

Veljko Špica, mag.ing.el.
HEP ODS, Elektroslavonija Osijek
veljko.spica@hep.hr

Goran Šostarko, mag.ing.el.
HEP ODS, Elektroslavonija Osijek
goran.sostarko@hep.hr

Boris Nikolić, mag.ing.el.
HEP ODS, Elektroslavonija Osijek
boris.nikolic@hep.hr

KOMPENZACIJA JALOVE ENERGIJE IMPLEMENTACIJOM NOVIH TEHNIČKIH RJEŠENJA

SAŽETAK

U radu su opisana obavljena mjerenja na distributivnim transformatorima stare i nove generacije sa uklopnim stanjima u više stupnjeva kompenzacije jalove energije praznog hoda transformatora te su prikazani prijedlozi novih tehničkih rješenja uporabom višenamjenskih mrežnih monitora.

Primjenom energetski učinkovitih transformatora prema zahtjevima za ekološki dizajn u hrvatskoj normi [1] HRN EN 50588-1:2017 potrebno je obaviti usklađenja na kompenzaciji jalove energije (snage) uporabom stupnjevutih kondenzatorskih baterija nove generacije sa produženim vijekom uporabe.

Ključne riječi: ekološki dizajn, distributivni transformator, višenamjenski mrežni monitor, kompenzacija jalove energije, kondenzatorska baterija.

COMPENSATION OF REACTIVE ENERGY WITH IMPLEMENTATION OF NEW TECHNICAL SOLUTION

SUMMARY

This paper describes the measurements performed on old and new generation distribution transformers with switching states in several stages of transformer reactive power compensation with no load and proposes new technical solutions using multifunctional network monitors.

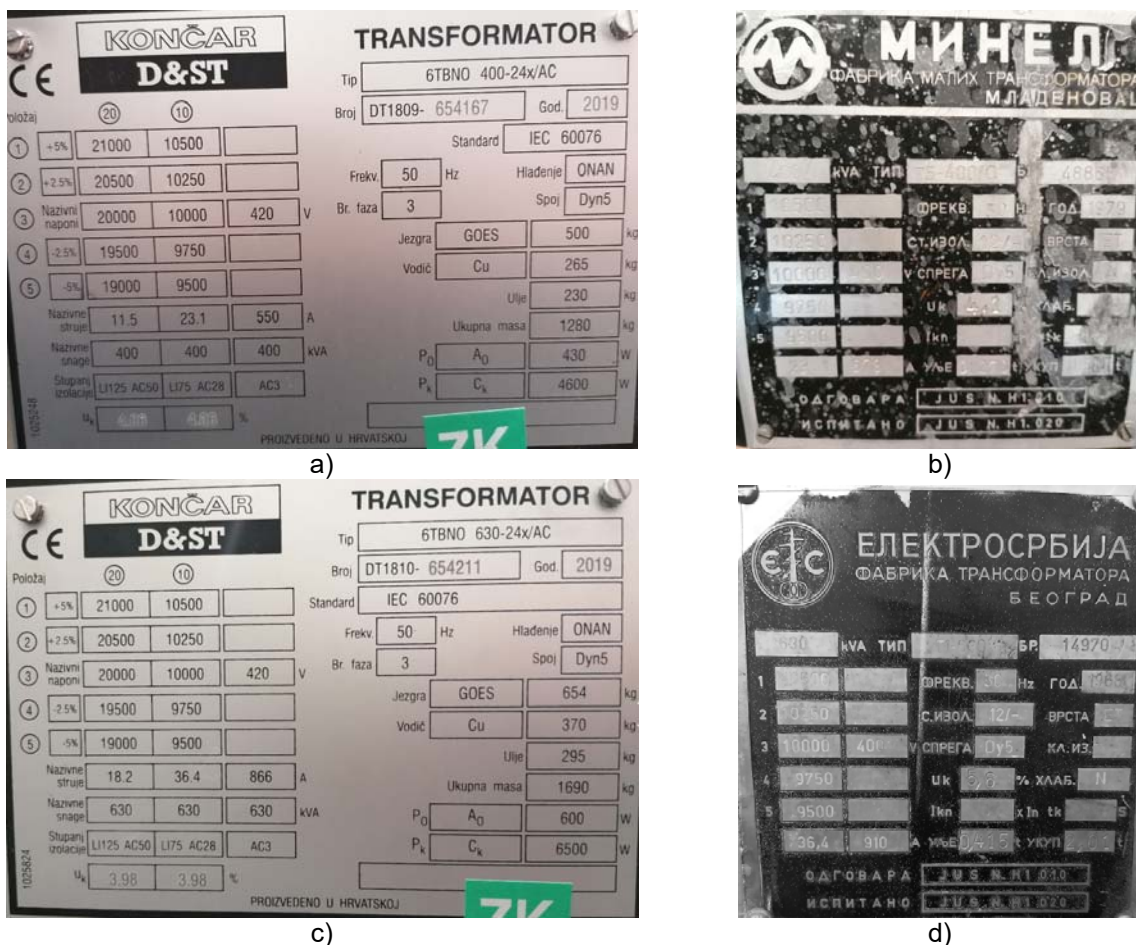
The Croatian standard [1] HRN EN 50588-1:2017 requires the use of energy efficient transformers in accordance with the requirements for eco-design and it is necessary to carry out adjustments to the compensation of the reactive energy (power) using new generation multi stage capacitors with extended life time.

Keywords: eco design, distribution transformer, multifunction power analyser, compensation of reactive energy, capacitor bank.

1. UVOD

Primjenom zahtjeva iz hrvatske norme [1] HRN EN 50588-1:2017 suočeni smo sa činjenicom da su proizvođači distributivnih transformatora značajno smanjili gubitke u praznom hodu i gubitke pri nazivnom teretu. Pобољшанје u proizvodnji ostvareno je uporabom visoko permeabilnih magnetskih limova HGO DR, povećanjem presjeka jezgre, kompaktiranjem namota te povećanjem presjeka vodiča. Navedenim mjerama i optimiranjem proizvođača distributivnih transformatora smanjeni gubici izravno utječu na preporuke internih uputa HEP d.d. Bilten br. 57/1997g. za ugradnju statičkih kondenzatorskih baterija kompenzacije praznog hoda transformatora, gdje su definirani presjeci vodiča, nazivne struje rastalnih uložaka i snage kondenzatorskih baterija u korelaciji sa snagom ugrađenog distributivnog transformatora u transformatorskoj stanici.

Mjerenja su obavljena na distributivnim transformatorima nazivnih snaga 400kVA i 630kVA, stare i nove generacije, približnih tehničkih karakteristika, prikazani na Slici 1. za koje je predviđena uporaba kondenzatorskih baterija nazivnih snaga od 50kVAr. Mjerenja su obavljena u stupnjevima 0 kVAr, 25kVAr i 50kVAr.



Slika 1. Natpisne pločice transformatora: a) Končar D&ST 400 kVA, 2019 g; b) Minel 400 kVA, 1973 g; c) Končar D&ST 630 kVA, 2019 g; d) Elektrosrbija 630 kVA, 1968 g.

2. MJERNA OPREMA, MJERNA METODA, REZULTATI MJERENJA

Mjerenja su obavljena u Ispitnoj stanici Referentnog centra za transformatore Elektroslavonije Osijek. Primarna oprema rabljena za mjerenja su zakretni transformator (indukcijski regulator), uzlazni međutransformator te mjerni blok sa prespojivim naponskim i strujnim mjernim transformatorima.

Mjerna oprema za referentno mjerenje prikazana je na Slici 2. (a) Fluke/LEM Norma 5000, (b) DIOS 03 višenamjenski mrežni monitor. Naponske grane oba instrumenta spojene su paralelno neizravnim spojem sa transformacijom 10000/100 V AC. Strujne grane oba instrumenta spojena su serijski neizravnim spojem omjerom transformacije 5/5 A AC.



Slika 2. a) Norma 5000, b) DIOS 03(2C)

Struje uklopnih stanja kondenzatorskih baterija mjere se multifukcijskim instrumentom sa strujnim klijestima Flir CM85 sa bežičnom komunikacijom prikazani na Slici 3. (a). Napon na niskonaponskoj strani distributivnog transformatora mjeri se mjernim terminalom Schrack, prikazan na Slici 3 (b).



Slika 3. a) Flir CM85, b) Schrack mjerni terminal

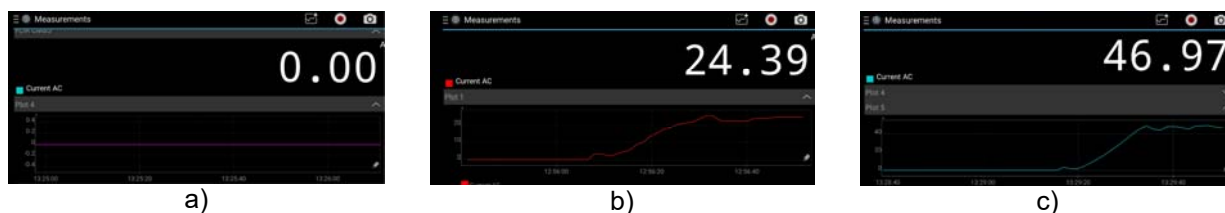
Za kompenzaciju praznog hoda distributivnog transformatora rabi se kondenzatorski blok sa dva stupnja kondenzatorskih baterija 2x25kVAr i ugrađenom rastavnom sklopkom. Kondenzatorskim baterijama ponaosob su dodani sklopnici za sklapanje kapacitivnih tereta. Tehnički podaci jednog stupnja kondenzatorske baterije 25kVAr prikazani su na Slici 4. (a) i prijedloga nove generacije kondenzatorske baterije na Slici 4. (b).



Slika 4. a) Tehnički podaci kondenzatorske baterija 25kVAr; b) VarPlus Can Heavy Duty izvedba

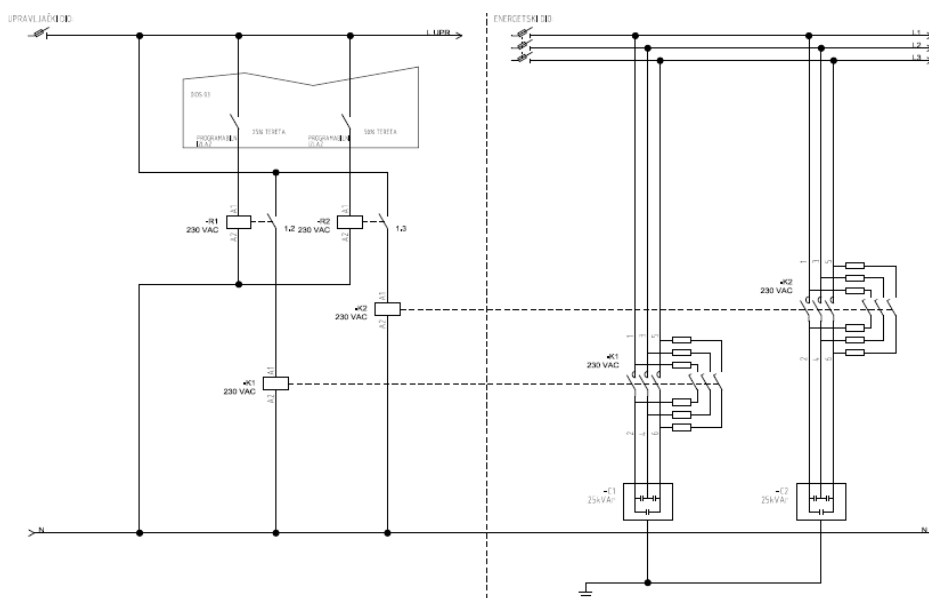
Ograničenje postupka 1: kako bi se postigli isti nazivni naponi u iznosu od 420 V AC na niskonaponskoj strani transformatora stare generacije, a u svemu da se osiguraju približni prijenosni omjeri i naponske razine koje je moguće komparirati, odabire se položaj 5. na regulacijskoj preklopnici transformatora stare generacije. Odabir položaja br.5 je opravdan zbog vrlo bliskog omjera transformacije, time se transformator dodatno dovodi u područje većih gubitaka u praznom hodu, zbog primarno narinutog napona od 10 kV AC.

Na Slici 5. prikazane su struje niskonaponske strane izmjerene sa instrumentom FLIR CM 85 sa bežičnim sučeljem. Izmjerene struje su u svim stupnjevima regulacije simetrične i istih iznosa.



Slika 5. Mjerenje struja na B fazi sekundara na novom transformatoru Končar, snage 630 kVA za slučaj: a) 0 kVAr, b) 25 kVAr, c) 50 kVAr

Spoj upravljanja višenamjenskog mrežnog monitora DIOS 03(2C) sa kondenzatorskim baterijama prikazan je na Slici 6.



Slika 6. Spoj upravljanja DIOS 03 sa kondenzatorskim baterijama

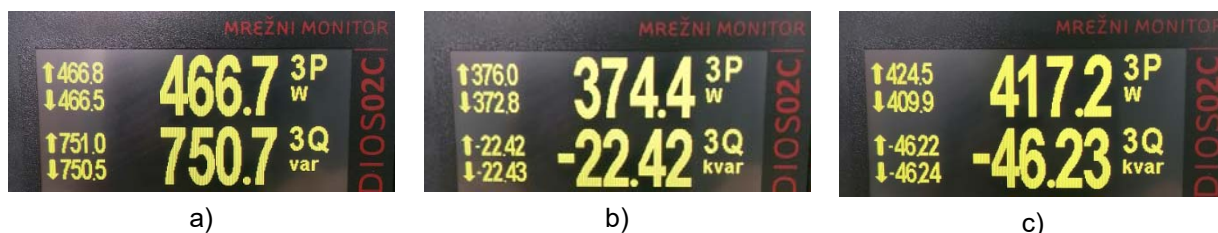
Ograničenja postupka 2: kako bi se osigurali jednoobrazni uvjeti pri mjerenju i kontinuitet cjelokupnih mjerenja sa automatskim uključivanjem stupnjeva kompenzacije, svjesno se ignorira točnost strujnih mjernih transformatora u vrlo malom području mjerenih struja i ne služi za komparaciju mjerenja u praznom hodu i validaciju podataka proizvođača distributivnih transformatora. Pojašnjenje, mjerene struje u praznom hodu su zbog malih iznosa u području velikih tolerancija iznosa i pomaka faznog kuta, identična područja su i u realnim uvjetima u transformatorskoj stanici. Naime, mogućnosti oba instrumenta dopuštaju prilagodba na područja manjih struja i manjih prijenosnih omjera struja za koja su potrebna dodatna parametrisiranja, isključenje izvora i prespajanje strujnih mjernih transformatora.

2.1 Mjerenja nove i stare generacije distributivnih transformatora nazivnih snaga 400 kVA

U Tablici 1. prikazani su rezultati mjerenja distributivnog transformatora nove generacije nazivne snage 400kVA, a na Slici 7. prikazani su zapisi višenamjenskog mjernog terminala DIOS 03(2C).

Tablica 1. Mjerni rezultati novog transformatora snage 400 kVA s preklopkom u položaju br. 3.

400 kVA DETC – pol.3	0 kVAr		25 kVAr		50 kVAr	
	Norma 5000	DIOS	Norma 5000	DIOS	Norma 5000	DIOS
P [kW]	0,466	0,466	0,370	0,374	0,390	0,417
S [kVA]	1,071	0,955	22,777	22,577	46,480	46,429
Q [kVAr]	0,939	0,750	-22,727	-22,420	-46,370	-46,230
U _{rms} [kV]	10,045	10,043	10,021	9,993	10,070	10,063
I _{rms} [A]	0,061	0,055	1,309	1,306	2,659	2,667
PF	0,435 ind	0,529 ind	0,016 cap	0,017 cap	0,008 cap	0,009 cap

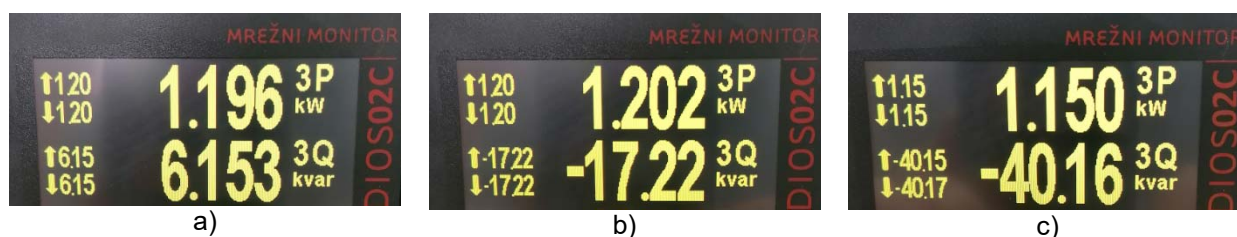


a) b) c)
Slika 7. Izmjerene snage nove generacije distributivnog transformatora nazivne snage 400 kVA
(a) 0 kVAr, (b) 25kVAr, (c) 50kVAr

U Tablici 2. prikazani su rezultati mjerenja distributivnog transformatora stare generacije nazivne snage 400kVA, a na Slici 8. prikazani su zapisi višenamjenskog mjernog terminala DIOS 03(2C).

Tablica 2. Mjerni rezultati starog transformatora snage 400 kVA s preklopkom u položaju br. 5.

400 kVA DETC – pol.5	0 kVAr		25 kVAr		50 kVAr	
	Norma 5000	DIOS	Norma 5000	DIOS	Norma 5000	DIOS
STARI						
P [kW]	1,191	1,196	1,140	1,202	1,122	1,150
S [kVA]	6,510	6,498	18,280	18,155	40,470	40,251
Q [kVAr]	6,393	6,153	-18,197	-17,220	-40,350	-40,160
U _{rms} [kV]	10,017	10,017	10,043	10,033	10,013	10,003
I _{rms} [A]	0,375	0,375	1,048	1,046	2,327	2,326
PF	0,183 ind	0,189 ind	0,062 cap	0,071 cap	0,028 cap	0,028 cap



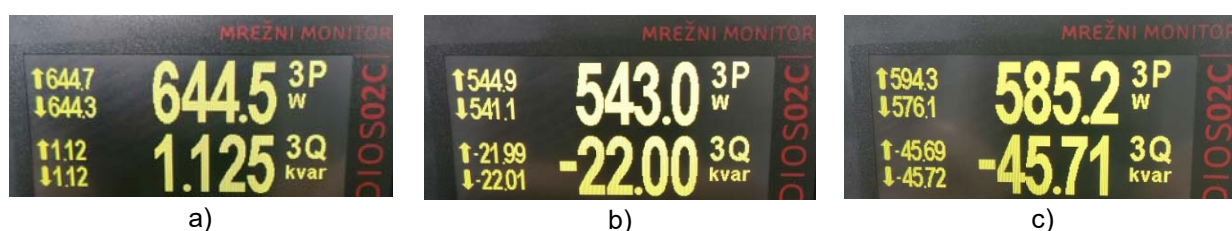
a) b) c)
Slika 8. Izmjerene snage stare generacije distributivnog transformatora nazivne snage 400 kVA
(a) 0 kVAr, (b) 25kVAr, (c) 50kVAr

2.2 Mjerenja nove i stare generacije distributivnih transformatora nazivnih snaga 630 kVA

U Tablici 3. prikazani su rezultati mjerenja distributivnog transformatora nove generacije nazivne snage 630kVA, a na Slici 9. prikazani su zapisi višenamjenskog mjernog terminala DIOS 03(2C).

Tablica 3. Mjerni rezultati novog transformatora snage 630 kVA s preklopkom u položaju br. 3.

630 kVA DETC – pol.3	0 kVAr		25 kVAr		50 kVAr	
	Norma 5000	DIOS	Norma 5000	DIOS	Norma 5000	DIOS
NOVI						
P [kW]	0,647	0,644	0,543	0,543	0,546	0,585
S [kVA]	1,472	1,403	22,410	22,221	45,710	45,542
Q [kVAr]	1,296	1,125	-22,350	-22,000	-45,610	-45,710
U _{rms} [kV]	10,028	10,013	9,990	9,980	10,046	10,021
I _{rms} [A]	0,084	0,081	1,292	1,287	2,621	2,627
PF	0,440 ind	0,493 ind	0,024 cap	0,024 cap	0,012 cap	0,012 cap



a) b) c)
Slika 9. Izmjerene snage nove generacije distributivnog transformatora nazivne snage 630 kVA
(a) 0 kVAr, (b) 25kVAr, (c) 50kVAr

U Tablici 4. prikazani su rezultati mjerenja distributivnog transformatora stare generacije nazivne snage 630kVA, a na Slici 10. prikazani su zapisi višenamjenskog mjernog terminala DIOS 03(2C).

Tablica 4. Mjerni rezultati starog transformatora snage 630 kVA s preklopkom u položaju br. 5.

630 kVA DETC – pol.5	0 kVAr		25 kVAr		50 kVAr	
	Norma 5000	DIOS	Norma 5000	DIOS	Norma 5000	DIOS
P [kW]	2,178	2,173	2,196	2,320	2,137	2,092
S [kVA]	17,557	17,769	14,570	14,550	31,060	31,440
Q [kVAr]	16,877	16,520	-14,240	-8,544	-30,940	-30,260
U _{rms} [kV]	10,069	10,080	10,075	10,013	10,070	10,013
I _{rms} [A]	0,995	1,019	0,836	0,840	1,788	1,815
PF	0,124 ind	0,122 ind	0,151 cap	0,322 cap	0,069 cap	0,072 cap



a)

c)

e)

Slika 10. Izmjerene snage stare generacije distributivnog transformatora nazivne snage 630 kVA (a) 0 kVAr, (b) 25kVAr, (c) 50kVAr

3. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

Grupiranjem rezultata mjerenja i njihovom komparacijom potrebno je prije analize uočiti poremećaje u mjerenju i pokušati objasniti potencijalne uzroke.

Već u prvom mjerenju u Tablici 1. (označeno crvenom bojom) uočava se poremećaj u izračunu i prikazu faktora snage $\cos(\varphi)$ i stvarnog faktora snage korigiranog za snagu distorzije PF u harmonijskoj analizi. Budući da su struje izuzetno male, može se potvrditi da DIOS 03(2C) kao mrežni monitor nije sposoban uzorkovati i dovoljno precizno obaviti izračun. Ipak, pozicija DIOS 03(2C) mrežnog monitora u ovim je mjerenjima spojena neizravno na srednjenaponskoj strani transformacije, a planirani spoj je poluizravni na niskonaponskoj strani.

U Tablici 4. uočava se dodatni poremećaj u mjerenju, (označeno crvenom bojom), zanimljiv jer se može primijetiti asimetrija sa značajnim udjelom harmonijskih članova, također, može se protumačiti odstupanje rezultata zbog ograničenja mrežnog monitora DIOS 03(2C). Na Slici 11. nalazi se prikaz fazorskih dijagrama u svim stupnjevima kompenzacije iz Tablice 4.



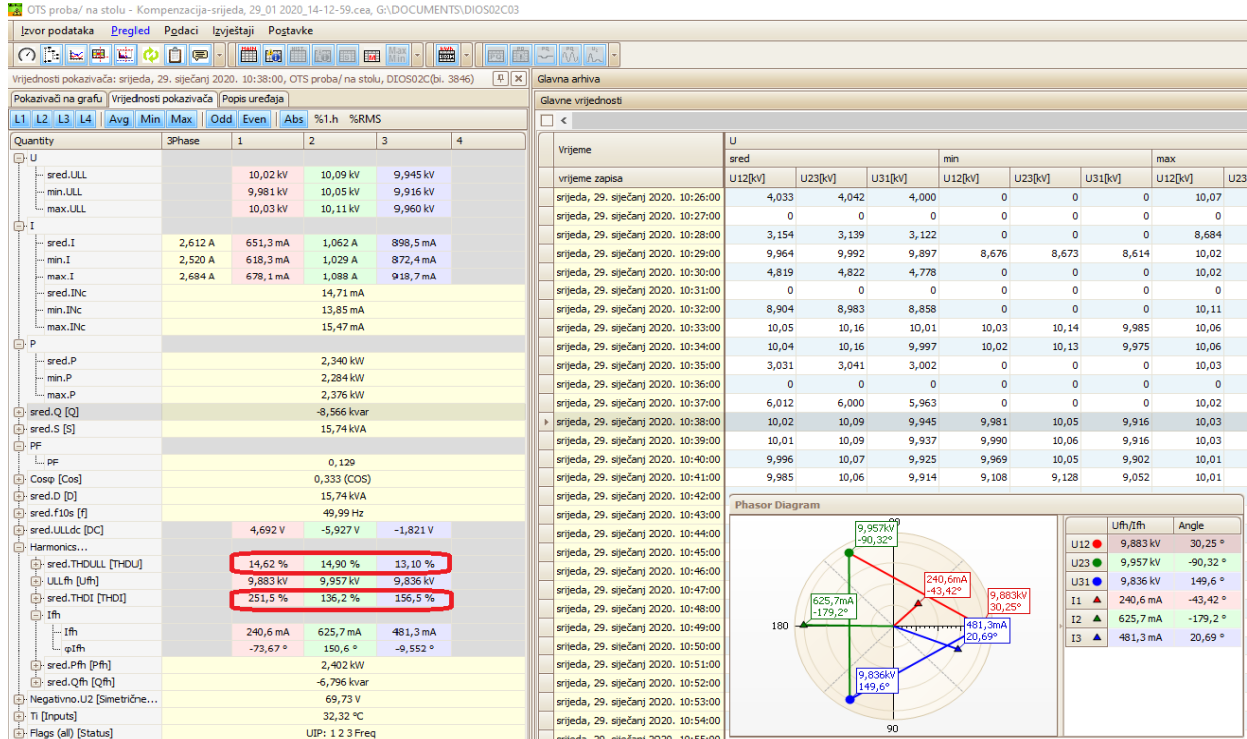
a)

b)

c)

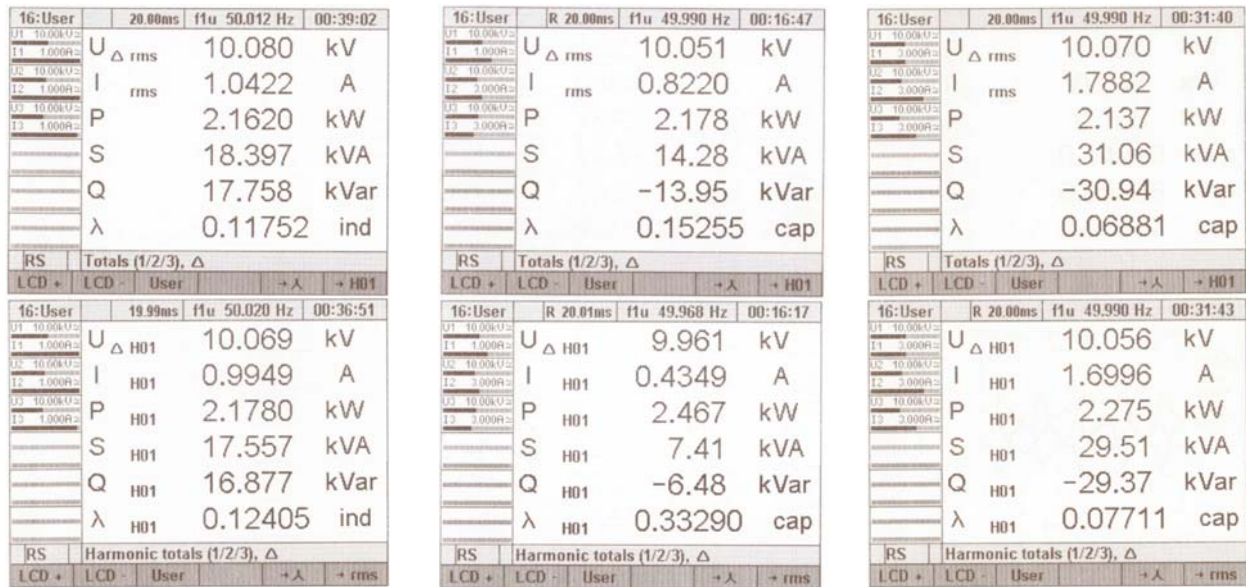
Slika 11. Fazorski dijagrami stare generacije distributivnog transformatora nazivne snage 630 Kva (a) 0 kVAr, (b) 25kVAr, (c) 50kVAr

Na Slici 12. prikazana su mjerenja iz povijesti događaja pohranjena u višenamjenskom mjernom terminalu DIOS 03(2C). Uočava se značajan udio distorzije za staru generaciju transformatora u položaju 5. nazivne snage 630kVA sa uključenim stupnjem kondenzatorske baterije 25kVAr sa vrlo velikim iznosima THDi(%) u strujama, također postoje i nezanemariva izobličenja napona. Pojavu je moguće objasniti subrezonantnim područjem 1. harmonijskog člana, gdje ostali harmonijski članovi nisu filtrirani.



Slika 12. Podaci iz povijesti događaja višenamjenskog mrežnog monitora DIOS 03(2C)

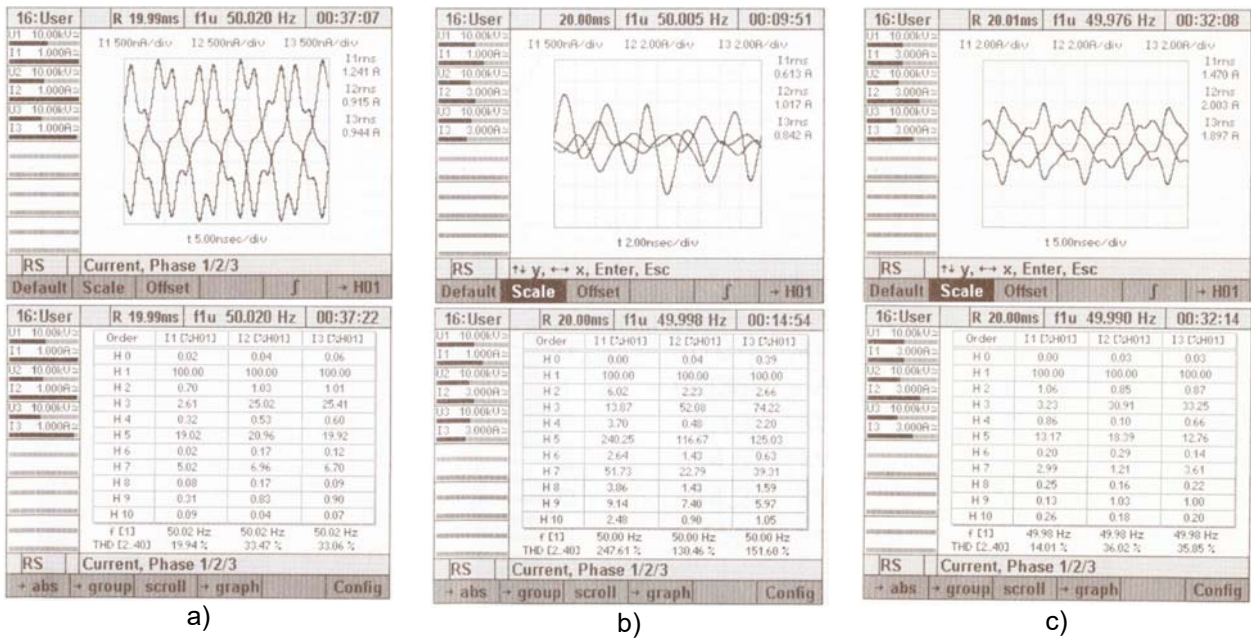
Na Slici 13. prikazana su mjerenja sa instrumentom Fluke/LEM Norma 5000 za transformator stare generacije u položaju 5. nazivne snage 630kVA u stupnjevima kompenzacije reaktivne snage (a) 0 kVAr, (b) 25kVAr i (c) 50kVAr, gdje su promatrane snage, ukupni faktor snage i $\cos(\varphi)$ 1. harmonijskog člana.



a) b) c)

Slika 13. Mjerenja električnih veličina, snaga, ukupni faktor snage i $\cos(\varphi)$ 1. harmonijskog člana transformatora stare generacije u položaju 5. u stupnjevima kompenzacije jalove snage a) 0kVAr, b) 25kVAr i c) 50kVAr.

Na Slici 14. prikazana su mjerenja sa instrumentom Fluke/LEM Norma 5000 za transformator stare generacije u položaju 5. nazivne snage 630kVA u stupnjevima kompenzacije reaktivne snage (a) 0 kVAR, (b) 25kVAR i (c) 50kVAR, gdje su promatrani oscilogrami oblika struja i harmonijski članovi.



Slika 14. Oscilogrami oblika struja i harmonijski članovi transformatora stare generacije u položaju 5. u stupnjevima kompenzacije jalove snage a) 0kVAR, b) 25kVAR i c) 50kVAR.

Detaljnu analizu harmonijskih članova, izobličenja u naponima i strujama, moguće je provesti FFT i DFT metodom sa instrumentom Fluke/LEM Norma 5000, ali neće se provesti u cijelosti već samo djelomično, jer nije predmet ovog rada.

Komparacijom mjerenja distributivnih transformatora stare i nove generacije može se zaključiti da su zahtjevi za ekološkim dizajnom i poboljšanja proizvođača primjenom visokopermeabilnih limova i povećanjem presjeka jezgre značajno smanjila gubitke i reducirala struje magnetiziranja. Također, na transformatorima nove generacije zbog malih jalovih snaga potpuno se izbjegava blisko rezonantno područje, a pojavnost viših harmonijskih članova je minorna, što nije slučaj na transformatorima stare generacije.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu analize rezultata mjerenja električnih veličina na transformatorima nove i stare generacije i smjernice iz Biltena [2] može se zaključiti da je ugradnja statičkih kondenzatorskih baterija osim kompenzacije jalove energije u praznom hodu značajno obuhvatila korekciju faktora snage i u teretnom području. Primjenom distributivnih transformatora proizvedenih prema zahtjevima „ekološkog dizajna“ statičke kondenzatorske su predimenzionirane.

Uvidom u mogućnosti ugrađene opreme, moguće je jednostavnim zahvatima u transformatorskoj stanici obaviti prilagodbu postojeće kompenzacije praznog hoda transformatora dodavanjem upravljačkih releja i sklopnika za kapacitivne terete. Tehničko rješenje je opravdano u kontekstu vođenja, kvalitete električne energije te gubitaka u distribuciji i to na način da se kondenzatorske baterije uporbave za automatsku kompenzaciju ovisno o prilikama u mreži i karakteristikama potrošača. Postojeće rješenje sa statičkim baterijama u praznom hodu sa transformatorima nove generacije je bespotrebno i višestruko predimenzionirano te prekompenzirano sa značajnim kapacitivnom komponentom, ali uz modifikacije postaje moderno rješenje primjenom novih tehnologija.

Zaključno, postoji opravdana potreba za kompenzacijom jalove energije uz potrebne tehničke modifikacije i primjenu stupnjevanja npr. sa višenamjenskim mrežnim monitorima tip DIOS 03(2C) i uporabom kondenzatorskih baterija nove generacije sa produženim vijekom uporabe. Vijek uporabe kondenzatorskih baterija npr. (Schneider VarPlus Can 480V Heavy Duty) procijenjen je na cca 130.000 radnih sati što bi se uz intermitenciju pogona moglo predvidjeti na vijek od prosječnih dvadeset (20) godina. Primjena filterskih kondenzatorskih baterija nije potvrđena sa mjerenjima koja su obuhvatila samo mjerenja u praznom hodu. Primjećena izobličenja struje u praznom hodu (*harmonijski članovi 3;5;7*) su zanemariva i značajno ispod granice primjene kondenzatorskih baterija sa prigušnicom.

5. LITERATURA

- [1] Hrvatska norma, HRN EN 50588-1:2017 Trofazni transformatori srednjeg napona, 50Hz, najvećeg napona do 36kV – 1.dio: Opći zahtjevi
- [2] Bilten 57/1997; HEP d.d. Tehnički uvjeti za TS 10(20)/0,4 kV