velikih energetskih transformatora, Službeni list Europske unije, 2014.
- [3] Distribucija električne energije - interna skripta (Fakultet elektrotehnike strojarstva i brodogradnje Split, autori: Doc. dr. sc. Ranko Goić, dipl.ing.; Damir Jakus, dipl.ing.; Ivan Penović, dipl.ing.)