

Kristijan Jurilj
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
kristijan.jurilj@hep.hr

Matej Šimunović, mag.ing.el.
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
matej.simunovic@hep.hr

Nikola Bogunović, dipl.ing.el.
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
nikola.bogunovic@hep.hr

Danijel Variola, mag.ing.el.
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
danijel.variola@hep.hr

SMANJENJE GUBITAKA ELEKTRIČNE ENERGIJE KROZ OPTIMALNI ODABIR ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

SAŽETAK

Imajući u vidu da je problematika gubitaka električne energije uvijek vrlo aktualna, u referatu se obrađuje provedba optimalnog odabira energetskih transformatora za svako pojedinačno transformatorsko područje na temelju kretanja vršnih opterećenja.

Rad sadrži analizu postojećih gubitaka u transformaciji konzumnih 10(20) kV trafostanica i na temelju mjerenih veličina najoptimalniji odabir snage i izvedbe energetskog transformatora prikazujući gubitke u energetskim i ekonomskim pokazateljima temeljem analize gubitaka u transformaciji svakog pojedinog transformatora.

Zaključak je da radi optimiranja ulaganja i smanjenja gubitaka u značajnijoj mjeri potrebno integralno planirati razvoj distribucijske mreže, tj. pojedinih elemenata mreže.

Ključne riječi: gubici električne energije od transformacije, kontrola mjerne opreme

REDUCTION OF ELECTRICITY LOSSES THROUGH OPTIMAL SELECTION OF POWER TRANSFORMERS

SUMMARY

Bearing in mind that the problem of electricity losses is always very topical, the paper deals with the implementation of optimal selection of energy transformers for each individual transformer area based on the movement of peak loads.

The paper contains an analysis of existing losses in the transformation of 10(20) kV power substations and, on the basis of measured quantities, the most optimal selection of power and performance of the energy transformer, showing losses in energy and economic indicators.

The conclusion is that in order to optimize investments and reduce losses in a more significant metric, integrally plan the development of the distribution network, ie individual network elements

Keywords: energy losses from transformers, metering equipment control

1. UVOD

Distributivni transformatori rade s različitom razinom opterećenja ovisno o području, dobu godine, dobu dana. Dio gubitaka koji je ovisan o opterećenju transformatora moguće je reducirati optimalnim odabirom energetskog transformatora. Kao što je u sažetku već spomenuto, analiza obuhvaća gubitke praznog hoda u obliku gubitaka petlje histereze, vrtložnih struja, lutajućih struja i dielektričnih gubitaka, te skupinu gubitaka koja se odnosi na gubitke vezene uz opterećenje. Radom će se prikazati mogućnost smanjenja gubitaka električne energije optimalnim odabirom energetskih transformatora, odnosno mogućnost povećanja energetske učinkovitosti distribucijskih transformatora.

2. OPĆENITO O TRANSFORMATORIMA

Transformator je električni uređaj koji međuinduktivno povezuje dva električna kruga izmjenične struje. Sastoji se od magnetske jezgre na koju su namotana u pravilu dva međusobno odvojena svitka (namota). Prijenos energije s jednog svitka na drugi odvija se zahvaljujući fizikalnom načelu elektromagnetske indukcije, pri stalnoj frekvenciji. Postoje i transformatori poput autotransformatora koji radi pri promjenjivoj frekvenciji. U praksi transformatore koristimo u prijenosu i razdiobi električne energije, mjerenju električnih veličina, u elektroničkim sklopovima, za prijenos signala, itd. Tema ovog rada su energetski transformatori za transformaciju napona s 10(20) kV na nazivni napon 0,4 kV distributivne mreže.

Osnovni dijelovi svakog transformatora su željezna jezgra, te primarni i sekundarni namot, koji se još nazivaju primar i sekundar. Namoti transformatora izvedeni su tako da postoji dobra izolacija:

- Između primara i sekundara,
- Između namota primara i namota sekundara,
- Između zavoja pojedinog namota

Na primarni namot se priključuje izvor izmjeničnog sinusnog napona efektivne vrijednosti U_1 koji kroz njega tjera izmjeničnu sinusnu struju I_1 , a ona stvara promjenjivi magnetski tok Φ . Sinusni oblik napona rezultira sinusnim magnetskim tokom Φ .

Pošto su namoti primara i sekundara na istoj željeznoj jezgri, isti promjenjivi magnetski tok Φ u namotu primara inducira napon samoindukcije, efektivne vrijednosti, a u sekundaru napon međuindukcije efektivne vrijednosti.

3. GUBICI ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Gubici kod energetskih transformatora sastoje se od dvije vrste gubitaka. To su gubici u željezu (magnetski gubici) i gubici u bakru (električni gubici). Gubici u željezu nastaju zbog izmjeničnih magnetskih polja, a najviše se javljaju u magnetskom krugu transformatora. Mali dio gubitaka nastaje u željeznom dijelu, što je najčešće zanemarivo. Električni ili Joulovi gubici nastaju u namotima koji se zagrijavaju zbog struje koja njima teče, a dodatni električni gubici se javljaju zbog vrtložnih struja. Vrtložne struje potiču od rasipnog magnetskog toka u samim namotima i uzrokuju povećanje otpora uslijed nejednakosti gustoće struje.

3.1. Korisnost transformatora

Gubici u transformatoru se sastoje od gubitaka praznog hoda P_0 i teretnih gubitaka P_t . Korisnost transformatora je omjer predane i primljene djelatne snage izražen u postocima:

$$\eta = 100 \cdot \frac{S \cos \varphi - P_0 - P_t}{S \cos \varphi} \quad [\%] \quad (1)$$

Opterećenje pri kojem je korisnost najveća je:

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_0}{P_m}} \quad (2)$$

Korisnost je optimalna kada su gubici praznog hoda i teretni gubici jednaki $P_0 = P_t$, odnosno transformator s nazivnim teretnim gubicima koji su jednaki gubicima u praznom hodu bi imao maksimalnu korisnost pri punom teretu.

3.2. Struja primara

Struju I_1 možemo rastaviti na dvije komponente: na struju praznog hoda I_0 i struju opterećenja I_P . Ako je transformator opterećen, struja magnetiziranja I_0 je znatno manja od struje opterećenja I_P pa možemo smatrati da je primarna struja I_1 jednaka struji opterećenja.

3.3. Gubici u namotima

Namoti transformatora, najčešće izrađeni od bakra, imaju određeni djelatni otpor na kojem se troši dio snage koji zagrijava namote. To su gubici u bakru;

$$P_{Cu1} = I_1^2 R_1 \quad (3)$$

$$P_{Cu2} = I_2^2 R_2 \quad (4)$$

gdje su;

P_{Cu1}, P_{Cu2} – gubici u bakru primara i sekundara, W

R_1, R_2 – djelatni otpor namota primara i sekundara, Ω

Gubici u namotima računaju se za toplo stanje namota od 75°C

3.4. Gubici u željezu

Izmjenični magnetski tok u željeznoj jezgri uzrokuje gubitke zbog histereze i vrtložnih struja. Njih računamo prema izrazima:

$$P_h = hfB_m^2 m \quad (5)$$

$$P_v = vfB_m^2 m \quad (6)$$

Gdje je:

P_h - gubici zbog histereze, W

P_v – gubici zbog vrtložnih struja, W

h, v – jedinični gubici, W/kg

f – frekvencija, Hz

B_m – amplituda magnetske indukcije, T

m – masa jezgre, kg

3.5. Transformator opterećen impedancijom Z

Svaki je transformator projektiran i građen za određenu prividnu snagu koju nazivamo nazivnom snagom S_N . Ako na primaru i sekundaru vladaju nazivni naponi U_{1N} i U_{2N} , transformator radi nazivnom snagom, a namotima teku nazivne struje I_{1N} i I_{2N} . Ove se vrijednosti uvijek nalaze na natpisnoj pločici transformatora.

Ako analiziramo pogonska stanja stvarnog transformatora, ovisno o impedanciji trošila \bar{Z} priključenog na sekundaru, gdje djelatni otpor namota primara i sekundara predstavimo otporima R_1 i R_2 , na kojima će struje primara i sekundara \bar{I}_1 i \bar{I}_2 stvarati padove napona \bar{U}_{R1} i \bar{U}_{R2} :

$$\bar{U}_{R1} = \bar{I}_1 R_1 \quad (7)$$

$$\bar{U}_{R2} = \bar{I}_2 R_2 \quad (8)$$

Zbog rasipnih tokova $\Phi_{1\sigma}$ i $\Phi_{2\sigma}$ u namotima primara i sekundara nastati će inducirani naponi koje ćemo prikazati kao padove napona U_{X1} i U_{X2} na induktivnom otporu primara i sekundara X_1 i X_2 :

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{U}_{R1} + \bar{U}_{X1} \quad (9)$$

$$U_2 = E_2 - U_{R2} + U_{X2} \quad (10)$$

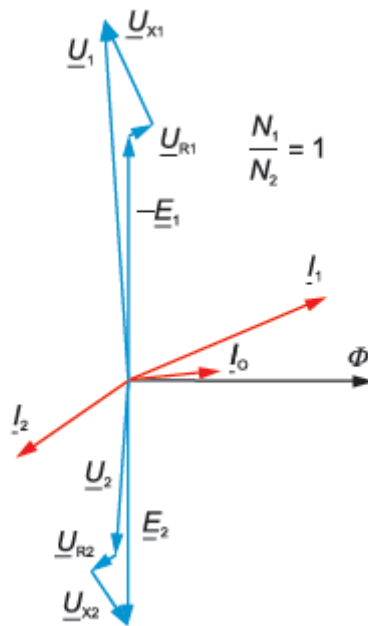
gdje je:

\bar{U}_1 – napon priključen na primar

\bar{U}_2 – napon na trošilu impedancije \bar{Z} , koje je priključeno na sekundar

\bar{E}_1, \bar{E}_2 – inducirani naponi u primaru i sekundaru

Temeljem jednadžbi II. Kirchhoffovog zakona možemo načiniti fazorski dijagram stvarnog transformatora $\frac{N_1}{N_2} = 1$, a transformator je opterećen induktivnom impedancijom. Fazorski dijagram transformatora prikazuje slika br. 1



Slika 1. Fazni dijagram stvarnog transformatora opterećenog impedancijom Z

3.6. Prazni hod transformatora

Prazni hod je pogonsko stanje kod kojeg je na primar priključen napon, a sekundarne stezaljke su otvorene. Za napon na sekundaru možemo reći da je jednak induciranom naponu $\overline{E_2}$, a sekundarna struja $\overline{I_2}$ jednaka je nuli.

U primarnom namotu teče samo struja praznog hoda $\overline{I_0}$. Glavni magnetski tok Φ u željeznoj jezgri stvara gubitke uslijed histereze i vrtložnih struja te stoga struja praznog hoda ima dvije komponente: induktivnu $\overline{I_\mu}$ i djelatnu komponentu $\overline{I_R}$ što vidimo na slici.

$$\overline{I_0} = \overline{I_\mu} + \overline{I_R} \quad (11)$$

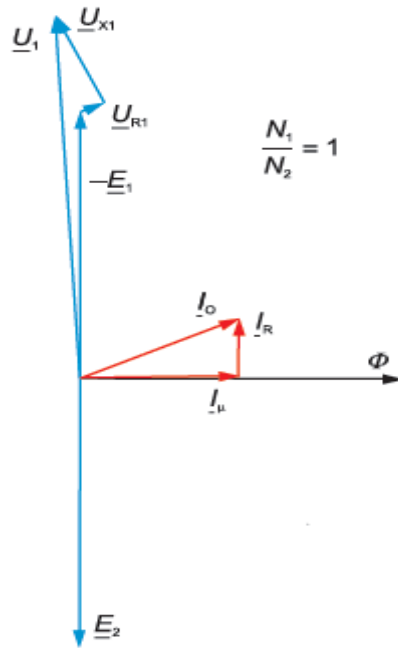
Induktivna komponenta struje stvara glavni magnetski tok, a djelatna predstavlja gubitke koji nastaju u jezgri transformatora.

Ako napone prikažemo kao fazore, jednačbe II. Kirchhoffovog zakona za primar i sekundar su:

$$\overline{U_1} = -\overline{E_1} + \overline{U_{R1}} + \overline{U_{X1}} \quad (12)$$

$$\overline{U_2} = \overline{E_2} \quad (13)$$

Fazorski dijagram stvarnog transformatora u praznom hodu prikazan je na slici 2 uz pretpostavku da prijenosni omjer transformatora iznosi 1.



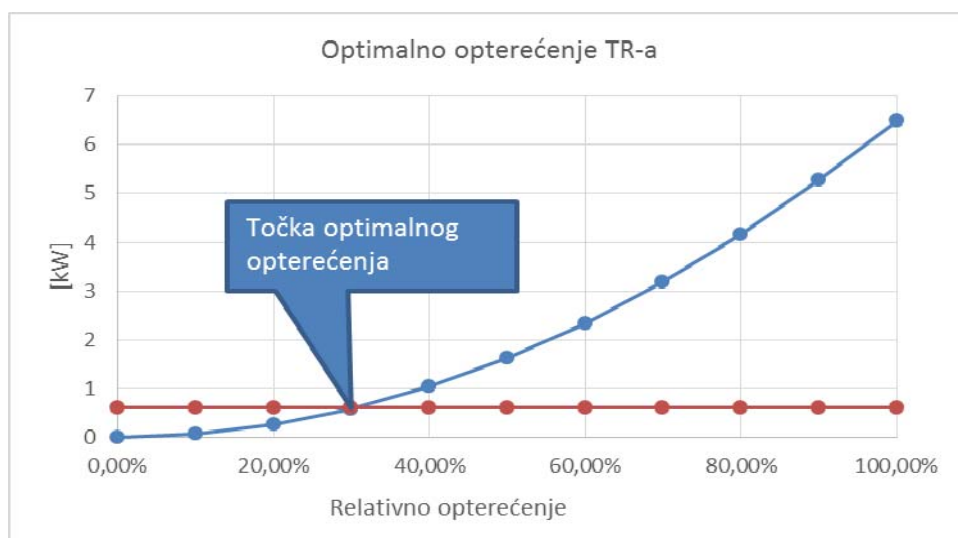
Slika 2. Fazni dijagram stvarnog transformatora u praznom hodu

4. ANALIZA ODABIRA ENERGETSKIH TRANSFORATORA TEMELJEM OPTEREĆENOSTI

Dosadašnji način procjene nazivne snage energetskog transformatora koji će se ugraditi u postojeću transformatorsku stanicu 10(20)/0,4 kV, tj. optimalan odabir nazivne snage transformatora kojim će se postojeći transformator zamijeniti novim ili drugim, nerijetko je temeljena trenutno raspoloživim stanjem transformatora na skladištima ili očitanjem najveće struje u jednom šestomjesečnom očitavanju, a neovisno o stvarnom kretanju opterećenja transformatorskog područja i trajanju razdoblja najveće zabilježene struje jer zabilježena najveća struja na instrumentu tijekom šest mjeseci može biti samo kratkotrajna tijekom jednog mjernog perioda od 15 minuta.

Neoptimalan odabir energetskog transformatora za rezultat ima izravni utjecaj na gubitke el. energije, a uzimajući u obzir podataka da je procijenjeni ukupni trošak 1.287,6 GWh energije za pokriće gubitaka u distribucijskoj mreži iznosio oko 536 milijuna kn (416 kn/MWh) dovoljan je sam za sebe. U prosincu 2018.godine HEP ODS je proveo javno nadmetanje za nabavu energije za gubitaka za prvih šest mjeseci 2019.godine u vidu jednog dugoročnog proizvoda. Okvirna ugovorena količina iznosila je 614 GWh, uz cijenu od 536,57 kn/MWh. Razlike u cijeni nabave energije za pokriće gubitaka ovisi o cijeni temeljne energije na mađarskoj burzi el. energije HUPX po kvartalima, uz dodanu procjenu troškova isporučitelja. Naravno, kao relevantnu cijenu energije za pokriće gubitaka ne treba uzimati vrijednost energija koja je bila u vrijeme pandemije COVID-19 virusa kada je bila najniža ikad.

Na slici br. 3 prikazana je jednostavan školski primjer ovisnosti gubitaka u bakru i željezu o relativnom opterećenju transformatora. Gubici u željezu ne ovise o opterećenju transformatora za razliku od gubitaka u bakru koje predstavlja eksponencijalna krivulja. Točka optimalnog opterećenja određena je sjecištem krivulje gubitaka uslijed praznog hoda i opterećenja odnosno određuje opterećenje pri kojem su gubici u željezu i bakru jednaki.



Slika 3. Odabir optimalnog TR temeljem opterećenja

Opisane krivulje gubitaka prikazane su za transformator čiji gubici u željezu iznose 0,6 kW a gubici u bakru 6,5 kW.

Način odabira najoptimalnijeg transformatora za pojedino transformatorsko područje rađen je po principu izračuna opterećenja postojećeg za svaki pojedinačni mjesec tijekom jedne godine, a po rezultatima krivulje snage i krivulje energije ugrađenog kontrolnog brojila u gledanoj trafostanici. Prigodom izračuna referentnih vrijednosti za svaki pojedini postojeći transformator gledana je postotni iznos opterećenja za maksimalnu vrijednost 15-minutne snage, postotni iznos opterećenja za srednju vrijednost 15-minutne snage, te je za odabir adekvatne vrijednosti drugog transformatora uzeta u obzir i rezerva od 20% zbog možebitnog povećanja opterećenja. Nakon toga su izračuni primijenjeni za možebitne zamjene.

Primjer 1:

U transformatorskoj stanici s instaliranim energetske transformatorom 630 kVA najveće vršno opterećenje na NN sabirnicama izmjereno je u iznosu od 240 kW, odnosno od 243,85 kVA što je 38,71% opterećenosti transformatora. Opterećenje koje ≥ 200 kVA tijekom godine u prosjeku se kreće 38 – 43 mjerene periode mjesečno, odnosno od 570 – 645 minuta dok se opterećenje između 100 kVA i 200 kVA tijekom godine u prosjeku se kreće 1.780 – 2.140 mjerene periode mjesečno.

Temeljem tih podataka pristupilo se usporedbi i odabiru najoptimalnije snage transformatora uzimajući u obzir i energetske učinkovite transformatore.

Tablica I. Prikaz odabira optimalnog ET s obzirom na kretanje opterećenja – postojeći transf. 630 kVA

	Sn [kVA]	Tip transformatora	Srednje opterećenje	Maksimalno opterećenje	GUBICI [kWh]
TS 1	630	8EuTBNO	18,20%	38,71%	11.127,98
	400	8EuTBNO	28,67%	60,96%	10.456,38
	250	8EuTBNO	45,87%	97,54%	12.067,91
Zamjena za energetske učinkoviti transformator					
	400	6TBNO	28,67%	60,96%	8.640,07
Promjena - smanjenje gubitaka:					2.487,91

Iz Tablice I, razvidno je da se temeljem ovakvog pristupa i uzimajući u obzir navedene kriterije, u transformatorskoj stanici br. 1, postojeći transformator od 630 kVA može zamijeniti energetske učinkovitim

transformatorom od 400 kVA prigodom čega bi se tijekom jedne godine gubitci smanjili za 2.487,912 kWh.

Primjer 2:

U transformatorskoj stanici s instaliranim energetskim transformatorom 400 kVA najveće vršno opterećenje na NN sabirnicama izmjereno je u iznosu od 238 kW, odnosno od 239,69 kVA što je 59,92% opterećenosti transformatora. Opterećenje koje ≥ 200 kVA tijekom godine u prosjeku se kreće 24 – 31 mjerene periode mjesečno, odnosno od 360 – 465 minuta dok se opterećenje između 100 kVA i 200 kVA tijekom godine u prosjeku se kreće 1.266 – 1.489 mjerene periode mjesečno.

Temeljem tih podataka pristupilo se usporedbi i odabiru najoptimalnije snage transformatora uzimajući u obzir i energetski učinkovite transformatore.

Tablica II. Prikaz odabira optimalnog ET s obzirom na kretanje opterećenja – postojeći transf. 400 kVA

TS 2	Sn [kVA]	Tip transformatora	Srednje opterećenje	Maksimalno opterećenje	GUBICI [kWh]
	400	8EuTBNO	23,80%	59,92%	9.238,96
250	8EuTBNO	38,08%	95,88%	9.865,95	
630	8EuTBNO	15,11%	38,05%	10.434,49	
Zamjena za energetski učinkoviti transformator					
400	6TBNO	23,80%	59,92%	7.422,65	
Promjena:					1.816,31

Iz Tablice II, razvidno je da se temeljem ovakvog pristupa i uzimajući u obzir navedene kriterije, u transformatorskoj stanici br. 2, postojeći transformator od 400 kVA može zamijeniti energetski učinkovitim transformatorom od 400 kVA prigodom čega bi se tijekom jedne godine gubitci smanjili za 1.816,31 kWh.

Tablica III. Usporedni prikaz smanjenja gubitaka odabirom optimalnih ET iz primjera 1 i primjera 2.

	Početno stanje			Novo stanje			Promjena	
	Sn [kVA]	Tip transformatora	Gubici	Sn [kVA]	Tip transformatora	Gubici [kWh]	[kWh]	[%]
TS 1	630	8EuTBNO	11.127,98	400	6TBNO	8.640,07	2.487,91	22,36%
TS 2	400	8EuTBNO	9.238,96	400	6TBNO	7.422,65	1.816,31	19,66%

Sukladno pristupima iz dva navedena primjera, pristupilo se izračunu na uzorku od samo 29 trafostanica, konzuma različitog karaktera u smislu sezonskih područja, područja centra grada s plinom kao glavnim energentom za grijanje, ruralnom područje s novogradnjama i/ili starogradnjama. Temeljem tog izuzetno malog uzorka, u tablici IV prikazani su temeljem kontrolnih mjerenja izračunati gubitci el. energije u smislu kWh, a čime bi se izravno utjecalo na ukupne gubitke odabirom najoptimalnije snage energetskog transformatora.

Tablica IV. Prikaz smanjenja gubitaka odabirom optimalnih ET na n=29 trafostanica

	Početno stanje			Novo stanje			Promjena	
	Sn [kVA]	Tip transformatora	Gubici	Sn [kVA]	Tip transformatora	Gubici [kWh]	[kWh]	[%]
TS n = 29	400/630	8EuTBNO	327.695,62	400	6TBNO	254.431,90	73.263,71	22,357%

Iz tablice se može vidjeti da je uzorkom obuhvaćeno 29 trafostanica s instaliranim energetskim transformatorima nazivnih snaga 400 kVA i 630 kVA, te da je izračun rezultat dao za najoptimalniji odabir energetski učinkovite transformatore nazivne snage 400 kVA čime se godišnji gubitci bili smanjeni za 73.263,71 kWh. Naravno, izračuni su dali i za rezultat zamjenu postojećih 630 kVA s drugim nazivne snage 400 kVA u izvedbi 8EuTBNO, ali smanjenje gubitaka bilo nešto manje.

Ono što se je zanimljivo, analizirajući ostvarene maksimalne snage u pojedinim trafostanicama tijekom perioda promatranja, ali što za rezultat ne bi imalo smanjenje gubitaka, podatak je da se s aspekta opterećenja pojedini transformatori 630 kVA mogu zamijeniti s transformatorima 250 kVA.

5. ZAKLJČAK

Kao što je navedeno, HEP – Operator distribucijskog sustava d.o.o. za nabavu energije za gubitaka tijekom svake godine plaća znatan iznos, a što može značajno utjecati na poslovanje i prihode s obzirom da je operator regulirana djelatnost. Koliko drastično mogu porasti troškovi nabave gubitaka pokazalo se 2018. i početkom 2019.godine kada je cijena energije znatno rasla na tržištu i što je još za rezultat imalo i poremećaj u cijenama opskrbe električne energije.

Stoga je potrebno osim konstantno spominjanih mjera za smanjenje netehničkih gubitaka el. energije, kontrole mjernih mjesta, kontrole neovlaštenih potrošnji električne energije, kontrole točnosti mjerne opreme, pogledati malo i ovaj aspekt smanjenja gubitaka preko optimalnog odabira energetskih transformatora.

Kao što je u referatu spomenuto, nerijetko se prigodom održavanja i zamjena postojećih energetskih transformatora vodi principom da se ugrađuje ono što je adekvatno po nazivnoj snazi i trenutno raspoloživo na skladištu, ali ovaj rad bi trebao imati za cilj malo skrenuti pozornost da poduzimanjem mjera za smanjenje gubitaka na jednoj strani, ovdje neoptimalnim odabirom ET otvaramo problem koji opet dijelom povećava gubitke na drugoj strani.

Za novi pristup je potrebno poduzeti nove pristupe i promijeniti neke ustaljene prakse:

Potrebno je kao standardno rješenje u projektiranju konzumnih 10(20)/0,4 kV predvidjeti ugradnju kontrolnih mjerenja u smislu ugradnje naprednih višefunkcionalnih i višekanalnih mjernih uređaja (brojila) koji mjere između ostalog fazne napone, fazne struje u skladu s HR EN 50160, THD radne energije kao i krivulje energije i snage u 15-minutnim intervalima koji su neophodni za optimalni odabir ET.

Ugradnjom ovakvih brojila kao standardne opreme u TS, potrebno je promijeniti praksu očitavanja opterećenja 2 puta godišnje na prikupljanje podataka svaki mjesec.

Svako je potrebno promijeniti pristup u planiranju poslovanja, a koje treba biti temelj i za postupke javne nabave u smislu da se točnim definiranjem transformatorskih stanica koje se planiraju revitalizirati, uređivati i u kojima se planiraju samo zamjene postojećih energetskih transformatora raspisuju nabave za ciljane energetske transformatore i pojedine transformatorske stanice. Točnije, tijekom prve polovice godine planirati postrojenja za uređenja naredne godine kako bi se postupkom nabave pravodobno nabavila adekvatna oprema uključujući optimalno odabrane transformatore.

Razlog promišljenog pristupa planiranju je svakako podatak da se optimalnim ET odabirom na 29 trafostanica godišnje smanje gubici električne energije za cca 73.000 kWh, a aproksimirajući na ukupan trenutno broj trafostanica na području operatora i ukupan broj godišnjih zamjena energetskih transformatora bez detaljnog proračuna optimalne snage, svakako možemo pretpostaviti da je riječ o energiji gubitaka u milijunima kWh.

Razmisliti da ulaganje u energetske učinkovite transformatore znači smanjenje energetskih gubitaka, smanjenje uticaja na okoliš, smanjenje operativnih troškova, pruduženje radnog vijeka transformatora i povećanje indikatora energetske učinkovitosti [4]

6. LITERATURA

- [1] "Regulacijski distributivni transformator", HO – CIRED 4. (10.) savjetovanje Trogir/Seget Donji, 11. - 14. svibnja 2014.; Sanela Carević, Mario Bakarić, Branimir Ćucić, Martina Mikulić; Končar D&ST.
- [2] Končar D&St katalog Distributivni transformatori 50-8000 kVA,
- [3] R. Goić: "Distribucija električne energije", <http://marjan.fesb.hr/~rgoic/dm/skriptaDM.pdf>,
- [4] „Energetska učinkovitost transformatora“, HO – CIRED 4. (10.) savjetovanje Trogir/Seget Donji, 11. - 14. svibnja 2014.; Krešimir Tačković, Ivica Petrović i Hrvoje Glavaš; HEP – ODS d.o.o. HOPS, Elektrotehnički fakultet Osijek