

Alen Pavlinić, mag.ing.el.
HEP ODS d.o.o. Elektroistra Pula
alen.pavlinic@hep.hr

dr. sc. Vitomir Komen, dipl.ing.el.
HEP ODS d.o.o. Elektroprimorje Rijeka
vitomir.komen@hep.hr

Emil Malagić, mag.ing.el. techn. inf.
HEP ODS d.o.o. Elektroistra Pula
emil.malagic@hep.hr

SMANJENJE GUBITAKA OPTIMIZACIJOM PARALELNOG RADA TRANSFORMATORA

SAŽETAK

Kroz rad se prvo s teorijskog aspekta obuhvaća proračun gubitaka u željezu i bakru jednog transformatora te transformatora u paralelnom radu temeljem Γ nadomjesne sheme transformatora. Potom se utvrđuje kriteriji pod kojim je optimalnije s aspekta gubitaka izvršiti isključenje jednog transformatora uz definiranje i određenih praktičnih ograničenja primjene. Konačno sama razvijena metoda testira se na konkretnom primjeru TS 35/x kV te se utvrđuju uštede koje se mogu ostvariti optimizacijom paralelnog rada.

Ključne riječi: transformatori, paralelni rad, gubici, optimizacija

REDUCTION OF LOSSES WITH OPTIMIZATION OF PARALLEL TRANSFORMERS OPERATION

SUMMARY

Through the paper at first from the theoretical aspect the calculation of core losses and copper losses with the application of the Γ equivalent circuit of transformer for the case of one transformer and for transformers in parallel is given. Then the paper moves in the determination of the basic criteria that determines from the aspect of transformer losses when is more convenient to switch off one transformer from parallel operation. Moreover, some practical limits for the application of the developed method are presented. Finally, the developed method is tested on one real transformer station 35/10 kV and the savings obtained in the case of parallel transformer optimization are calculated.

Key words: transformers, parallel operation, losses, optimization

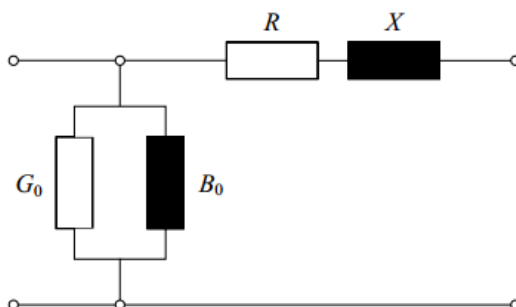
1. UVOD

Gubici u transformatora mogu se podijeliti na gubitke u željezu i bakru. Gubitci u željezu posljedica su nastanka efekta histereze i vrtložnih struja uzrokovanih vremenski promjenjivim magnetskim poljem u jezgri. Gubici u željezu ovisni su o frekvenciji i naponu odnosno magnetskoj indukciji u jezgri. Kako kod energetskih transformatora napon i frekvencija su približno konstantni tokom rada transformatora moguće je smatrati da su gubici u željezu konstantni i neovisni o samom opterećenju transformatora. Gubici u bakru predstavljaju gubitke u namotima uslijed protoka struje. Navedeni gubici ovisni su o opterećenju transformatora. Radi proračuna gubitaka transformatora moguće je koristiti više različitih modela. U ovom radu koristiti će se Γ nadomjesni model transformatora radi proračuna gubitka. Dodatno, prikazat će se način proračuna granične točke u kojoj je povoljnije s aspekta gubitaka isključenje jednog transformatora u paralelnom radu temeljem razvijenog modela.

2. GUBICI TRANSFORMATORA

2.1. Nadomjesni Γ model transformatora

Za potrebe ovog rada model transformatora prikazan je pomoću nadomjesne Γ sheme. Γ model transformatora nije potpuni model, ali za potrebe distribucije električne energije pomoću njega se postiže odgovarajuća točnost. Nadomjesni Γ model transformatora prikazan je na slici 1.



Slika 1. Nadomjesna Γ shema transformatora

Parametri nadomjesne Γ sheme određuju se prema slijedećim izrazima:

$$Z = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_B^2}{S_n^2} \quad (1)$$

$$R = P_{cu} \cdot \frac{U_B^2}{S_n^2} \quad (2)$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (3)$$

$$Y_0 = \frac{i_0}{100} \cdot \frac{S_n}{U_B^2} \quad (4)$$

$$G_0 = \frac{P_0}{U_B^2} = \frac{1}{R_0} \quad (5)$$

$$B_0 = \sqrt{Y_0^2 - G_0^2} \quad (6)$$

gdje su:

Z, R, X- uzdužna impedancija, otpor i reaktancija transformatora [Ω]

u_k - napon kratkog spoja transformatora [%]

U_B -bazni napon transformatora [kV]

S_n -nazivna prividna snaga transformatora [MVA]

P_{cu} -trofazni nazivni gubici u bakru transformatora [kW]

Y_0, G_0, B_0 -poprečna admitancija, konduktancija, susceptancija transformatora [S]

R_0 -poprečni otpor transformatora [Ω]

i_0 - struja magnetiziranja transformatora, struja praznog hoda [%]

P_0 -trofazni nazivni gubici praznog hoda transformatora [kW]

Kod ovog modela transformatora svi parametri preračunavaju se na jednu stranu, primarnu ili sekundarnu te se u tom slučaju koristi jedan nazivni napon kao bazni napon. Za potrebe ovog rada u numeričkom dijelu parametri će se preračunati na primarnu stranu transformatora.

2.2. Proračun gubitaka primjenom Γ sheme za slučaj jednog transformatora

Uz pretpostavku da je struja primara jednaka reduciranoj struji sekundara gubici u bakru transformatora iznose:

$$P_k = 3 \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R \quad (7)$$

$$\vec{I} = \vec{I}_1 = \vec{I}_2' \quad (8)$$

gdje su:

I -ukupna struja tereta [A]

I_1, I_2' - struja primara i reducirana struja sekundara transformatora [A]

Ako se pretpostavi da je bazni napon jednak nazivnom primarnom naponu i sekundarnom reduciranom naponu transformatora za gubitke u bakru se može napisati:

$$P_k = 3 \cdot \left| \frac{\vec{S}^*}{\sqrt{3} \cdot \vec{U}_{2red}^*} \right|^2 \cdot R = 3 \cdot \frac{S^2}{3 \cdot U_n^2} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2} \cdot P_{cu} = \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \cdot P_{cu} = \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \cdot P_{cu} = \left(\frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n} \right)^2 \cdot P_{cu} = \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \cdot P_{cu} \quad (9)$$

gdje su:

S -opterećenje transformatora [MVA]

U_{2red}^* -reducirani napon sekundara transformatora [kV]

I_n -nazivna struja transformatora [A]

U_n -nazivni napon transformatora [kV]

Gubici u željezu transformatora određeni su:

$$P_{Fe} = 3 \cdot \frac{|\vec{V}_1|^2}{R_0} \quad (10)$$

gdje su:

V_1 -fazni napon primara transformatora [kV]

Uz pretpostavku nazivnog napona na primaru može se napisati:

$$P_{Fe} = 3 \cdot \frac{|\vec{V}_1|^2}{R_0} = 3 \cdot \frac{\left| \frac{U_n}{\sqrt{3}} \right|^2}{\frac{U_n^2}{P_0}} = P_0 \quad (11)$$

Ukoliko se pretpostavi da je dopušteno odstupanje napona u distribucijskoj mreži $\pm 10\%$ te da se stvarni primarni napon povećao za 10% vrijedi:

$$\frac{P_{Fe\text{novi}}}{P_{Fe}} = \frac{3 \cdot \frac{\left| \frac{1,1 U_n}{\sqrt{3}} \right|^2}{\frac{U_n^2}{P_0}}}{3 \cdot \frac{\left| \frac{U_n}{\sqrt{3}} \right|^2}{\frac{U_n^2}{P_0}}} = 1,21 \quad (12)$$

Dakle, u najgorim pogonskim uvjetima kako je pokazano u izrazu (12) gubici u željezu transformatora mogu biti 21% veći od nazivno definiranih.

Kod analize gubitaka na realnom primjeru u sklopu ovoga rada koristiti će se izraz (7) za analizu gubitaka u bakru te izrazi (10) ili (11) za gubitke u željezu.

2.3. Proračun gubitaka primjenom Γ sheme za slučaj dva transformatora u paraleli

Jednadžbe koje će biti postavljene u nastavku vrijede za slučaj da oba transformatora imaju jednake prijenosne omjere i položaje regulacijske preklopke na primaru transformatora.

Kod paralelnog rada transformatora ukupno strujno opterećenje transformatora moguće je prikazati kao:

$$\vec{I} = \vec{I}_{1p} + \vec{I}_{2p} \quad (13)$$

gdje su:

I_{1p}, I_{2p} -struje kroz pojedini transformator u paralelnom radu [A]

Dodatno, uz pretpostavku jednakih prijenosnih omjera moguće je zapisati:

$$\vec{I}_{1p} \cdot \vec{Z}_1 = \vec{I}_{2p} \cdot \vec{Z}_2 \quad (14)$$

gdje su:

Z_1, Z_2 -uzdužna impedancija pojedinog transformatora u paralelnom radu [Ω]

Iz jednadžbi (13) i (14) dobije se struja kroz pojedini transformator u ovisnosti o ukupnom strujnom opterećenju prema izrazima:

$$\vec{I}_{1p} = \frac{\vec{Z}_2}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} \cdot \vec{I} \quad (15)$$

$$\vec{I}_{2p} = \frac{\vec{Z}_1}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} \cdot \vec{I} \quad (16)$$

Ukupni gubici u bakru za slučaj paralelnog rada dva transformatora određuju se prema izrazu:

$$P_k = 3 \cdot \frac{|\vec{Z}_2|^2}{|\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2|^2} \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R_1 + 3 \cdot \frac{|\vec{Z}_1|^2}{|\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2|^2} \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R_2 \quad (17)$$

gdje su:

R_1, R_2 -uzdužni otpor pojedinog transformatora u paralelnom radu [Ω]

Ukupni gubici u željezu za slučaj paralelnog rada dva transformatora određuju se prema:

$$P_{Fe} = 3 \cdot \frac{|\vec{V}_1|^2}{R_{01}} + 3 \cdot \frac{|\vec{V}_1|^2}{R_{02}} \approx P_{01} + P_{02} \quad (18)$$

gdje su

R_{01}, R_{02} -poprečni otpor pojedinog transformatora u paralelnom radu [Ω]

P_{01}, P_{02} -trofazni nazivni gubici u praznom hodu pojedinog transformatora u praznom hodu [kW]

3. ODREĐIVANJE GRANIČNE TOČKE PARALELNOG RADA

Granična točka paralelnog rada određena je strujnim opterećenjem pri kojem su gubici jednog transformatora jednaki gubicima transformatora u paralelnom radu prema izrazima:

$$3 \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R_1 + 3 \cdot \frac{|\vec{V}_1|^2}{R_{01}} = 3 \cdot \frac{|\vec{Z}_2|^2}{|\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2|^2} \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R_1 + 3 \cdot \frac{|\vec{Z}_1|^2}{|\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2|^2} \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R_2 + 3 \cdot \frac{|\vec{V}_1|^2}{R_{01}} + 3 \cdot \frac{|\vec{V}_1|^2}{R_{02}} \quad (19)$$

$$3 \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R_2 + 3 \cdot \frac{|\vec{V}_1|^2}{R_{02}} = 3 \cdot \frac{|\vec{Z}_2|^2}{|\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2|^2} \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R_1 + 3 \cdot \frac{|\vec{Z}_1|^2}{|\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2|^2} \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R_2 + 3 \cdot \frac{|\vec{V}_1|^2}{R_{01}} + 3 \cdot \frac{|\vec{V}_1|^2}{R_{02}} \quad (20)$$

Rješavanjem izraza (19) i (20) dobiva se granično strujno opterećenje (I) pri kojoj je povoljno s aspekta gubitka isključenje razmatranog transformatora u paralelnom radu. Ukoliko se pojednostave gubici u željezu prema jednadžbama (11) i (18), jednadžbe (19) i (20) mogu se prikazati prema izrazima:

$$3 \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R_1 + P_{01} = 3 \cdot \frac{|\vec{Z}_2|^2}{|\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2|^2} \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R_1 + 3 \cdot \frac{|\vec{Z}_1|^2}{|\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2|^2} \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R_2 + P_{01} + P_{02} \quad (21)$$

$$3 \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R_2 + P_{02} = 3 \cdot \frac{|\vec{Z}_2|^2}{|\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2|^2} \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R_1 + 3 \cdot \frac{|\vec{Z}_1|^2}{|\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2|^2} \cdot |\vec{I}|^2 \cdot R_2 + P_{01} + P_{02} \quad (22)$$

4. OSTALI UTJECAJNI PARAMETRI

Negativan utjecaj isključenja jednog transformatora iz paralelnog rada pri malim opterećenjima čini smanjenje pouzdanosti napajanja pripadne mreže. Stoga, ukoliko u mreži postoje osjetljivi kupci ili proizvođači treba razmotriti i s aspekta pouzdanosti napajanja da li je opravdano isključenje jednog transformatora iz paralelnog rada. Proračun pouzdanosti napajanja vrši se prema IEEE 493 standardu.[1] Uz određene pretpostavke moguće je zapisati za transformatore u paraleli (kada je opterećenje manje od opterećenja jednog transformatora i zanemarenjem pouzdanosti sklopnih aparata) slijedeće izraze:

$$Q_p = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot r_1 \cdot r_2}{8760} \quad (23)$$

$$P_p = P_t \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (r_1 + r_2)}{8760} \quad (24)$$

gdje su:

λ_1, λ_2 -učestalost kvarova pojedinih transformatora [1/god]

r_1, r_2 -vrijeme zastoja pojedinog transformatora po kvaru [h]

Q_p -vrijeme koje sustav nije raspoloživ u godini [h/god]

P_p - ukupna neisporučena snaga u godini zbog kvara [MW/god]

P_t - ukupna snaga koju je potrebno prenijeti [MW]

U slučaju uključenosti jednog transformatora izrazi (23), (24) postaju:

$$Q_{p1} = \frac{\lambda_1 \cdot r_1}{8760}; Q_{p2} = \frac{\lambda_2 \cdot r_2}{8760} \quad (25)$$

$$P_{p1} = P_t \cdot \frac{\lambda_1 \cdot r_1}{8760}; P_{p2} = P_t \cdot \frac{\lambda_2 \cdot r_2}{8760}; \quad (26)$$

Pored pouzdanosti napajanja za ocjenu opravdanosti optimizacije paralelnog rada korisno je i odrediti vremenski interval koji prikazuje koliko vremenski objekt može biti bez napajanja, a da se uštede uslijed gubitaka isplate prema izrazu:

$$t_p = \frac{W_{gub}}{P_t} \quad (27)$$

gdje su:

W_{gub} -ukupne uštede ostvarene optimizacijom paralelnog rada [kWh]

Pored samih kriterija prethodno navedenih potrebno je voditi računa da se isključivanje odnosno uključivanje pojedinih transformatora iz paralelnog rada ne vrši prečesto u stvarnom pogonu posebice u slučaju da objekt posjeduje starije prekidače. Dodatno, smatra se da za izradu optimalnog plana uključivanja i isključivanja transformatora nužno je vršiti predviđanja opterećenja tokom budućih mjeseci.

5. ANALIZA GUBITAKA TS 35/10 kV VRSAR

Prema prethodno opisanim postupcima izvršena je analiza gubitaka za TS 35/10 kV Vrsar pri čemu se gubici u bakru računaju prema struji primara i određenoj Γ nadomjesnoj shemi uz pretpostavku da je struja primara jednaka reduciranoj struji sekundara, a gubici u željezu u prvom djelu smatraju se konstantnima dok se u drugom djelu uvažava primarni napon. Podaci transformatora 35/10,5 kV dani su u tablici I.

Tablica I. Podaci o transformatorima u TS 35/10 kV Vrsar

Podaci	TR1	TR2
S_n	8MVA	8MVA
P_0	10,4kW	10,4kW
i_0	0,99%	0,99%
P_{cu}	50,4kW	50,4kW
u_k	6,8%	6,69%

Proračun potrebnih parametara Γ nadomjesne sheme:

Transformator 1:

$$Z_1 = \frac{6,8}{100} \cdot \frac{35^2}{8} = 10,4125[\Omega] \quad (28)$$

$$R_1 = 50,4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{35^2}{8^2} = 0,9647[\Omega] \quad (29)$$

$$X_1 = \sqrt{10,4125^2 - 0,9647^2} = 10,3677[\Omega] \quad (30)$$

$$R_{01} = \frac{35^2}{10,4 \cdot 10^{-3}} = 117788[\Omega] \quad (31)$$

Transformator 2:

$$Z_2 = \frac{6,69}{100} \cdot \frac{35^2}{8} = 10,244[\Omega] \quad (32)$$

$$R_2 = 50,4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{35^2}{8^2} = 0,9647[\Omega] \quad (33)$$

$$X_2 = \sqrt{10,244^2 - 0,9647^2} = 10,1985[\Omega] \quad (34)$$

$$R_{02} = \frac{35^2}{10,4 \cdot 10^{-3}} = 117788[\Omega] \quad (35)$$

Uvrštavanjem izračunatih parametara u jednačbe (21) i (22) granična točka u kojoj su gubici pojedinog transformatora i gubici oba transformatora u paralelnom radu jednaki iznosi:

$$2,8941 \cdot |\vec{I}|^2 + 10,4 \cdot 10^3 = 0,7118 \cdot |\vec{I}|^2 + 0,7354 \cdot |\vec{I}|^2 + 10,4 \cdot 10^3 + 10,4 \cdot 10^3 \quad (35)$$

$$I = \sqrt{\frac{10,4 \cdot 10^3}{1,4469}} = 84,78[A] \quad (36)$$

$$2,8941 \cdot |\vec{I}|^2 + 10,4 \cdot 10^3 = 0,7118 \cdot |\vec{I}|^2 + 0,7354 \cdot |\vec{I}|^2 + 10,4 \cdot 10^3 + 10,4 \cdot 10^3 \quad (37)$$

$$I = \sqrt{\frac{10,4 \cdot 10^3}{1,4469}} = 84,78[A] \quad (38)$$

Isključivanje drugog transformatora iz paralelnog rada je sa stajališta gubitaka povoljno pri struji od 84,78 A na primaru, odnosno pri prividnoj snazi od:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I = \sqrt{3} \cdot 35 \cdot 84,78 = 5,14[MVA] \quad (39)$$

U slučaju da se gubici u željezu ili radni otpori u uzdužnoj grani razlikuju među pojedinim transformatorima u paraleli pri proračunu graničnih struja opterećenja može doći i do određenih razlika (što nije u ovom slučaju).

Na konkretnoj lokaciji prosječni napon na primaru kroz godinu iznosio je 36,13 kV (prema podacima iz SCADA) pa vrijedi:

$$2,8941 \cdot |\bar{I}|^2 + 11,1 \cdot 10^3 = 0,7118 \cdot |\bar{I}|^2 + 0,7354 \cdot |\bar{I}|^2 + 11,1 \cdot 10^3 + 11,1 \cdot 10^3 \quad (40)$$

$$I = \sqrt{\frac{11,1 \cdot 10^3}{1,4469}} = 87,59[A] \quad (41)$$

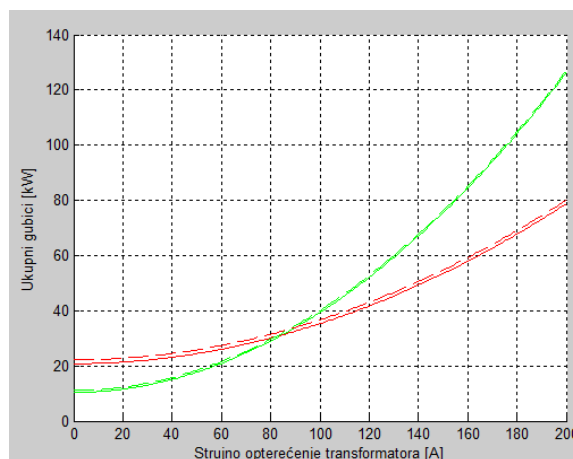
Referentno opterećenje pri kojem je povoljno isključenje drugog transformatora je:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 36,13 \cdot 87,59 = 5,48[MVA] \quad (42)$$

gdje je:

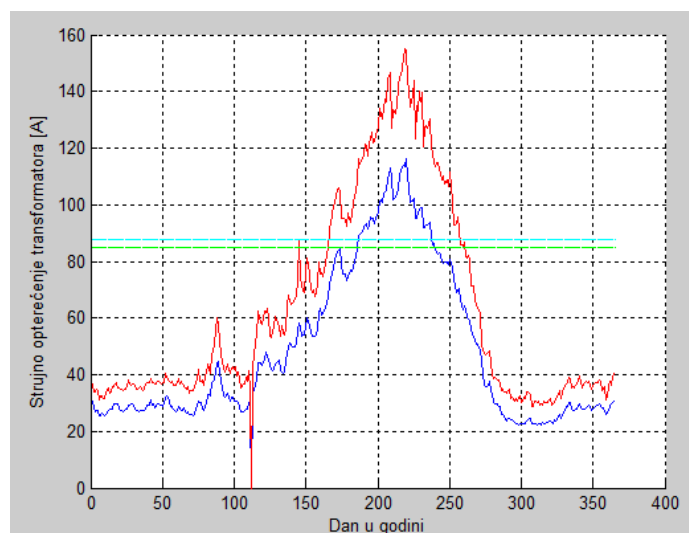
U-linijski napon primara[kV]

Grafički prikaz ovisnosti gubitaka u transformatoru u ovisnosti o opterećenju prikazan je na slici 2. pri čemu se jasno ističu granične izračunate točke od 84,78 A pri naponu od 35kV i 87,59A pri naponu od 36,13kV.

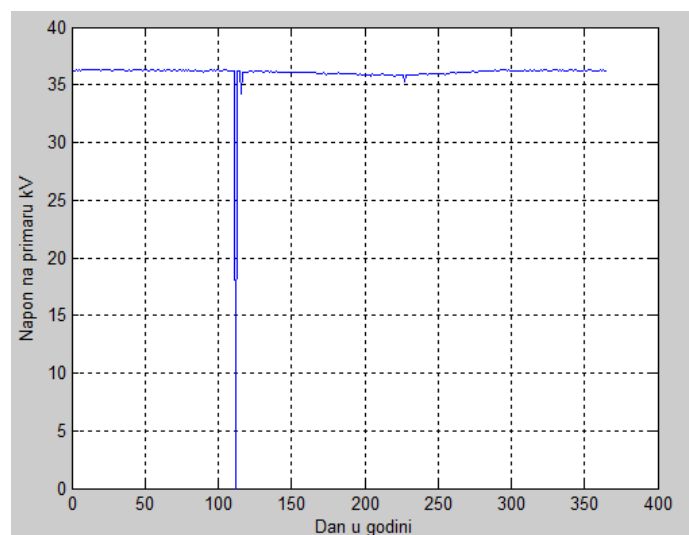


Slika 2. Granično opterećenje transformatora (nazivni napon 35kV puna linija zeleno jedan transformator crveno dva, napon od 36,13kV isprekidana linija zeleno jedan transformator crveno dva)

Na slici 3. prikazana su prosječna i vršna 15 min strujna opterećenja na razini dana (mjerena na strani primara) tokom cijele godine u TS 35/10 kV Vrsar (iz SCADA-e). Dodatno prikazana su i prethodno računata granična opterećenja. Vršna 15min opterećenja na razini dana korisna su za ocjenu u kojim mjesecima bi bilo moguće isključenje jednog transformatora, a prosječna radi procjene smanjenja gubitaka u odnosu na paralelni režim rada. Na slici 4. priložena je promjena napona na primarnoj strani transformatora. U 112 danu u godini (22.travanj-23.travanj) došlo je do greške komunikacije te je nepoznato koliki je bio napon na primaru i strujno opterećenje. Prema priloženim slikama moguće je doći do slijedećeg zaključka da prema graničnom opterećenju od 84,78 A postoji 98 dana u kojima je potrebno uključivanje drugog transformatora, a prema opterećenju od 87,59 A 93 dana. Dakle, nešto više od 3mj sa stajališta gubitaka potrebno je da rade oba transformatora dok preostale mjesece dovoljan je samo jedan transformator.



Slika 3. Promjena opterećenja na temelju 15 minutnih vršnih(crveno) i prosječnih(plavo) mjerenja u razdoblju od 1 dana tokom godine TS 35/10 kV Vrsar 2013. god



Slika 4. Promjena napona na primaru tokom godine TS 35/10 kV Vrsar 2013. god

Ukoliko bi transformatori radili prema navedenom optimalnom načelu (nešto više od 3 mjeseca unutar pogona 2 transformatora) tada bi uštede u odnosu na paralelni rad iznosile:

1. Za slučaj da je granično opterećenje 84,78 A i da se gasi jedan transformator pri manjim opterećenjima vrijedi raspored raspodjele gubitaka za 2013. u TS 35/10 kV Vrsar prema slici 5. (lijevo). Ušteda je prikazana na slici 5. (lijevo), a obzirom da je sve računato po danima na temelju prosjeka 15 minutnih vrijednosti tokom dana, vrijednosti crvene krivulje potrebno je pomnožiti 24 i sumirati. Navedeno je odrađeno putem Matlab-a sumirano uštede na gubicima u ovom slučaju iznose: $5,5408 \cdot 10^4$ kWh.

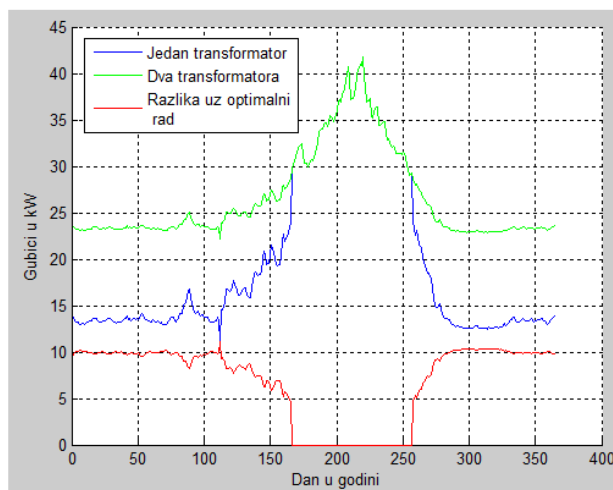
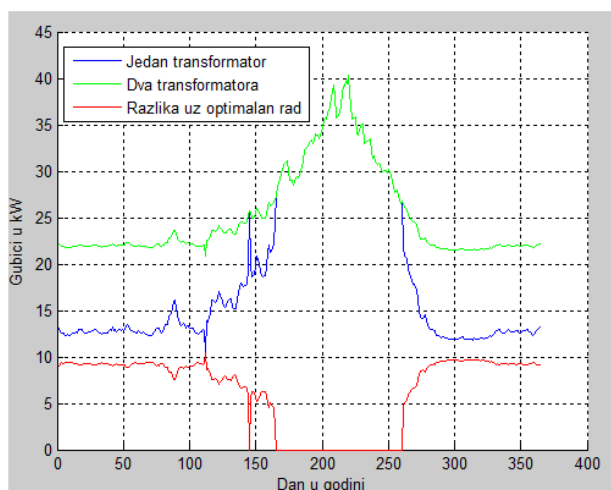
2. Za slučaj da je granično opterećenje 87,59 A i da se gasi jedan transformator pri manjim opterećenjima vrijedi raspored raspodjele gubitaka za 2013. u TS 35/10 kV Vrsar prema slici 5. (desno). Ušteda je prikazana na slici 5.(desno), a obzirom da je sve računato po danima na temelju prosjeka 15 minutnih vrijednosti tokom dana, vrijednosti crvene krivulje potrebno je pomnožiti 24 i sumirati. Navedeno je odrađeno putem Matlab-a sumirano uštede na gubicima u ovom slučaju iznose: $6,0417 \cdot 10^4$ kWh.

Navedene uštede su maksimalne te nije realno da će se ostvariti što ovisi o načinu određivanja programa paralelnog odnosno neparalelnog rada. Ukoliko primjerice za razmatranu TS 35/10 kV Vrsar se odredi program da od listopada do lipnja se gasi transformator u paraleli tada bi ušteda gubitaka za TS 35/10 kV Vrsar prema opterećenjima iz 2013.god iznosila prema slici 6.

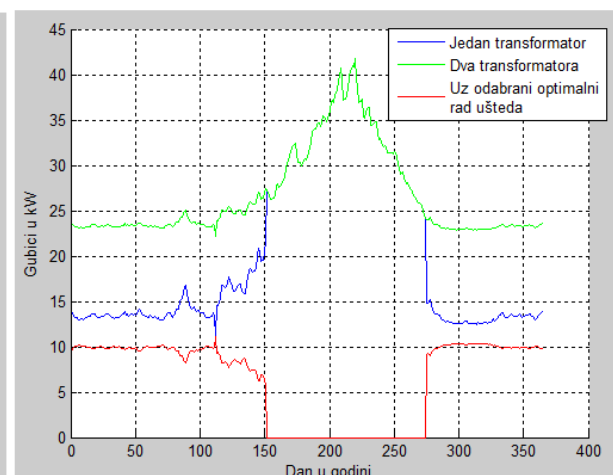
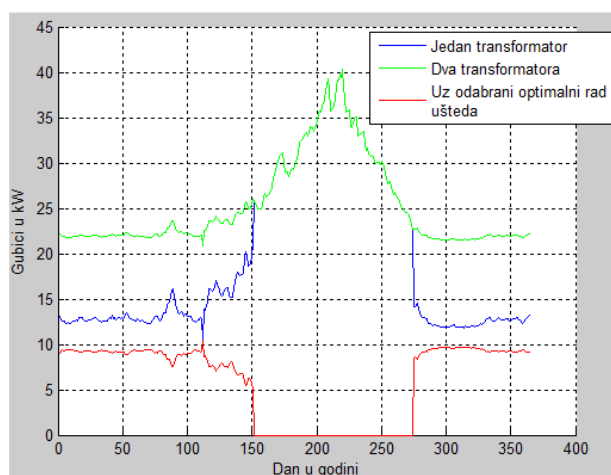
Uštede za slučaj da jedan transformator radi od listopada do lipnja iznose:

1. $U=U_n=35$ kV, ušteda: $5,1699 \cdot 10^4$ kWh

2. $U=36,13$ kV, ušteda: $5,5663 \cdot 10^4$ kWh



Slika 5. Ušteda na gubicima u TS 35/10 kV Vrsar u 2013. godini pri optimalnom radu transformatora uz opterećenje granično 84,78 A (lijevo), 87,59 (desno)



Slika 6. Uštede u slučaju da jedan transformator radi od listopada do lipnja prema opterećenju TS 35/10 kV Vrsar u 2013. god uz granično opterećenje 84,78 A (lijevo), 87,59 (desno)

6. ANALIZA OSTALIH UTJECAJNIH FAKTORA TS 35/10 kV VR SAR

Ukoliko se pretpostavi da je učestalost kvara oba transformatora 0,003 u godini dana ($\lambda_1=\lambda_2=0,003$ god⁻¹), a vrijeme popravka kvara pojedinog transformatora 130h ($r_1=r_2=130$ h) te da je snaga koju je potrebno prenijeti jednaka graničnoj snazi 5,48 MW (prema izrazu (42) uz idealni faktor snage 1) tada za slučaj uključenosti dva transformatora vrijede slijedeći pokazatelji pouzdanosti:

$$Q_p = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot r_1 \cdot r_2}{8760} = \frac{0,003 \cdot 0,003 \cdot 130 \cdot 130}{8760} = 1,74 \cdot 10^{-5} [h / god] \quad (43)$$

$$p_p = P_t \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (r_1 + r_2)}{8760} = 5,48 \cdot \frac{0,003 \cdot 0,003 \cdot (130 + 130)}{8760} = 1,46 \cdot 10^{-6} [MW / god] \quad (44)$$

U slučaju jednog transformatora vrijedi slijedeće:

$$Q_p = \frac{\lambda_1 \cdot r_1}{8760} = \frac{0,003 \cdot 130}{8760} = 4,45 \cdot 10^{-5} [h / god] \quad (25)$$

$$p_{p1} = p_{p2} = P_t \cdot \frac{\lambda_1 \cdot r_1}{8760} = 5,48 \cdot \frac{0,003 \cdot 130}{8760} = 2,44 \cdot 10^{-4} [MW / god] \quad (26)$$

Iz proračunatih vrijednosti vidljivo je da u slučaju uključenosti jednog transformatora parametri se znatno pogoršavaju. Uz odabrane parametre za proračun (prema IEEE 493 standardu) neraspoloživost se povećava 2,55 puta, a neisporučena snaga uslijed kvarova 167 puta u odnosu na slučaj kada su uključena oba transformatora.

Vrijeme pri graničnom opterećenju u kojem TS 35/10 kV Vrsar može biti bez napajanja, a da se uštede uslijed gubitaka isplate, uz pretpostavku da je jedan transformator isključen od listopada do lipnja i napon da iznosi 36,13 kV je:

$$t_p = \frac{W_{gub}}{P_t} = \frac{5,5663 \cdot 10^4}{5,48 \cdot 10^3} = 10,15 [h] \quad (27)$$

Iz izraza (27) pokazuje se da je praktički 10,15 h moguće kroz godinu dana pri graničnom opterećenju da konzum bude bez napajanja, a da se ušteda na gubicima isplati. S aspekta tog vremena obzirom da uvijek postoji jedan transformator u rezervi jasno je da je uvijek isplativo isključenje jednog transformatora pri manjim opterećenjima od graničnog.

7. ZAKLJUČAK

Kroz rad je sustavno prikazana metodologija proračuna gubitaka transformatora temeljem Γ nadomjesne sheme. Na temelju definirane metodologije proračuna gubitaka određena je granična točka u kojoj je s obzirom na gubitke povoljnije isključenje jednog transformatora. Konačno sama metoda ispitana je na konkretnoj trafostanici TS 35/10 kV Vrsar te su utvrđene uštede na gubicima od oko 55 MWh koje je moguće ostvariti optimizacijom paralelnog rada. Dodatno, utvrđen je utjecaj isključenja transformatora na parametre pouzdanosti i vremena unutar kojeg se pri graničnom opterećenju sami gubici isplate. Prema određenim parametrima i zaključcima svakako za razmatrani objekt se isplati isključenje jednog transformatora izvan ljetnog razdoblja. Iz samog primjera moguće je zaključiti da posebice veliku pozornost u postojećim distribucijama potrebno je posvetiti problematici optimizacije paralelnog rada transformatora obzirom da uštede koje se mogu ostvariti na razini cijelog sustava mogu biti značajne.

8. LITERATURA

- [1] IEEE standard 493: "Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems", veljača 2007. god
- [2] Hratmunt Kiank, Wolfgang Fruth: "Planning guide for power distribution plants", Publics Publishing, Erlangen, 2011. god
- [3] Juan M. Gers: "Distribution system analysis and automation", IET London, 2014. god
- [4] Dolenc, A.: "*Transformatori*", *I dio*, Sveučilište u Zagrebu, 1961. god