

Korekcija pogreške mjerenja naponskih transformatora velike snage

Papić, Dijana

Professional thesis / Završni specijalistički

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:220172>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Dijana Papić

**KOREKCIJA POGREŠKE MJERENJA
NAPONSKIH TRANSFORMATORA VELIKE
SNAGE**

SPECIJALISTIČKI RAD

Zagreb, 2022.

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING

Dijana Papić

**POWER VOLTAGE TRANSFORMERS
ACCURACY ERROR CORRECTION**

SPECIALIST THESIS

Zagreb, 2022.

Mentor: izv.prof.dr.sc. Žarko Janić

Specijalistički rad:

Specijalistički rad br.:

Povjerenstvo za ocjenu u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Bojan Trkulja – predsjednik
2. Nasl. izv. prof. dr. sc. Žarko Janić,
KONČAR – Energetski transformatori d. o. o. - mentor
3. Prof. dr. sc. Željko Štih – član

Povjerenstvo za obranu u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Bojan Trkulja – predsjednik
2. Nasl. izv. prof. dr. sc. Žarko Janić,
KONČAR – Energetski transformatori d. o. o. - mentor
3. Prof. dr. sc. Željko Štih – član

Datum obrane: 7. lipnja 2022.

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Naponski transformatori velike snage	3
2.1.	Izgled i komponente transformatora s otvorenom jezgrom	3
2.2.	Transformator na kojemu su vršena ispitivanja	5
2.3.	Definicija klase točnosti	6
2.4.	Analitički izračun klase točnosti bez kompenzacije.....	8
3.	Ispitivanje klase točnosti.....	11
3.1.	Ispitni krug	11
3.2.	Definicija ispitnih tereta.....	12
3.3.	Inicijalni rezultati proračuna	15
4.	Sklop za korekciju pogreške mjernog namota.....	18
4.1.	Teorijska osnova i glavne komponente.....	18
4.2.	Transformacijski element.....	19
4.3.	Korekcijski element.....	20
4.4.	Ispitivanje s korekcijskim elementom.....	24
5.	Preliminarna mjerenja klase točnosti s korekcijskim sklopom	26
6.	Numeričko modeliranje korekcijskog sklopa.....	35
6.1.	Usporedba mjerenja i proračuna.....	37
6.2.	Korekcijski sklop sa manjim induktivitetom i teret $\cos\varphi=0,8$	38
6.3.	Korekcijski sklop sa većim induktivitetom i teret $\cos\varphi=0,8$	41
6.4.	Korekcijski sklop sa manjim induktivitetom i teret $\cos\varphi=1,0$	44
6.5.	Korekcijski sklop sa većim induktivitetom i teret $\cos\varphi=1,0$	47
7.	Dodatne analize	51
7.1.	Utjecaj faktora snage, iznosa tereta i napona	51
7.2.	Rezime i preporuke za dokazivanje klase točnosti	53

8.	Zaključak	55
9.	Literatura	56

Popis tablica

Tablica 1. Rezultati analitičkog dimenzioniranja tereta energetskog namota	12
Tablica 2. Rezultati mjerenja stvarnih tereta energetskog namota	15
Tablica 3. Pogreška mjerenih i računatih R i L elemenata tereta	15
Tablica 4. Rezultati mjerenja klase točnosti 3a-3n namota	16
Tablica 5. Mjereni parametri međutransformatora CT	20
Tablica 6. Mjereni parametri zračne prigušnice L01	22
Tablica 7. Mjereni parametri zračne prigušnice L02	23
Tablica 8. Rezultati ispitivanja uz spoj sklopa: CT 250/1 A, L02 (L12-13).....	26
Tablica 9. Rezultati ispitivanja uz spoj sklopa: CT 100/1 A, L02 (L11-12).....	29
Tablica 10. Pad napona na elementima zračne prigušnice pri spoju L02 (L12-13).....	32
Tablica 11. Pad napona na elementima zračne prigušnice pri spoju L02 (L11-12).....	33
Tablica 12. Promatrane točke promjene tereta na mjernom i energetskom namotu uz $\cos\varphi = 0,8$	37
Tablica 13. Promatrane točke promjene tereta na mjernom i energetskom namotu uz $\cos\varphi = 1,0$	38
Tablica 14. Rezultati ispitivanja i numeričkog proračuna uz spoj sklopa s manjim induktivitetom	41
Tablica 15. Rezultati ispitivanja i numeričkog proračuna uz spoj sklopa s većim induktivitetom	44
Tablica 16. Rezultati ispitivanja i numeričkog proračuna uz spoj sklopa s manjim induktivitetom	47
Tablica 17. Rezultati ispitivanja i numeričkog proračuna uz spoj sklopa s većim induktivitetom	50
Tablica 18. Promjena naponske i kutne pogreške na mjernom namotu u ovisnosti o primarnom naponu .	52

Popis slika

Slika 1. Osnovne komponente naponskog transformatora velike snage	4
Slika 2. Elementi transformatora tipa VPT.....	5
Slika 3. Fotografija i natpisna pločica ispitnog objekta VPT-145	6
Slika 4. Usporedba klasa točnosti IEC i IEEE	7
Slika 5. Zahtjevi klase točnosti 3P prema IEC 61869-3, gdje je p oznaka za naponsku, a δ za kutnu pogrešku	8
Slika 6. Ekvivalentni dijagram transformatora s istodobno opterećenim namotima	9
Slika 7. Ispitni krug mjerenja naponske pogreške na 3a-3n namotu	12
Slika 8. Prerezana jezgra	13
Slika 9. Otporni elementi	14
Slika 10. Ponašanje klase točnosti namota 3a-3n.....	16
Slika 11. Električna shema prikaza spajanja korekcijskog sklopa na ispitni VPT-145.....	18
Slika 12. Međutransformator CT.....	19
Slika 13. Model za numerički proračun zračne prigušnice.....	21
Slika 14. Zračna prigušnica L01	22
Slika 15. Zračna prigušnica L02	23
Slika 16. Primjer spoja korekcijskog sklopa na ispitni objekt	24
Slika 17. Ispitni krug mjerenja naponske pogreške na 3a-3n namotu uz korištenje korekcijskog sklopa ...	25
Slika 18. Rezultati ispitivanja uz spoj sklopa: CT 250/1 A, L02 (L12-13) ovisno o iznosu i tipu tereta.....	27
Slika 19. Usporedba rezultat ispitivanja bez sklopa za korekciju i uz spoj sklopa: CT 250/1 A, L02 (L12-13) ovisno o iznosu i tipu tereta	28
Slika 20. Rezultati ispitivanja uz spoj sklopa: CT 100/1 A, L02 (L11-12) ovisno o iznosu i tipu tereta.....	30
Slika 21. Usporedba rezultata ispitivanja bez sklopa za korekciju i uz spoj sklopa: CT 100/1 A, L02 (L11-12) ovisno o iznosu i tipu tereta	31
Slika 22. Pad napona na R elementu prigušnice L02 u ovisnosti o teretu na mjernom namotu	33
Slika 23. Pad napona na X_L elementu prigušnice L02 u ovisnosti o teretu na mjernom namotu	34
Slika 24. Mentor Graphics MagNet 3D model VPT-a (lijevo), 3D model međutransformatora (desno)	35
Slika 25. Električna shema	36
Slika 26. Rezultati ispitivanja uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom prema tablici 12	39
Slika 27. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom za 0 kVA	39
Slika 28. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom za 25 kVA $\cos\varphi=0,8$	40
Slika 29. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom za 50 kVA $\cos\varphi=0,8$	40
Slika 30. Rezultati ispitivanja uz korekcijski sklop s većim induktivitetom prema tablici 12	42
Slika 31. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s većim induktivitetom za 0 kVA	42
Slika 32. Rezultati ispitivanja uz korekcijski sklop s većim induktivitetom za 25 kVA $\cos\varphi=0,8$	43
Slika 33. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s većim induktivitetom za 50 kVA $\cos\varphi=0,8$	43
Slika 34. Rezultati ispitivanja uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom prema tablici 13	45

Slika 35. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom za 0 kVA	45
Slika 36. Rezultati ispitivanja uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom za 25 kVA $\cos\varphi=1,0$	46
Slika 37. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom za 50 kVA $\cos\varphi=1,0$	46
Slika 38. Rezultati ispitivanja uz korekcijski sklop s većim induktivitetom prema tablici 13	48
Slika 39. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s većim induktivitetom prema za 0 kVA	48
Slika 40. Rezultati ispitivanja uz korekcijski sklop s većim induktivitetom prema za 25 kVA $\cos\varphi=1,0$	49
Slika 41. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s većim induktivitetom za 50 kVA $\cos\varphi=1,0$	49
Slika 42. Kutna i naponska pogreška u ovisnosti o promjeni faktora snage uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom.....	51
Slika 43. Kutna i naponska pogreška u ovisnosti o promjeni tereta od 10 kVA do 50 kVA u koracima od 10 kVA za karaktere $\cos\varphi=0,8$ i $\cos\varphi=1,0$	52
Slika 44. Ispitne točke za dokazivanje klase točnosti na mjernom namotu	53

1. Uvod

Naponski transformatori velike snage tipa VPT su jednofazne jedinice namijenjene spajanju na visokonaponsku mrežu i transformaciji manjih iznosa snage direktno na niski napon, kako bi se opskrbili udaljeni potrošači na mjestima gdje distribucijska mreža nije dostupna ili kako bi se osiguralo pomoćno napajanje elemenata postrojenja [1], [2]. Konceptualno gledajući, naponski transformator velike snage je hibrid između energetskog transformatora i induktivnog naponskog transformatora. Od energetskog transformatora nasljeđuje primarnu namjenu, a to je prijenos određenog iznosa snage s jedne naponske razine na drugu, a od induktivnog naponskog transformatora nasljeđuje osnovni dizajn i konstrukciju. Kako se dizajn induktivnih naponskih transformatora koji se proizvode u tvornici Končar – Mjerni transformatori bazira na konceptu otvorene jezgre, iste karakteristike nasljeđuju i naponski transformatori velike snage tipa VPT [1], [2]. Glavna karakteristika otvorene jezgre je da se magnetski tok zatvara kroz jezgru i okolni zrak izvan jezgre. Kada se govori o mjernim transformatorima, ovakva izvedba ima brojne prednosti, od linearizacije krivulje magnetiziranja, što ima povoljan utjecaj na pojavu ferorezonancije, do toga da omogućuje izvedbu kapacitivno gradirane izolacije i sekcioniranog primarnog namota. Dodatno, uvođenjem zračnog raspora u magnetski krug smanjuje se iznos remanentnog magnetskog toka, što povoljno utječe na iznos struje uklopa (eng. inrush current) [1]. Glavna mana ovakve izvedbe jest pojava relativno velike struje magnetiziranja, koja protječe primarnim namotom, te uzrokuje dodatne gubitke u primarnom namotu transformatora [3]. Sve ove karakteristike nasljeđuju i naponski transformatori velike snage.

Naponski transformatori velike snage prvenstveno imaju namjenu prijenosa snage uz transformaciju napona, međutim zbog sličnog dizajna kao mjerni naponski transformatori nameće se pitanje mogu li imati dodatni mjerni namot. Upravo je cilj ovog rada ustanoviti može li se uz korištenje dodatnog sklopa za korekciju postići da naponski transformator velike snage zadovolji zahtjeve za klasom točnosti 3P prema IEC 61869-3, na dodatnom mjernom namotu. U radu će biti dan pregled svrhe i izvedbe sklopa za korekciju naponske i kutne pogreške te njegova primjena na prototipnom transformatoru velike snage. Kroz rad će biti

prikazano na koji način se došlo do mogućnosti da se utječe na ponašanje naponske i kutne pogreške mjernih namota elementima korekcijskog sklopa.

Iako je inače praksa tijekom istraživanja prvo provesti numeričke kalkulacije koje se zatim verificiraju stvarnim ispitivanjem, u ovom radu je procedura obrnuta. Budući da je u trenutku nastanka ideje o korištenju korekcijskog sklopa jedan VPT bio dostupan u tvornici, odlučeno je da će se isti nadograditi s dva mjerna namota i izraditi korekcijski sklop. Osim dostupnosti transformatora za nadogradnju, ulogu u poretku istraživanja odigrao je i nedostatak mogućnosti i znanja za provedbu numeričke kalkulacije u danom trenutku. Stoga je na kraju rada dana numerička verifikacija rezultata uz korištenje programskog alata Mentor Graphics MagNet verzije 7.7.

Cilj rada je također predložiti kako klasu točnosti treba odrediti, izmjeriti i definirati budući da ovaj aspekt kod naponskih transformatora velike snage trenutno nije adekvatno definiran nijednim dostupnim standardom. Štoviše, glavna motivacija je smanjiti opseg dijaloga s krajnjim korisnikom i ukloniti moguće improvizacije, neusklađenosti i slična pitanja u vezi s performansama točnosti jedinica koje se proizvode, čime se postavlja smjernica za buduće namjenske standarde naponskih transformatora velike snage.

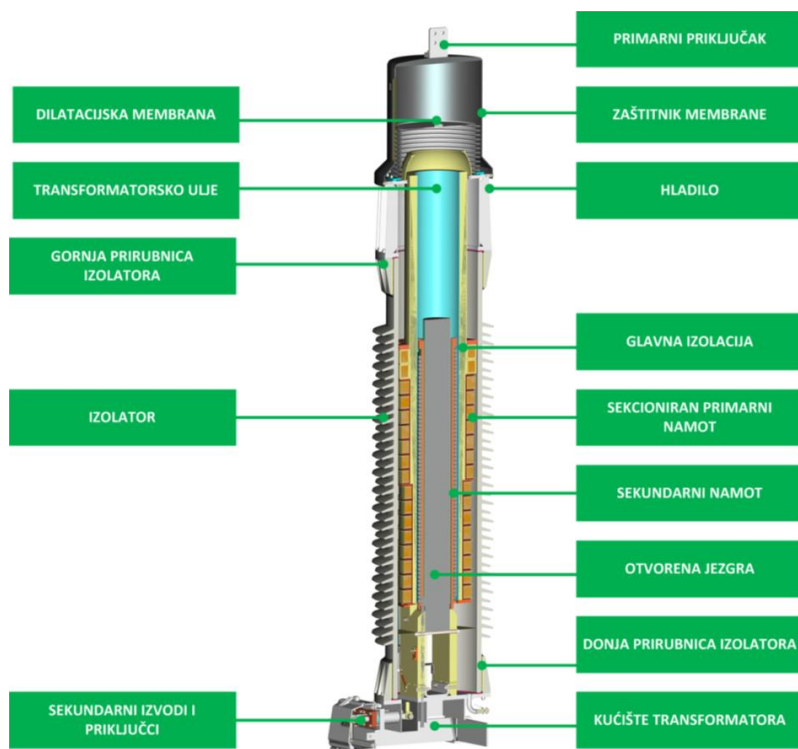
2. Naponski transformatori velike snage

Naponski transformator velike snage (10 do 333 kVA) je jednofazna induktivna jedinica koja služi za direktnu transformaciju i prijenos određene količine energije s visokog (72,5 do 550 kV) na niski napon (< 1 kV) [1]. Od energetske, odnosno distributivnih transformatora nasljeđuje primarnu namjenu, a to je prijenos snage uz transformaciju napona. S druge strane, zbog visokog prijenosnog omjera, zahtjeva za izolaciju i funkcije u postrojenju, tehnička rješenja ovih transformatora su naslijeđena i temelje se na induktivnim naponskim mjernim transformatorima. To znači da se navedeni transformatori i projektiraju prema relevantnom standardu za mjerne transformatore bilo da se radi o zahtjevima za izolaciju, otpornost na kratki spoj ili trajni rad na povišenom naponu [4],[5]. Također, takav pristup eliminira potrebu za kompleksnijim sustavima nadzora (eng. monitoring) i zaštite, te podrazumijeva dugotrajan rad bez održavanja. Dodatno, ovaj tip transformatora može imati dvostruku funkciju, odnosno može sadržavati više namota od kojih se neki koriste za prijenos energije, a drugi prvenstveno za potrebe zaštite, ali i potrebe mjerenja visokog napona [1].

Koncept naponskog transformatora velike snage s otvorenom jezgrom koristi se isključivo u tvornici Končar - Mjerni transformatori. Ovakvi transformatori proizvode se isključivo u papirno-uljnoj varijanti. Kod ovakve izvedbe, aktivni dio transformatora nalazi se unutar samog izolatora, čime je cijeli transformator, suštinski gledano, sam svoj provodnik [1].

2.1. Izgled i komponente transformatora s otvorenom jezgrom

Presjek naponskog transformatora s otvorenom jezgrom, s navedenim glavnim komponentama može se vidjeti na slici 1. Četiri glavne komponente koje čine aktivni dio su primarni (visokonaponski) namot, glavni izolacijski cilindar, sekundarni (niskonaponski) namot i sama jezgra što je prikazano na slici 2. Osim njih tu su još i pomoćne komponente, kao što su stezni sustav, distantne letvice za osiguravanje rashladnih kanala, izvodi i međuspojevi.



Slika 1. Osnovne komponente naponskog transformatora velike snage

Primarni je namot naponskih transformatora velike snage, kao i konvencionalnih induktivnih naponskih transformatora, sekcioniran odnosno sastoji se od većeg broja serijski povezanih svitaka. S obzirom na visok prijenosni omjer, primarni namot sadrži relativno velik broj zavoja (nekoliko desetaka tisuća, ovisno o naponskom nivou) relativno tanke žice (obično okrugla žica promjera 0,6 - 3 mm). Ukupan broj zavoja raspoređen je na sve svitke, unutar kojih se zavoji slažu u međusobno izolirane slojeve, sa svake strane zatvorene aksijalnim ukrutama koje sprječavaju pomicanje vodiča pri kratkom spoju. Spojna točka između dva susjedna svitka povezana je s izvodom iz glavnog izolacijskog cilindra.

Glavni je izolacijski sustav ovakvih transformatora papirni, uljem impregnirani izolacijski cilindar. Glavna je izolacija kapacitivno stupnjevana, što znači da se velik broj poluvodljivih kondenzatorskih obloga umeće između slojeva papira radi preciznog definiranja raspodjele i iznosa električnog polja kod brzih prenapona.

S obzirom na prijenosni omjer ovakvih transformatora, koji rezultira relativno malenom primarnom strujom (reda veličine ampera, ovisno o nazivnoj snazi) i relativno velikom sekundarnom strujom (nekoliko stotina ili tisuća ampera), sekundarni se namot najčešće izvodi ili kao više paralela profilnog bakrenog vodiča ili kao jedna ili više paralela bakrenog kabela koji efikasno eliminira gubitke

zbog vrtložnih struja u sekundarnim namotima. Sekundarni namot namata se izravno na jezgru, a samo se kod transformatora većih snaga između jezgre i namota ostavlja rashladni kanal koji služi i kao mjesto za postavljanje povratnih vodiča namota.

Otvorena jezgra u suštini je stup u centru transformatora. Sama je jezgra slaganog tipa, napravljena od hladno-valjanog orijentiranog magnetskog lima. Njena je osnovna karakteristika da se glavni magnetski tok dijelom zatvara kroz magnetski materijal same jezgre, a dijelom kroz okolni nemagnetski materijal.



(a) aktivni dio



(b) sekundarni namot



(c) namatanje glavne izolacije

Slika 2. Elementi transformatora tipa VPT

2.2. Transformator na kojemu su vršena ispitivanja

Sva ispitivanja u ovom radu provedena su na transformatoru VPT-145 nazivne snage 50 kVA, slika 3 (a). Njegova natpisna pločica s glavnim podacima o transformatoru dani su na slici 3 (b). Transformator se sastoji od jednog prespojivog energetskog namota snage 50 kVA. Energetski namot je serijsko-paralelno prespojiv 120-240 V, slika 3 (c). Sva ispitivanja za potrebe ovog rada su rađena kada je energetski namot u spoju 240 V (1a-2n). Glavni fokus ovog rada predstavljaju dva identična mjerna namota standardnih karakteristika za naponski mjerni transformator. Sekundarni napon oba mjerna napona je $120/\sqrt{3}$ V uz nazivno opterećenje 100 VA. Cilj rada je postići da transformator zadovolji kriterije naponske i kutne pogreške za zaštitnu klasu točnosti 3P prema IEC 61869-3 [4] uz simultano terećenje energetskih i mjernih namota. Simultano terećenje je

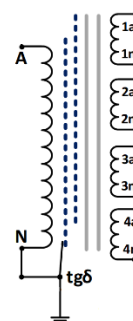
definirano tako da je mjerni namot nazivno opterećen 100 VA, a energetski istovremeno sa 50 kVA. Kriterij za 3P klasu će biti dani u nastavku rada. Budući da su oba mjerna namota identična sva mjerenja su rađena na 3a-3n namotu.



(a) VPT-145 u ispitnoj stanici

KONČAR POWER VOLTAGE TRANSFORMER			
Type	VPT-145	CAN/CSA-C61869-3.14	Serial No.
Year		A-N	82000
		Impedance voltage	7.5 %
145/275/650	kV	1a/2a-1n/2n	120 V
		1a-2n	240 V
Vf	1.5/30s	50 kVA	50 kVA
f	60	Hz	
Temp.	-50/+40	°C	
Total	1450	kg	
Oil	280	kg	
		3a-3n	120/√3
		4a-4n	120/√3
		100 VA	cl. 0,5/3P
		100 VA	0-50000 VA
		100 VA	cl. 0,5/3P
		100 VA	0-50000 VA
Made in Croatia M175411			

(b) Natpisna pločica



(c) Električna shema

Slika 3. Fotografija i natpisna pločica ispitnog objekta VPT-145

2.3. Definicija klase točnosti

Definicija određene klase točnosti određuje se pomoću naponske pogreške p i fazne pogreške δ .

Prema standardu IEC 61869-3, naponska pogreška definirana je jednadžbom (2.1).

$$p = \frac{k_r \times U_s - U_p}{U_p} \times 100 \text{ [%]} \quad (2.1)$$

U jednadžbi (2.1) k_r je nazivni omjer transformacije, U_p stvarni primarni napon, a U_s stvarni sekundarni napon uz narinuti U_p [4].

Fazna pogreška δ definira se kao kutna razlika između vektora primarnog i sekundarnog napona. Smjer vektora odabire se usporedbom izmjerene vrijednosti faznog kuta s idealnim transformatorom koji ima fazni kut nula. Fazni kut smatra

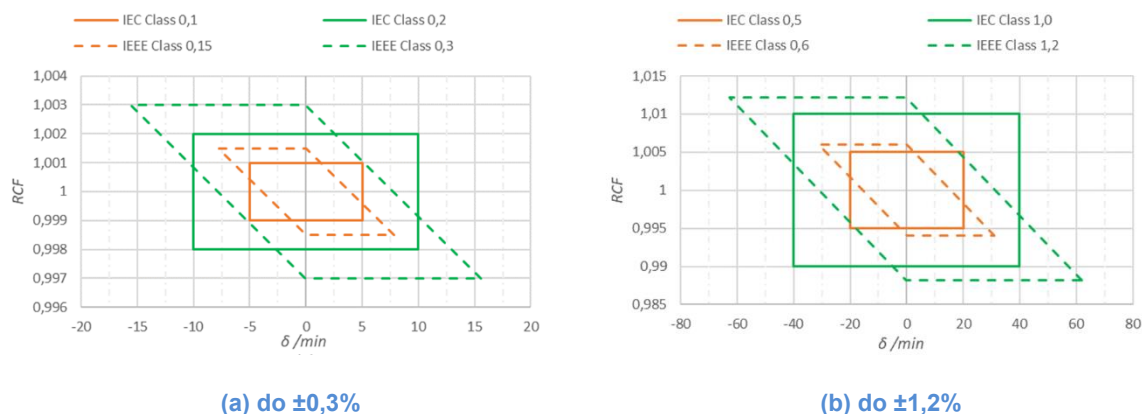
se pozitivnim ako je vektor sekundarnog napona ispred vektora primarnog napona [6].

IEEE C57.13-2016 [5] standard definira iste parametre na malo drugačiji način. Osnova za definiciju klase točnosti je da je faktor korekcije transformacije (TCF) unutar granica definirane standardom za pojedinu klasu točnosti, kada faktor snage tereta ima vrijednost od 0,6 do 1,0. Kao i kod IEC 61869-3 standarda, δ je kutna pogreška i izražava se u minutama, a p naponska pogreška te se izražava u u %. Za faktor snage 0,6 vrijede jednadžbe (2.2) i (2.3) [5].

$$TCF = RCF + \frac{\delta}{2600} \quad (2.2)$$

$$RCF = 1 - \frac{p}{100} \quad (2.3)$$

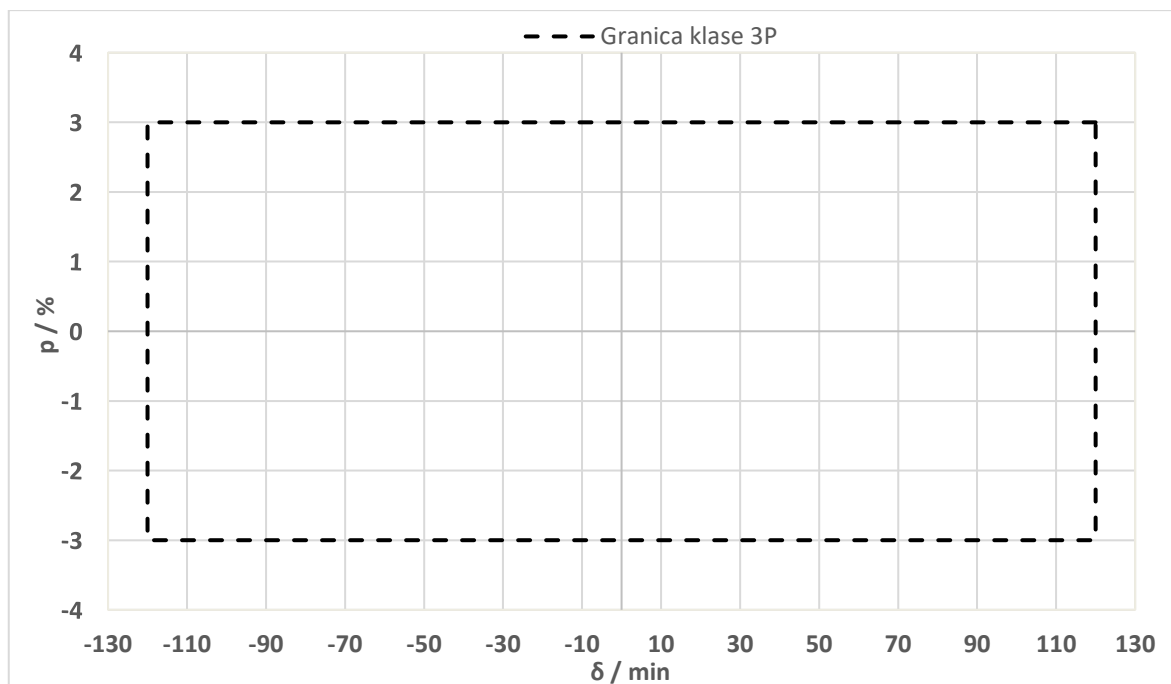
Na temelju definiranih vrijednosti, oba standarda definiraju standardne razrede klase točnosti. Usporedba standardnih zahtjeva klase točnosti data je na slici 4. Navedene klase točnosti moraju biti zadovoljene pri nazivnom naponu i naznačenom opterećenju, obično u rasponu od 0 do 400 VA. Kao što se može vidjeti sa slike, obje norme imaju odgovarajuće klase točnosti sa sličnim razinama zahtjeva.



Slika 4. Usporedba klase točnosti IEC i IEEE

Budući da za naponske transformatore velike snage ne postoje propisani zahtjevi za klasom točnosti, odlučeno je promatrati ponašanje pogreške s obzirom na zahtjeve zaštitne klase 3P. IEEE C57.13-2016 [5] ne definira zaštitnu klasu na naponskim transformatorima te će se stoga u radu koristiti definicija klase točnosti 3P prema IEC 61869-3 [4]. Zahtjevi naponske i kutne pogreške dani su na slici 5. Promjena naponske pogreške p mora biti unutar raspona $\pm 3\%$, a kutne δ ± 120 min.

Standard IEC 61869-3 također zahtijeva da klasa točnosti bude ostvarena kada su svi namoti opterećeni nazivnim teretom. Stoga je potrebno na mjernom namotu ispuniti zahtjeve klase 3P uz puno opterećenje oba mjerna (100 VA + 100 VA) i energetskog namota (50 kVA). U ovom radu taj zahtjev nije u potpunosti ispunjen budući da su sva mjerenja rađena prilikom terećenja energetskog namota i samo jednog od dva mjerna namota, točnije 3a-3n. Pristup je opravdan za potrebe ovog istraživanja budući da je utjecaj nekompenziranog namota 4a-4n zanemariv.



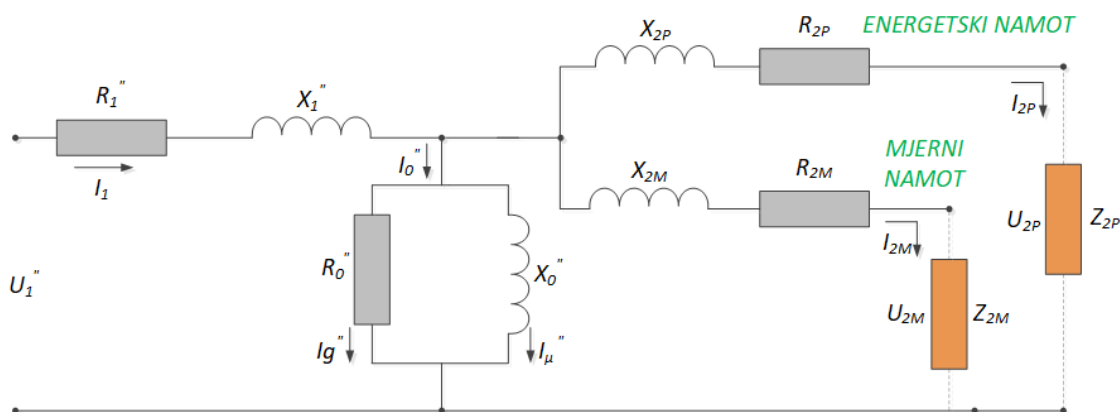
Slika 5. Zahtjevi klase točnosti 3P prema IEC 61869-3, gdje je p oznaka za naponsku, a δ za kutnu pogrešku

Nadalje, IEEE C57.13-2016 [5] određuje faktor snage za svako pojedinačno opterećenje (najčešće 0,85), dok IEC 61869-3 [4] određuje faktor snage 0,8 za terete veće od 10 VA i 1,0 za opterećenja ispod 10 VA. Prema standardu IEC/IEEE 63253-5713-8 [7], predloženo je da faktori snage energetskog namota iznosa 0,8 i 1,0 predstavljaju očekivani raspon faktora snage nazivnog tereta. S obzirom na navedeno, ponašanje kutne i naponske pogreške će se promatrati upravo za terete s faktorom snage 0,8 i 1,0.

2.4. Analitički izračun klase točnosti bez kompenzacije

Porijeklo faznih i naponskih pogrešaka proizlazi iz činjenice da transformacija bilo koje količine snage (čak i vrlo malih opterećenja povezanih s mjerenjem) nije

idealna. To je razlog zašto tipični ekvivalentni dijagram bilo kojeg transformatora sadrži elemente koji približavaju model realnom svijetu. Primjer takvog dijagrama, tipičnog za naponske transformatore velike snage s dvostrukim namotom, može se vidjeti na slici 6.



Slika 6. Ekvivalentni dijagram transformatora s istodobno opterećenim namotima

Struja opterećenja koja prolazi kroz impedancije i otpore prikazane na slici 6 uzrokuje pad napona na tim elementima, što pridonosi ukupnim naponskim i faznim pogreškama (ε , odnosno δ). Nadalje, sa slike 6 je očito da ukupna točnost transformatora koji ima dva (ili više) namota koji dijele istu jezgru ovisi o opterećenju na svakom namotu. Učinak takvog istodobnog opterećenja prepoznat je i ugrađen u postojeće standarde [4], [5]. Međutim, pretpostavka je da je opterećenje svakog namota približno istog reda, što obično nije slučaj za naponske transformatore velike snage.

Opterećenje energetskog namota je u rasponu kVA, obično između 10 i 333 kVA, što znači da je između 20 i 1000 puta veće od opterećenja na mjernom namotu. Stoga je struja opterećenja I_{2P} glavni faktor koji doprinosi padovima napona na svim elementima vodoravne grane (tj. primarni i sekundarni otpori R_1'' i R_{2P} i primarne i sekundarne rasipne reaktancije X_1'' i X_{2P}). To također znači da je doprinos struje opterećenja mjernog namota I_{2M} praktički zanemariv.

Ukupna naponska i fazna pogreška mjernog namota, unutar naponskog transformatora velike snage, zbroj su ukupnih padova napona na svim elementima na primarnoj i na sekundarnoj strani transformatora. Matematički su definirani jednadžbama (2.4) i (2.5).

$$\varepsilon = -[\cos \varphi \times (e_{r1} + e_{r2}) + \sin \varphi \times (e_{x1} + e_{x2})] \quad (2.4)$$

$$\delta = 3440 \times [\sin \varphi \times (e_{r1} + e_{r2}) - \cos \varphi \times (e_{x1} + e_{x2})] \quad (2.5)$$

U gornjim jednadžbama $\cos \varphi$ je faktor snage razmatranog namota, e_{r1} i e_{r2} su primarni i sekundarni padovi napona na otpornim elementima, a e_{x1} i e_{x2} primarni i sekundarni padovi napona na reaktivnim elementima ekvivalentnog dijagrama prikazanog na slici 6. Svi su ovi parametri definirani u jednadžbama (2.6) - (2.9).

$$e_{r1} = \left(\frac{S_M}{U_{2M}^2} + \frac{S_P}{U_{2P}^2} \right) \times R_1'' \times 100 [\%] \quad (2.6)$$

$$e_{r2} = \left(\frac{S_M}{U_{2M}^2} \right) \times R_{2M} \times 100 [\%] \quad (2.7)$$

$$e_{x1} = \left(\frac{S_M}{U_{2M}^2} + \frac{S_P}{U_{2P}^2} \right) \times X_1'' \times 100 [\%] \quad (2.8)$$

$$e_{x2} = \left(\frac{S_M}{U_{2M}^2} \right) \times X_{2M} \times 100 [\%] \quad (2.9)$$

U gornjim jednadžbama S_M i S_P su nazivna opterećenja na mjernim, odnosno namotima snage, R_1'' i R_{2M} su redom otpori primarnog namota reduciranog na sekundar i mjernog namota, dok su X_1'' i X_{2M} redom rasipne reaktancije primarne strane reducirane na sekundar i sekundarne strane.

Vrijednosti otpora mogu se izračunati analitičkim formulacijama, a vrijednosti reaktancija mogu se dobiti analitičkim ili numeričkim pristupom [8].

Da bi se procijenila ukupna izvedba točnosti jedinice, ovi izračuni se moraju provesti za više scenarija. Prvi je kada su svi namoti neopterećeni, drugi kada je mjerni namot opterećen, s neopterećenim energetskim namotom, a treći je uz potpuno opterećenje oba namota. Na taj se način može dobiti ukupni raspon napona (s oznakom $\Delta\varepsilon$) i fazne pogreške (s oznakom $\Delta\delta$). Budući da se pad napona uzrokovan strujom opterećenja mjernog namota može izostaviti, što će se kasnije dokazati u radu, varijable $\Delta\varepsilon$ i $\Delta\delta$ definirane su jednadžbama (2.10) i (2.11).

$$\Delta\varepsilon = |\varepsilon_0 - \varepsilon_{PM}| \quad (2.10)$$

$$\Delta\delta = |\delta_0 - \delta_{PM}| \quad (2.11)$$

3. Ispitivanje klase točnosti

3.1. Ispitni krug

Uzimajući u obzir važnost karaktera tereta i propisane granice za 3P klasu točnosti, odlučeno je provjeriti ponašanje kutne i naponske pogreške na 3a-3n namotu ispitivanog transformatora VPT-145.

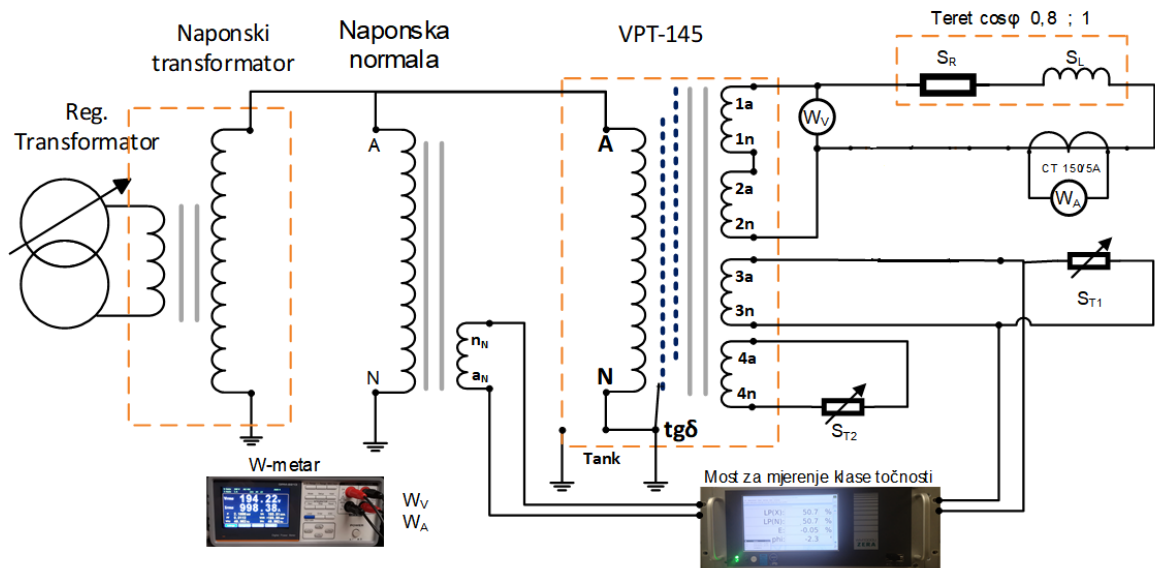
Ispitni krug za sva mjerenja izvršena u okviru ovog rada prikazan je na slici 7.

Za potrebe zahtijevane razine primarnog napona koristi se ispitni naponski transformator TÜR 1200/600, a kontrolira se kroz kapacitivno djelilo VMC 160/1200 i voltmetar VNM-1. Ovi elementi se smatraju apsolutno točnim sa stajališta mjerne nesigurnosti zbog korištenja mosne metode, te je utjecaj ovih komponenata na ukupnu mjernu nesigurnost ispitnog kruga prilikom ispitivanja klase točnosti zanemariv.

Referentni naponski transformator je KONČAR NVPU-420 (mjerne nesigurnosti $u = 0,1155 \%$, $\delta = 0,57735 \text{ min}$), spojen je na mjerni most ZERA WM1000U (mjerne nesigurnosti $u = 0,00289 \%$, $\delta = 0,1155 \text{ min}$) kojim se uspoređuju očitavanja napona na ispitnom objektu. Upotrijebljeni teret za 3a-3n namot je set tereta Nikola Tesla NO-3 02/06 (mjerne nesigurnosti $u = 0,0002 \%$, $\delta = 0,001 \text{ min}$), koji ima ugrađena IEC i IEEE standardna opterećenja, zajedno sa svojim odgovarajućim faktorima snage. Korištena je metoda diferencijalnog mjerenja [6].

Prirodno je da sve ove komponente treba umjeriti s pripadajućim pogreškama koje tvore lanac mjerne nesigurnosti. Treba napomenuti da svi navedeni instrumenti koji su korišteni u ovome radu se rabe za mjerenje klase točnosti u redovnoj proizvodnji, te je ukupna mjerna nesigurnost opisanog kruga $u = 0,01034 \%$, $\delta = 0,68 \text{ min}$.

Za teret na energetskom namotu 1a-2n nije unaprijed poznata mjerna nesigurnost te je u poglavlju 3.2. opisana njegova izvedba i rezultati mjerenja.



Slika 7. Ispitni krug mjerenja naponske pogreške na 3a-3n namotu

3.2. Definicija ispitnih tereta

U ovom radu su sva ispitivanja provedena za četiri tipa energetskog tereta:

25 kVA, $\cos \varphi = 0,8$

25 kVA, $\cos \varphi = 1,0$

50 kVA, $\cos \varphi = 0,8$

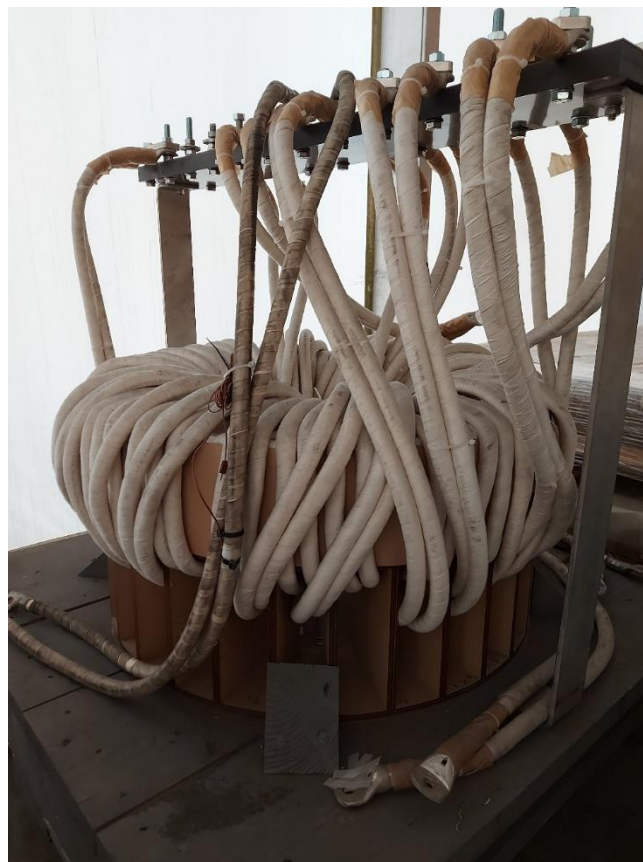
50 kVA, $\cos \varphi = 1,0$

Analitički vrijednosti potrebnog induktivnog i otpornog elementa za svaki spoj dan je u tablici 1.

Tablica 1. Rezultati analitičkog dimenzioniranja tereta energetskog namota

	25kVA, $\cos\varphi=1,0$	25kVA, $\cos\varphi=0,8$	50kVA, $\cos\varphi=0,8$	50kVA, $\cos\varphi=1,0$
S_n/VA	25000	25000	50000	50000
f/Hz	60	60	60	60
U/V	240	240	240	240
I_n/A	104,17	104,17	208,33	208,33
Z/Ω	2,30	2,30	1,15	1,15
$\cos\varphi$	1,00	0,80	0,80	1,00
$\sin\varphi$	0,00	0,60	0,60	0,00
X_L/Ω	0,00	1,38	0,69	0,00
L/mH	0,00	3,67	1,83	0,00
R/Ω	2,30	1,84	0,92	1,15

Kako bi se tijekom ispitivanja omogućilo fino podešavanje bilo kojeg od navedena četiri tereta za postizanje induktivnog elementa korištena je prerezana jezgra (slika 8), materijala M0H budući da se na taj način može podesiti mali iznos induktiviteta i jezgra niske indukcije. Za otporni element su korišteni otpornici (slika 9). Oba elementa imaju mogućnost ručnog podešavanja nazivne vrijednosti otpora i induktiviteta. Kod prerezane jezgre moguće je oduzimati i dodavati željeni broj zavoja, dok je potrebna vrijednost otpora dobivena serijskim i paralelnim prespajanjem 100 komada otpornika pojedinačnog otpora $11 \Omega \pm 10\%$.



Slika 8. Prerezana jezgra



Slika 9. Otporni elementi

Stvarni iznosi tereta energetskog namota dani su u tablici 2. Bitno je za ustvrditi kako postoje određena odstupanja stvarnih tereta od predviđenih nazivnih vrijednosti. Stoga je u tablici 3. dan pregled odstupanja R i L elemenata za pojedini spoj. Odstupanje je računato kao pogreška mjerene vrijednosti u odnosu na računatu vrijednost. Najveće odstupanje 17,17%, se može uočiti za teret 25 kVA, $\cos \varphi = 0,8$ uzrokovano lošim definiranjem broja zavoja na jezgri sa slike 8 i potrebnih spojeva otpornika, slika 9.

Tablica 2. Rezultati mjerenja stvarnih tereta energetskog namota

	25kVA, cosφ=1,0	25kVA, cosφ=0,8	50kVA, cosφ=0,8	50kVA, cosφ=1,0
f/Hz	60	60	60	60
U/V	233,46	255,04	242,42	243,07
In/A	104,17	104,17	208,33	208,33
P/W	24316,84	19902,95	40919,81	50634,81
cosφ	1,00	0,75	0,81	1,00
sinφ	0,00	0,66	0,59	0,00
Z/Ω	2,24	2,45	1,16	1,17
R/Ω	2,24	1,83	0,94	1,17
XL/Ω	0,03	1,62	0,68	0,02
L/mH	0,08	4,30	1,81	0,05
Sn/VA	25699,91	23525,46	49500,67	49367,56
Odstupanje Sn od nazivne vrijednosti	2,8%	-5,9%	-0,99%	-1,26%

Tablica 3. Pogreška mjerenih i računatih R i L elemenata tereta

kVA, cosφ	Mjereno / Računato	
	ΔR/%	ΔL/%
25 kVA, cosφ=0,8	-0,54	17,17
25 kVA, cosφ=1,0	-2,61	0,00
50 kVA, cosφ=0,8	2,17	-1,09
50 kVA, cosφ=1,0	1,74	0,00

U nastavku rada svi se grafovi i tablice pozivaju na očekivane vrijednosti, a ne stvarne vrijednosti. Primjerice, iako je stvarni teret 23525,46 VA, $\cos \varphi = 0,75$ prema tablici 2, u daljnjem tekstu će se zvati 25 kVA, $\cos \varphi = 0,8$.

3.3. Inicijalni rezultati proračuna

Iako je transformator dizajniran za 50 kVA, odlučeno je promatrati ponašanje klase točnosti i na 25 kVA, radi provjere linearnosti.

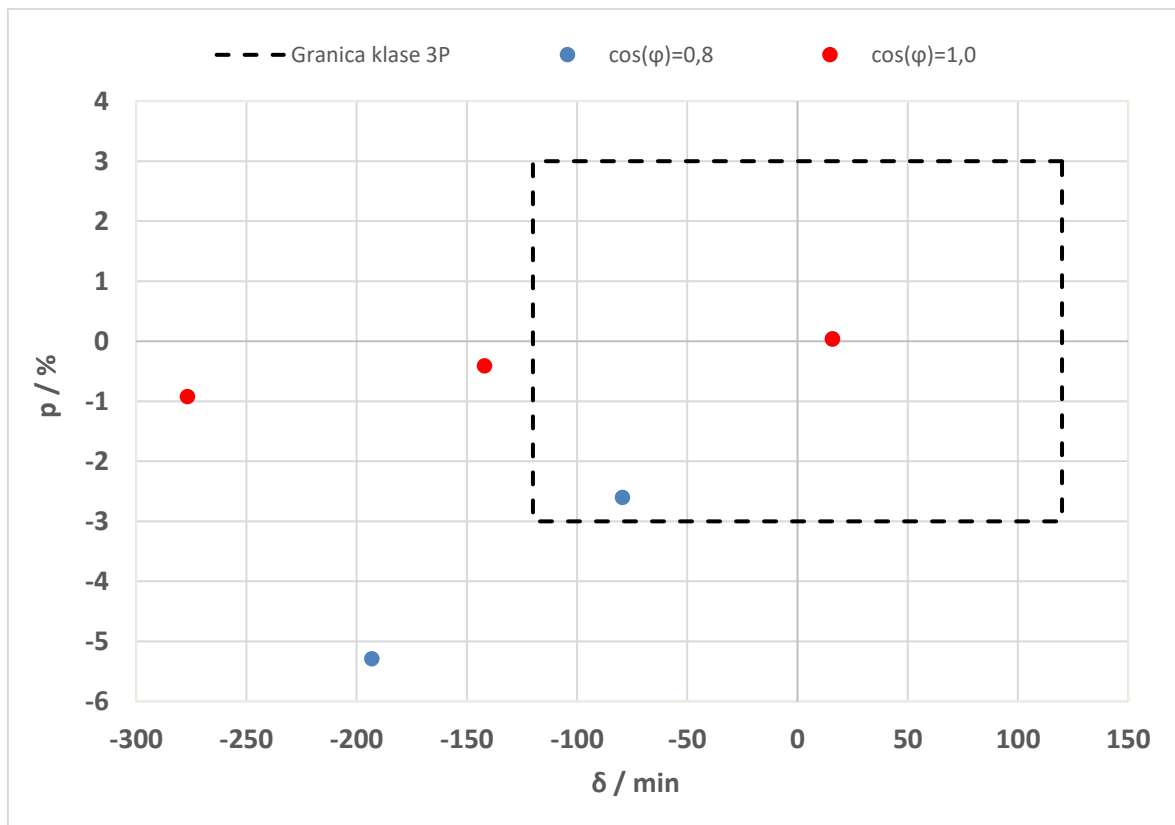
Na VPT -145 narinuto je 0,05% nazivnog napona 82000 V i energetski namot 1a-2n terećen je s 25 kVA i 50 kVA, faktora snage 0,8 i 1,0. Mjerni namot 3a-3n,

na kojem se mjeri kutna i naponska pogreška, opterećen je samo voltmetrom pa možemo reći da je opterećenje približno jednako nuli. Prvo su izmjerene kutna i naponska pogreška 3a-3n namota kada je transformator neterećen, odnosno kada na 1a-2n namotu nema tereta.

Zatim je provedeno mjerenje kutne i naponske pogreške na 3a-3n namotu kada je energetski namot 1a-2n terećen teretom od 25 kVA i 50 kVA za oba faktora snage. Dobiveni rezultati su prikazani u tablici 4, a grafički prikaz s obzirom na granice točnosti klase 3P na slici 10.

Tablica 4. Rezultati mjerenja klase točnosti 3a-3n namota

$\cos\varphi=0,8$			$\cos\varphi=1,0$		
S_E/VA	$p/\%$	δ/min	S_E/VA	$p/\%$	δ/min
0	0,04	15,9	0	0,04	15,9
25000	-2,60	-79,3	25000	-0,41	-141,9
50000	-5,29	-193	50000	-0,92	-276,7



Slika 10. Ponašanje klase točnosti namota 3a-3n

Iz prikazanih rezultata vidljivo je kako promjena tereta na energetskom namotu značajno utječe na ponašanje kutne i naponske pogreške. Naponska pogreška,

odnosno pad napona može se utjerati u željenu klasu točnosti poznatim korekcijskim metodama [6].

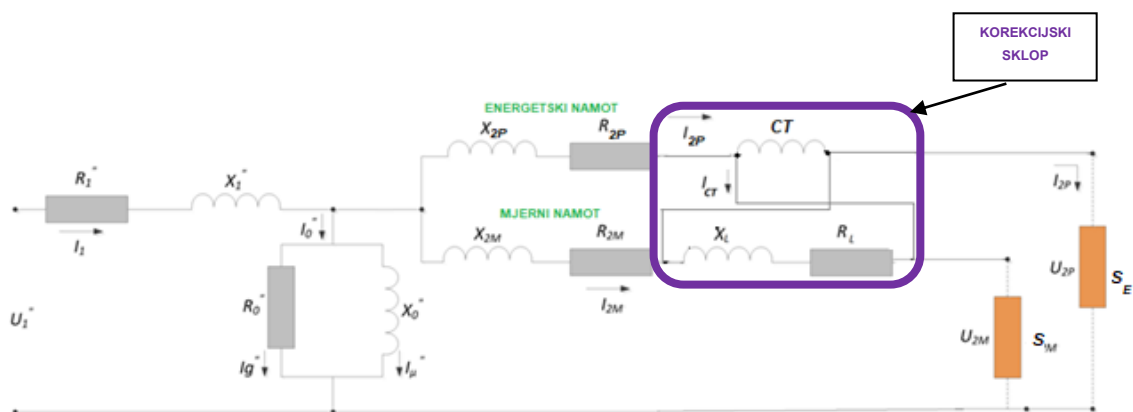
Uzimajući u obzir prikazane rezultate ponašanja naponske i kutne pogreške na ispitnom objektu može se zaključiti kako u oba slučaja klasa nije zadovoljena. Energetski teret karaktera $\cos \varphi = 0,8$ rezultira maksimalnom naponskom pogreškom i minimalnom kutnom pogreškom. Energetski teret karaktera $\cos \varphi = 1,0$ rezultira minimalnom naponskom pogreškom i maksimalnom kutnom pogreškom. Isto tako je zanimljivo za uočiti da kutna pogreška raste s negativnim predznakom. Upravo je glavni izazov ovog rada postići poželjno ponašanje kutne pogreške, odnosno da bude u granicama 3P klase točnosti. Stoga se u razmatranje uzelo uvođenje dodatnih korekcijskih elemenata za potrebe smanjenje kutne pogreške. Budući da kutna pogreška raste s negativnim predznakom odlučeno je probati promijeniti predznak uz induktivnu komponentu. U nastavku rada bit će predstavljen takozvani korekcijski sklop te njegova primjena na ispitnom transformatoru.

4. Sklop za korekciju pogreške mjernog namota

4.1. Teorijska osnova i glavne komponente

Prilikom opterećenja transformatora s teretom na energetskom namotu kutna pogreška mjernog namota ima sve veći iznos negativnog predznaka, slika 10. Stoga je potrebno nastalu kutnu pogrešku kompenzirati pomoću induktivne komponente suprotnog polariteta, kako bi se nadomjestili padovi napona na elementima R_1'' i X_1'' , prikazanima na slici 11.

U nastavku će biti opisana izvedba korekcijskog sklopa koji će utjecati na korekciju negativnog predznaka kutne pogreške mjernog namota. Slika 11 prikazuje električnu shemu spajanja korekcijskog sklopa na izvode ispitnog transformatora. Korekcijski sklop se sastoji od strujnog međutransformatora (CT) i zračne prigušnice (X_L , R_L). Međutransformator služi za transformaciju struje tereta energetskog namota u zadanom omjeru te time stvara pad napona na zračnoj prigušnici. Struja I_{2P} predstavlja primarnu struju međutransformatora CT. Na sekundarne izvode međutransformatora spojena je prigušnica koja se istovremeno spaja u seriju s mjernim namotom (izvod 3a). Upravo navedena prigušnica predstavlja induktivnu komponentu, te je cilj njom utjecati na karakter kutne pogreške.



Slika 11. Električna shema prikaza spajanja korekcijskog sklopa na ispitni VPT-145

Budući da prije ispitivanja nije bilo poznato kakvo se ponašanje kutne i naponske pogreške može očekivati te koji parametri korekcijskog sklopa daju zadovoljavajuće rješenje, izrađeno je nekoliko tipova sklopova. Svi elementi korekcijskog sklopa imaju mogućnost podešavanja nazivnih vrijednosti. Također,

nije postojao verificirani numerički model, kojim bi se moglo predvidjeti utjecaj korekcijskog sklopa na ponašanje pogreške na 3a-3n namotu. Stoga su u nastavku dane karakteristike korištenih međutransformatora i zračnih prigušnica te su kroz rad predstavljeni zaključci kako pojedini parametar utječe na klasu točnosti.

4.2. Transformacijski element

Budući da nije poznato koji će prijenosni omjer međutransformatora dati najbolje rezultate, bilo je potrebno dimenzionirati ga za što veći raspon prijenosa. Također je trebalo voditi računa da u svim prijenosnim omjerima strujna pogreška bude što manja, npr. u rasponu $\pm 1\%$. Stoga je međutransformator CT, slika 12, izrađen pomoću mumetalne jezgre ukupnog presjeka $10,6 \text{ cm}^2$. Oko jezgre je žicom $\Phi 1,2 \text{ mm}$ redom namotano 50, 25, 25, 50 i 100 zavoja što omogućuje prijenosni omjer 50 – 75 – 100 – 150 – 250 :1 A, definiran izvodima S1-S6.

Rezultati ispitivanja za pojedini odcjep na teretu od 1,2 VA do 5 VA te od 1% do 150% nazivne struje dani su u tablici 5. Iz rezultata mjerenja se može uočiti kako je strujna pogreška kod manjih prijenosa npr. 50:1 A veća od $\pm 1\%$, dok je kod prijenosa od 100:1 A ili više, manja od $\pm 1\%$. Iako se u ovom radu provodi eksperimentalno ispitivanje, može se zaključiti da je raspon pogreške na prijenosnom omjeru 50:1 A ipak prevelik i da o tome treba voditi računa prilikom dimenzioniranja međutransformatora.



Slika 12. Međutransformator CT

Tablica 5. Mjereni parametri međutransformatora CT

I/In	50:1 A				75:1 A			
	1,25 VA		5 VA		1,25 VA		5 VA	
	p/%	δ/min	p/%	δ/min	p/%	δ/min	p/%	δ/min
1,5	-0,45	11,00	-2,77	45,50	-0,22	6,20	-0,80	-2,90
1,2	-0,46	12,20	-1,94	5,90	-0,22	6,90	-0,82	-2,50
1	-0,46	13,50	-1,77	-6,80	-0,22	7,50	-0,83	-2,20
0,2	-0,47	26,00	-2,35	11,30	-0,21	13,60	-1,15	9,30
0,005	-0,40	36,20	-2,99	44,60	-0,18	18,00	-1,42	25,30
0,001	-0,32	44,30	-3,45	82,40	-0,14	21,40	-1,59	41,60
I/In	100:1 A				150:1 A			
	1,25 VA		5 VA		1,25 VA		5 VA	
	p/%	δ/min	p/%	δ/min	p/%	δ/min	p/%	δ/min
1,5	-0,13	4,10	-0,46	-1,40	-0,07	2,40	-0,23	-0,10
1,2	-0,13	4,60	-0,48	-1,00	-0,07	2,60	-0,24	0,20
1	-0,13	5,00	-0,49	-0,60	-0,07	2,80	-0,25	0,50
0,2	-0,12	8,60	-0,69	7,30	-0,06	4,50	-0,34	4,70
0,005	-0,10	11,10	-0,83	16,70	-0,05	5,70	-0,39	8,90
0,001	-0,08	12,90	-0,92	25,50	-0,04	6,50	-0,42	12,70
I/In	250:1 A							
	1,25 VA		5 VA					
	p/%	δ/min	p/%	δ/min				
1,5	-0,02	1,20	-0,09	0,30				
1,2	-0,02	1,30	-0,10	0,50				
1	-0,02	1,40	-0,10	0,70				
0,2	-0,02	2,10	-0,13	2,50				
0,005	-0,02	2,50	-0,15	4,00				
0,001	-0,01	2,70	-0,15	5,30				

4.3. Korekcijski element

Induktivni korekcijski element izveden je kao zračna prigušnica. Potrebni induktivitet zračne prigušnica analitički je proračunat pomoću izraza (4.1) [9]

$$L = \mu_0 \times \pi \times N^2 \times \frac{D_{sr}^2}{4 \times l} \times k \quad (4.1)$$

gdje je:

μ_0 – magnetska permeabilnost vakuuma

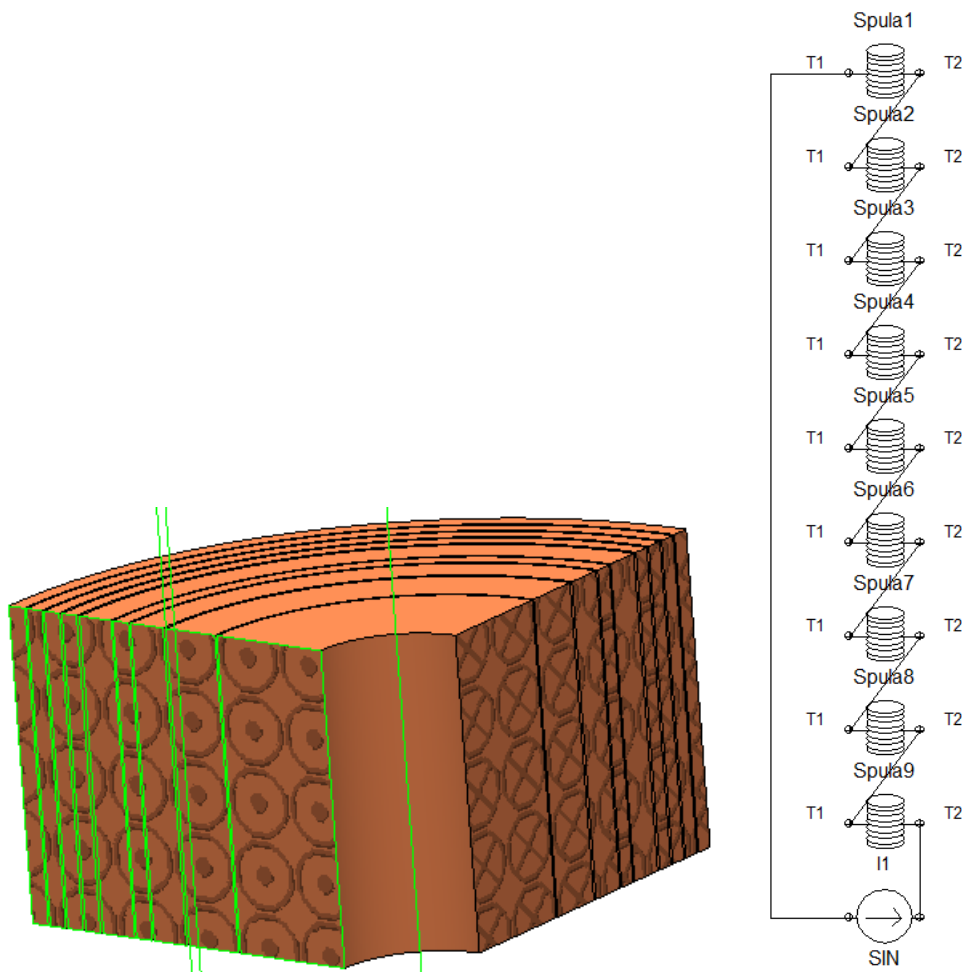
N – broj zavoja

D_{sr} – srednji promjer namota

l – visina namota

k – Nagaokin faktor

Numerički izračun rađen je u programskom alatu Mentor Graphics MagNet verzije 7.7. Zbog simetrije namota modelirana je $\frac{1}{4}$ modela. Model je definiran analitički određenim brojem zavoja žice po sloju i unutarnjim i vanjskim promjerom za pojedini spoj izvoda. Slika 13 prikazuje električnu shemu i $\frac{1}{4}$ 3D modela. Kroz strujni izvor je narinuta struja iznosa 1A.

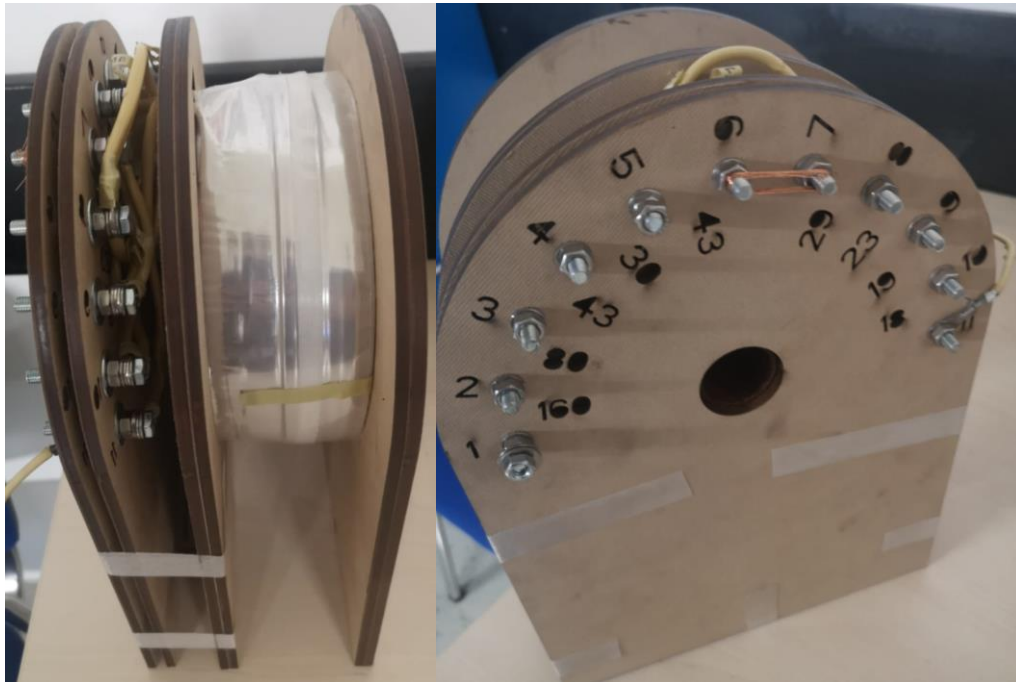


Slika 13. Model za numerički proračun zračne prigušnice

Za potrebe rada izrađene su dvije prigušnice, označene sa L01 i L02.

Zračna prigušnica L01 izvedena je pomoću drvenog štapa na koji je namotan definirani broj zavoja izoliranom žicom Φ 2,1 mm. Žica većeg promjera je izabrana u svrhu smanjivanja otpora spoja, kako bi do izražaja došao induktivni dio

elementa. Prigušnica sadrži 11 izvoda te se ovisno o odabranom spoju ostvaruju određeni parametri induktiviteta i odgovarajući otpor žice. Slika prigušnice dana je na slici 14.



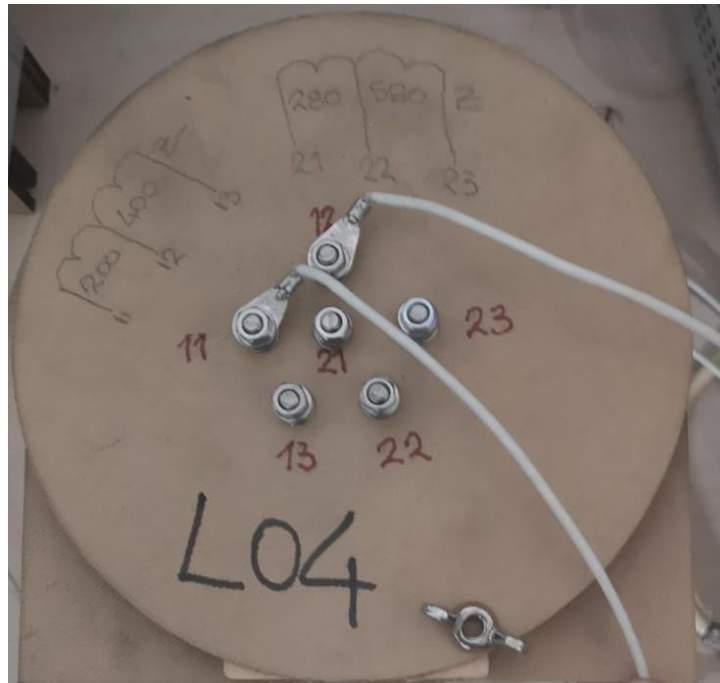
Slika 14. Zračna prigušnica L01

Tablica 6 prikazuje usporedbu induktiviteta mjerenih na modelu L01, računatih prema izrazu (3.1) i dobivenih numeričkim postupkom. Iz prikazanih rezultata vidljivo je kako za ovakvu izvedenu zračne prigušnice numerički izračun najbolje prati stvarne mjerene vrijednosti.

Tablica 6. Mjereni parametri zračne prigušnice L01

Spoj izvoda	Mjereni			Analitički izračun		Numerički izračun
	N	R_{25}/Ω	L/mH	L/mH	L/mH	
1-2	160	0,10	0,68	1,00	0,71	
1-3	240	0,18	1,85	3,05	2,04	
1-4	283	0,23	2,86	5,04	3,13	
1-5	313	0,27	3,72	6,68	4,09	
1-6	356	0,33	5,28	10,01	5,82	
1-8	385	0,37	6,56	12,54	7,17	
1-9	408	0,41	7,71	15,04	8,43	
1-10	427	0,45	8,76	17,54	9,56	
1-11	445	0,48	9,80	20,23	10,72	

Za potrebe mjerenja također je korištena prigušnica L02 za koju ne postoji dokumentacija, pa za nju nije proveden proračun. Umjesto toga za referencu se koriste rezultati mjerenja U-I metodom. Fotografija prigušnice dana je na slici 15, a rezultati mjerenja R i L parametara u pojedinom spoju u tablici 7.

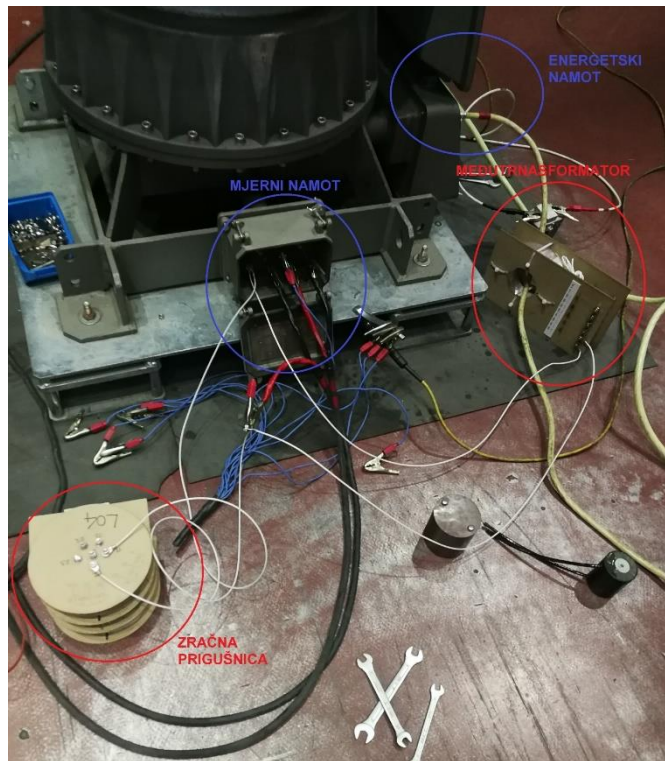


Slika 15. Zračna prigušnica L02

Tablica 7. Mjereni parametri zračne prigušnice L02

Spoj izvoda	N	I/A	U/V	Z/ Ω	R ₂₅ / Ω	XL/ Ω	cos φ	L/mH
11-12	200	1	1,59	1,59	0,78	1,39	0,49	4,42
21-22	280	1	2,36	2,36	1,09	2,09	0,46	6,65
12-13	400	1	6,62	6,62	2,24	6,23	0,34	19,83
11-12-21-22	480	1	3,90	3,90	1,88	3,42	0,48	10,89
22-23	560	1	11,18	11,18	3,12	10,74	0,28	34,19
11-13	600	1	10,73	10,73	30,22	10,30	0,28	32,79
12-13-21-22	680	1	9,42	9,42	3,33	8,81	0,35	28,04
21-23	840	1	18,50	18,50	4,21	18,01	0,23	57,33
11-13-21-22	880	1	13,70	13,70	4,11	13,07	0,30	41,60
12-13-22-23	960	1	20,00	20,00	5,35	19,27	0,27	61,34
11-12-21-23	1040	1	20,60	20,60	4,99	19,99	0,24	63,63
12-13-21-23	1240	1	28,20	28,20	6,44	27,45	0,23	87,38
11-13-21-23	1440	1	33,50	33,50	7,22	32,71	0,22	104,12

Na slici 16 je dan prikaz kako su elementi korekcijskog sklopa, međutransformator i zračna prigušnica, spojeni na energetske i mjerni namot ispitnog objekta VPT-145. Kao što je opisano u ovom poglavlju, korekcijski sklop je višefunkcionalan odnosno prespojiv te je na slici 16 prikazan samo jedan od mnogih spojeva u kojima je transformator ispitan kako bi se došlo do zadovoljavajućih rezultata ispitivanja i zaključaka.



Slika 16. Primjer spoja korekcijskog sklopa na ispitni objekt

4.4. Ispitivanje s korekcijskim elementom

Ispitni krug, čiji su osnovni elementi opisani u poglavlju 3.1. nadopunjen je parametrima korekcijskog sklopa prikazani na slici 11.

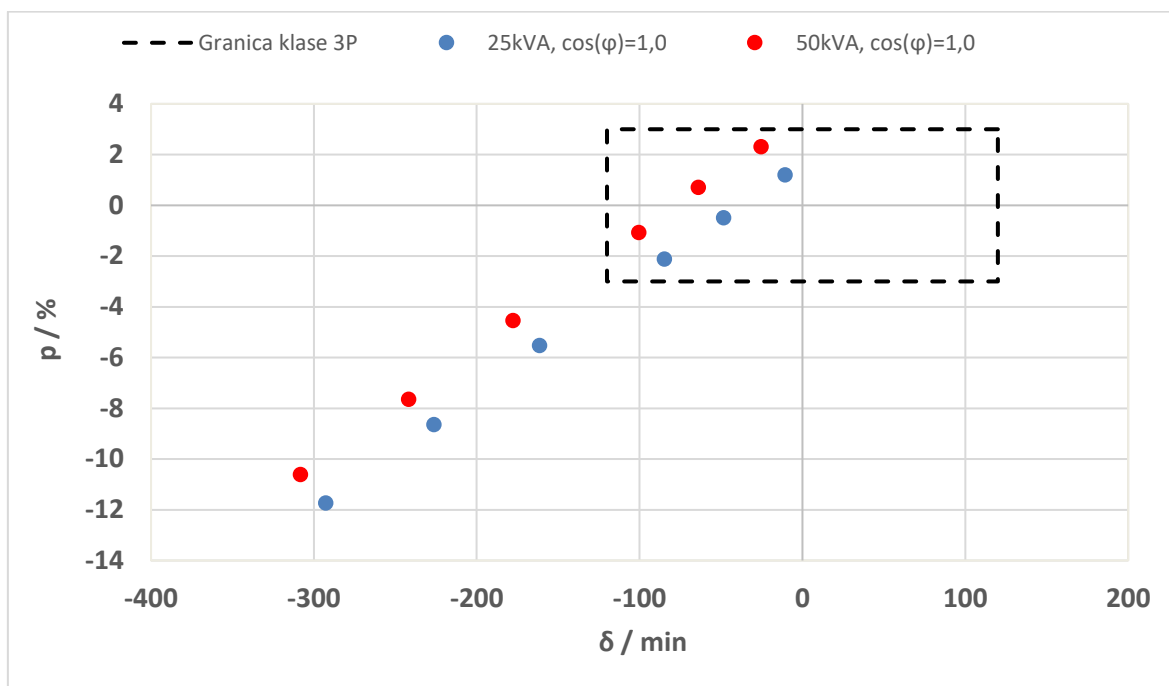
5. Preliminarna mjerenja klase točnosti s korekcijskim sklopom

U nastavku će biti prikazani rezultati ispitivanja za dva spoja sklopa za korekciju. Rezultati ovih ispitivanja bili su prekretnica u razumijevanju utjecaja parametara korekcijskog sklopa na kutnu i naponsku pogrešku. Sva mjerenja su rađena kada je energetska namot opterećen s 25 kVA ili 50 kVA uz $\cos \varphi = 0,8$ ili $\cos \varphi = 1,0$ te su rađene varijacije tereta na 3a-3n namotu od 0 VA do 100 VA. Sva mjerenja su rađena za 50% nazivnog napona (82000 V), što je opravdano budući da je u području do 120% nazivnog napona krivulja struje magnetiziranja linearnog karaktera (indukcija manja od 2 T).

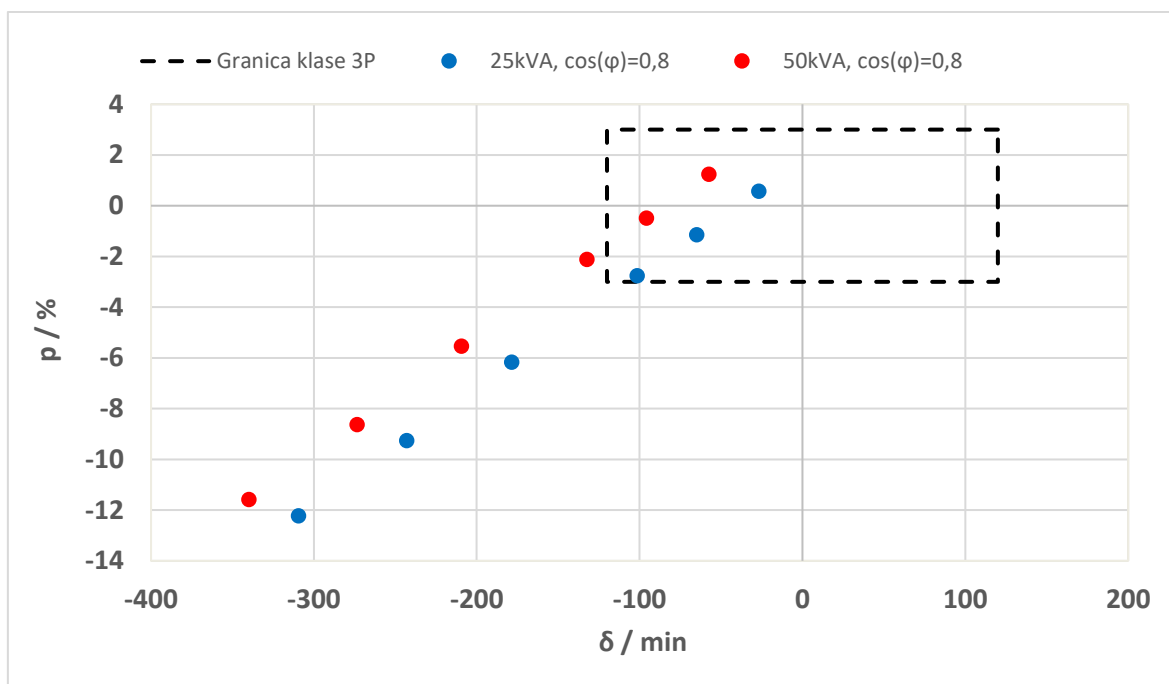
U tablici 8 su prikazani rezultati ispitivanja kutne i naponske pogreške na 3a-3n namotu pri različitim vrijednostima tereta uz korištenje međutransformatora prijenosa 250/1 A i zračne prigušnice L02 u spoju L12-13, prema tablici 7. Grafički prikaz rezultata dan je na slici 18, uz naznačene granice 3P klase točnosti.

Tablica 8. Rezultati ispitivanja uz spoj sklopa: CT 250/1 A, L02 (L12-13)

S_E/VA	S_M/VA	p/%	δ/min	S_E/VA	p/%	δ/min
25000, $\cos\varphi=1,0$	0, $\cos\varphi=0,8$	1,21	-10,60	25000, $\cos\varphi=0,8$	0,57	-26,70
	12,5, $\cos\varphi=0,8$	-0,49	-48,30		-1,14	-64,90
	25, $\cos\varphi=0,8$	-2,11	-84,70		-2,76	-101,40
	50, $\cos\varphi=0,8$	-5,52	-161,40		-6,17	-178,50
	75, $\cos\varphi=0,8$	-8,64	-226,30		-9,26	-243,00
	100, $\cos\varphi=0,8$	-11,73	-292,60		-12,22	-309,30
50000, $\cos\varphi=1,0$	0, $\cos\varphi=0,8$	2,32	-25,40	50000, $\cos\varphi=0,8$	1,24	-57,50
	12,5, $\cos\varphi=0,8$	0,72	-63,80		-0,49	-95,80
	25, $\cos\varphi=0,8$	-1,07	-100,50		-2,12	-132,30
	50, $\cos\varphi=0,8$	-4,53	-177,70		-5,54	-209,30
	75, $\cos\varphi=0,8$	-7,64	-241,80		-8,63	-273,50
	100, $\cos\varphi=0,8$	-10,6	-308,10		-11,58	-339,90



a) energetski teret karaktera $\cos\varphi=1,0$

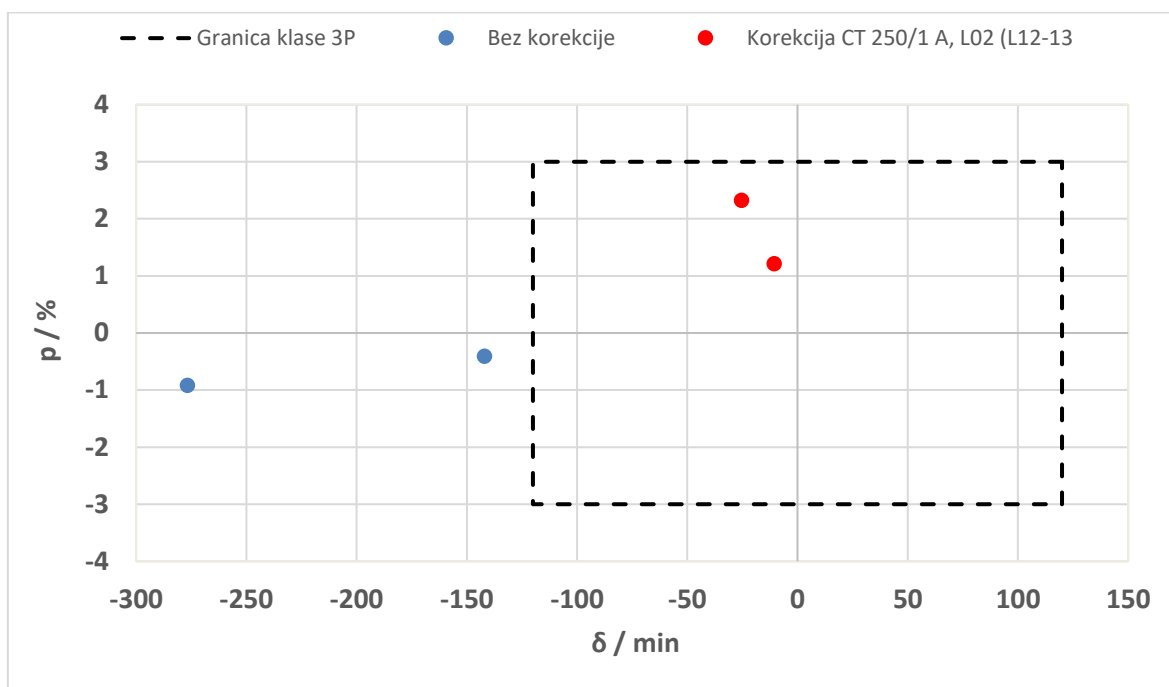


b) energetski teret karaktera $\cos\varphi=0,8$

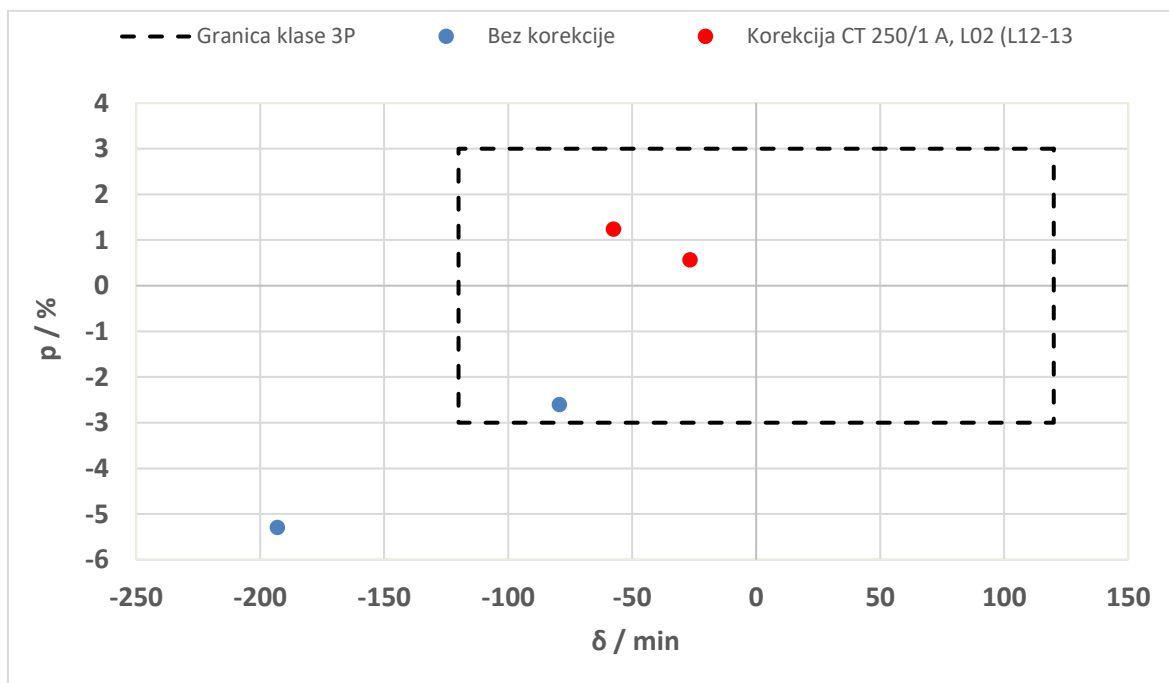
Slika 18. Rezultati ispitivanja uz spoj sklopa: CT 250/1 A, L02 (L12-13) ovisno o iznosu i tipu tereta

Iz slike 18 je vidljivo kako uz korekcijski sklop CT 250/1 A, L02 (L12-13) na transformatoru nije zadovoljen kriterij 3P klase. Međutim ukoliko se rezultati usporede sa rezultatima mjerenja bez korištenja korekcijskog sklopa (slika 10), može se uočiti da korištenje korekcijskog sklopa uvelike doprinosi ponašanju kutne i naponske pogreške. Usporedba rezultata ispitivanja bez sklopa za

korekciju i uz spoj sklopa: CT 250/1 A, L02 (L12-13) za točke gdje je mjerni namot neterećen a energetski namot opterećen sa 25000 VA i 50000 VA $\cos \varphi = 0,8$ i $\cos \varphi = 1,0$, dana je na slici 19.



a) energetski teret 25 kVA i 50 kVA karaktera $\cos \varphi = 1,0$



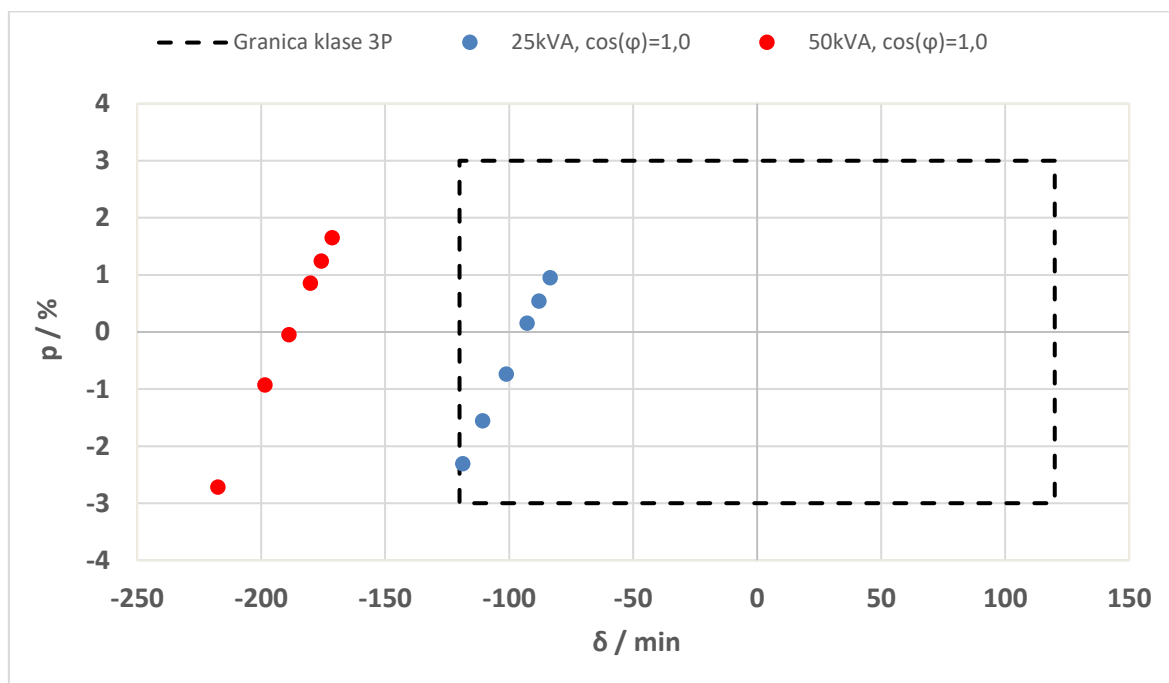
b) energetski teret 25 kVA i 50 kVA karaktera $\cos \varphi = 0,8$

Slika 19. Usporedba rezultat ispitivanja bez sklopa za korekciju i uz spoj sklopa: CT 250/1 A, L02 (L12-13) ovisno o iznosu i tipu tereta

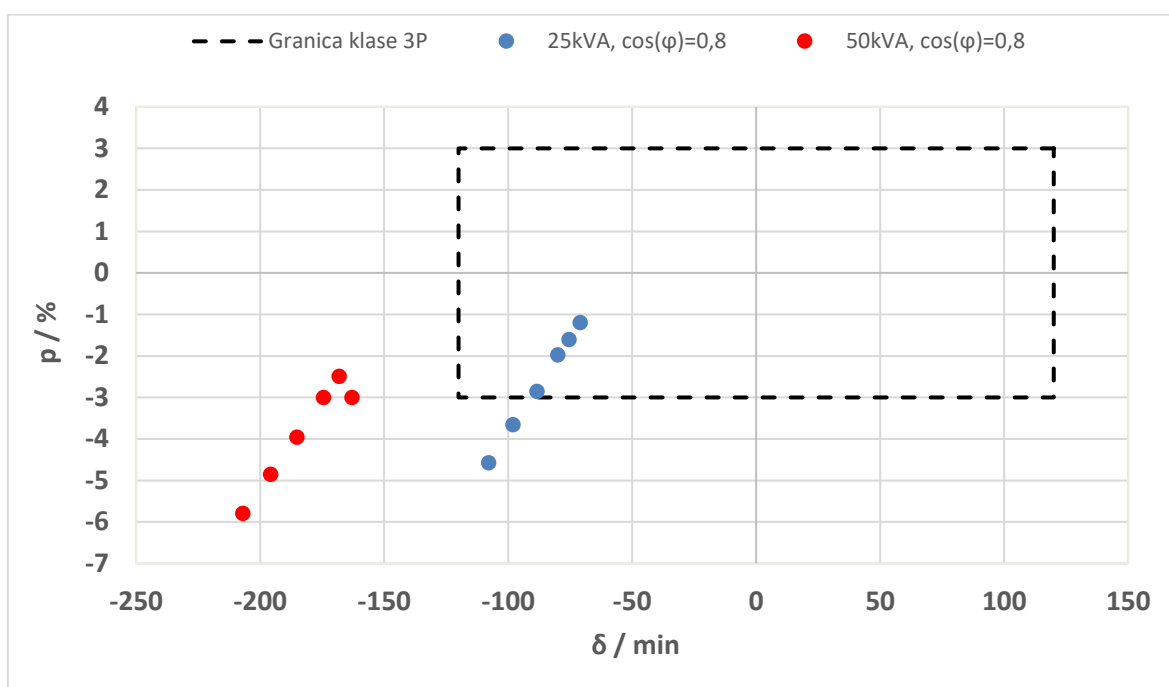
Stoga je za potrebe istraživanja ponovljeno ispitivanje uz drugačije parametre korekcijskog sklopa. Tablica 9 prikazuje rezultate ispitivanja uz korištenje međutransformatora prijenosa 100/1 A i zračne prigušnice L02 u spoju L11-12. Grafički prikaz rezultata dan je na slici 20.

Tablica 9. Rezultati ispitivanja uz spoj sklopa: CT 100/1 A, L02 (L11-12)

S_E/VA	S_M/VA	$p/\%$	δ/min	S_E/VA	$p/\%$	δ/min
25000, $\cos\varphi=1,0$	0, $\cos\varphi=0,8$	0,95	-83,40	25000, $\cos\varphi=0,8$	-1,19	-70,90
	12,5, $\cos\varphi=0,8$	0,54	-87,90		-1,6	-75,40
	25, $\cos\varphi=0,8$	0,15	-92,70		-1,97	-80,00
	50, $\cos\varphi=0,8$	-0,74	-101,10		-2,85	-88,40
	75, $\cos\varphi=0,8$	-1,56	-110,70		-3,65	-98,00
	100, $\cos\varphi=0,8$	-2,31	-118,70		-4,57	-107,80
50000, $\cos\varphi=1,0$	0, $\cos\varphi=0,8$	1,65	-171,30	50000, $\cos\varphi=0,8$	-3	-163,00
	12,5, $\cos\varphi=0,8$	1,24	-175,70		-2,49	-168,10
	25, $\cos\varphi=0,8$	0,85	-180,10		-3	-174,40
	50, $\cos\varphi=0,8$	-0,05	-188,70		-3,95	-185,10
	75, $\cos\varphi=0,8$	-0,93	-198,40		-4,85	-195,70
	100, $\cos\varphi=0,8$	-2,72	-217,40		-5,79	-206,90

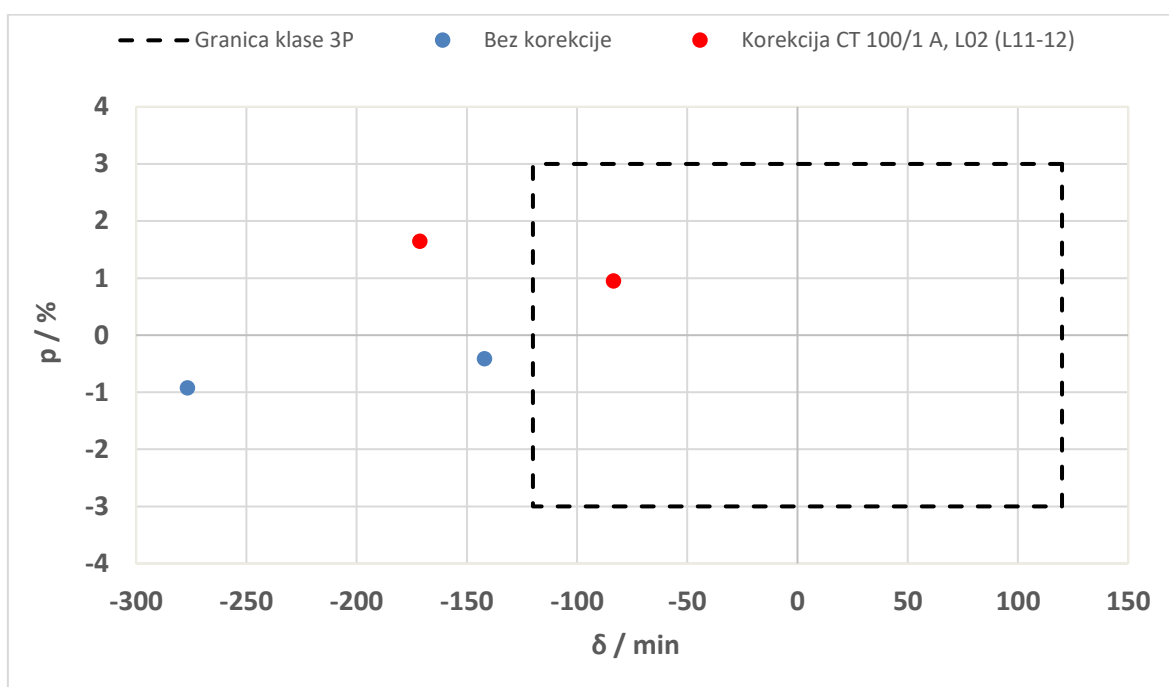


a) energetska teret karaktera $\cos\varphi=1,0$

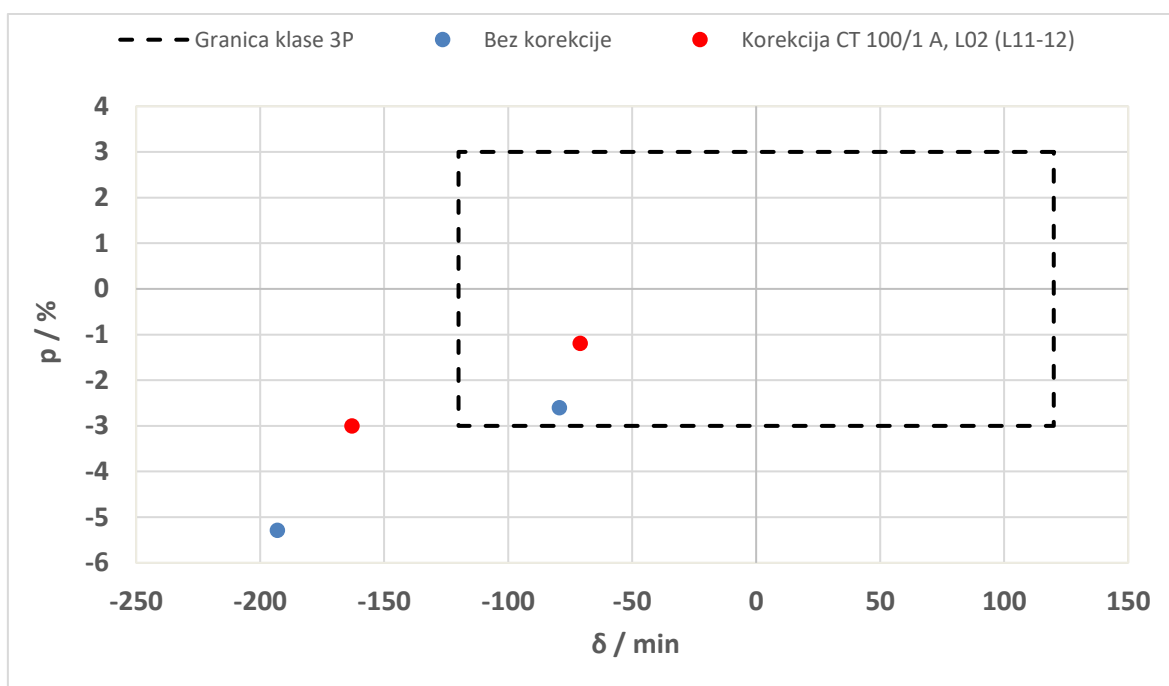
b) energetski teret karaktera $\cos\varphi=0,8$

Slika 20. Rezultati ispitivanja uz spoj sklopa: CT 100/1 A, L02 (L11-12) ovisno o iznosu i tipu tereta

Usporedba rezultat ispitivanja bez sklopa za korekciju i uz spoj sklopa: CT 100/1 A, L02 (L11-12) za točke gdje je mjerni namot neopterećen a energetski namot opterećen sa 25000 VA i 50000 VA $\cos \varphi = 0,8$ i $\cos \varphi = 1,0$, dana je na slici 21. Može se zaključiti da su uz korištenje sklopa za korekciju rezultati bolji nego bez korekcijskog sklopa.



a) energetski teret teret 25 kVA i 50 kVA karaktera $\cos\varphi=1,0$



b) energetski teret teret 25 kVA i 50 kVA karaktera $\cos\varphi=0,8$

Slika 21. Usporedba rezultata ispitivanja bez sklopa za korekciju i uz spoj sklopa: CT 100/1 A, L02 (L11-12) ovisno o iznosu i tipu tereta

Usporedbom rezultata ispitivanja za oba sklopa vidljivo je da su rezultati za sklop u spoju CT 100/1 A, L02 (L11-12), povoljniji glede zahtjeva za 3P klasom točnosti. Za slučaj kada je $\cos\varphi = 1,0$ zadovoljena je čak naponska pogreška za

puni raspon opterećenja, 100 VA + 50 kVA, dok je kriterij za kutnu i naponsku pogrešku zadovoljen za polovicu raspona opterećenja, 100 VA + 25 kVA.

Kako bi se ova razlika mogla objasniti, potrebno je elemente zračne prigušnice promatraju kao X_L i R_L elementi. X_L element je ključan kako bi se utjecalo na ponašanje kutne pogreške, međutim iz rezultata danih u tablicama 8 i 9 vidljivo je da postoji i nepoželjan utjecaj na naponsku pogrešku. Taj utjecaj se pripisuje R_L elementu zračne prigušnice, na kojem se stvara pad napona uzrokovan strujom I_{2M} i I_{CT} , prema slici 11.

Analitičkim izračunom, tablica 10 i 11, dana je usporedba iznosa pada napona na X_L i R_L elementima uzrokovan strujama I_{2M} i I_{CT} .

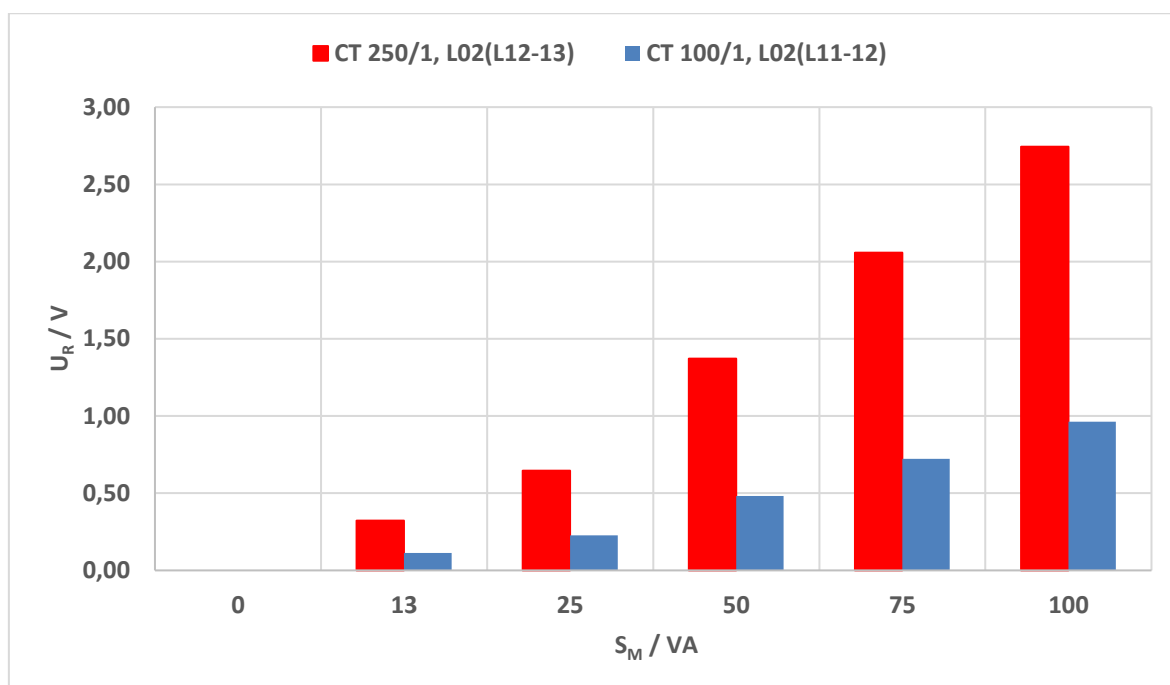
Tablica 10. Pad napona na elementima zračne prigušnice pri spoju L02 (L12-13)

Teret		CT 250/1, L02(L12-13)										
		Pad napona uslijed struje tereta:						I_{CT}/A		I_{2M}/A		
S_{2P}/VA	S_{2M}/VA	CT	R_L /Ω	L /mH	X_L /Ω	I_{2P}/A	I_{2M}/A	I_{CT}/A	U_R/V	U_{XL}/V	U_R/V	U_{XL}/V
25000 $\cos\varphi=1,0$	0	250	2,24	19,83	7,48	107,08	0,00	0,43	0,96	3,20	0,00	0,00
	12,5						0,14				0,32	1,08
	25						0,29				0,65	2,16
	50						0,61				1,37	4,59
	75						0,92				2,06	6,88
	100						1,23				2,74	9,17
50000 $\cos\varphi=1,0$	0	250	2,24	19,83	7,48	205,70	0,00	0,82	1,84	6,15	0,00	0,00
	12,5						0,14				0,32	1,08
	25						0,29				0,65	2,16
	50						0,61				1,37	4,59
	75						0,92				2,06	6,88
	100						1,23				2,74	9,17

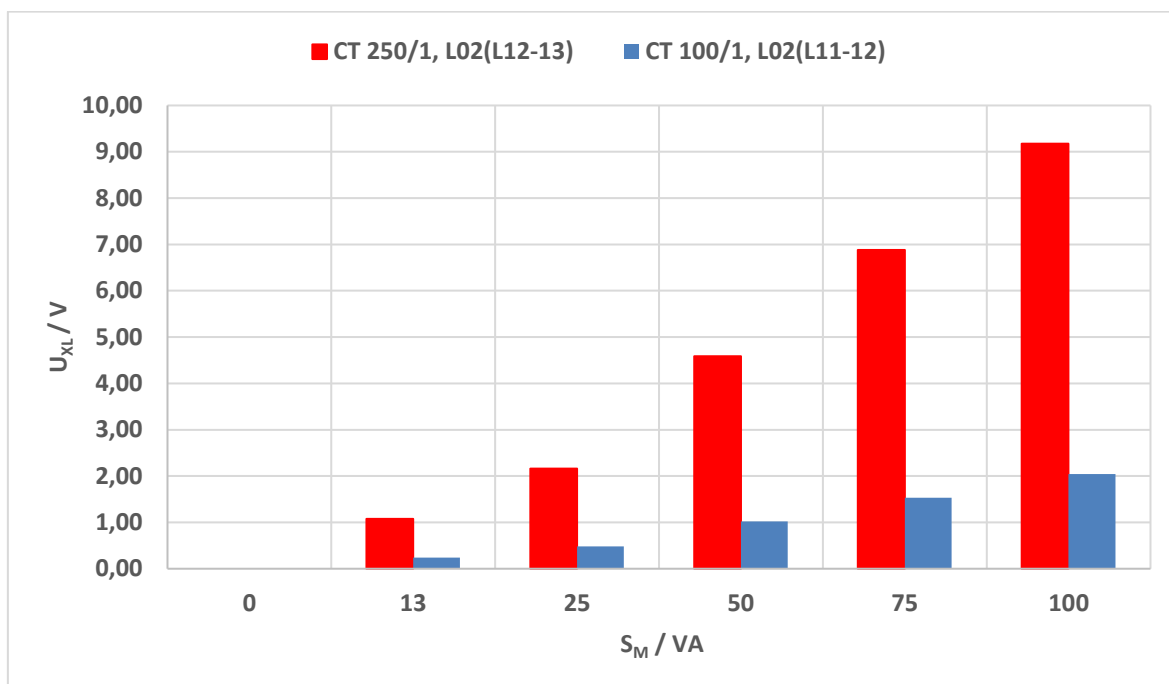
Tablica 11. Pad napona na elementima zračne prigušnice pri spoju L02 (L11-12)

Teret		CT 100/1, L02(L11-12)										
		Pad napona uslijed struje tereta:						I_{CT}/A		I_{2M}/A		
S_{2P}/VA	S_{2M}/VA	CT	R_L/Ω	L/mH	X_L/Ω	I_{2P}/A	I_{2M}/A	I_{CT}/A	U_R/V	U_{XL}/V	U_R/V	U_{XL}/V
25000 $\cos\varphi=1,0$	0	100	0,78	4,42	1,67	107,08	0,00	1,07	0,84	1,78	0,00	0,00
	12,5						0,14				0,11	0,24
	25						0,29				0,23	0,48
	50						0,61				0,48	1,02
	75						0,92				0,72	1,53
	100						1,23				0,96	2,04
50000 $\cos\varphi=1,0$	0	100	0,78	4,42	1,67	205,70	0,00	2,06	1,61	3,43	0,00	0,00
	12,5						0,14				0,11	0,24
	25						0,29				0,23	0,48
	50						0,61				0,48	1,02
	75						0,92				0,72	1,53
	100						1,23				0,96	2,04

Usporedba pada napona na X_L i R elementima uzrokovan strujom I_{2M} dana je na slikama 22 i 23.



Slika 22. Pad napona na R elementu prigušnice L02 u ovisnosti o teretu na mjernom namotu



Slika 23. Pad napona na X_L elementu prigušnice L02 u ovisnosti o teretu na mjernom namotu

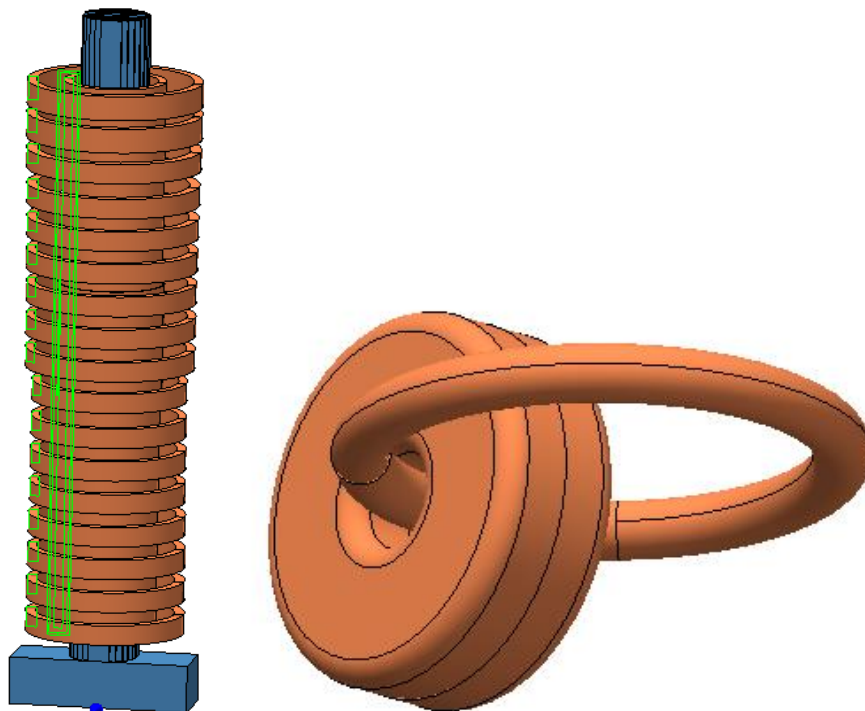
Iz ovog pristupa se može zaključiti kako je povoljnije da otpor zračne prigušnice bude što manjeg iznosa. Ovaj zahtjev se može ostvariti izborom žice prilikom izrade zračne prigušnice. Stoga, usporedbom vrijednosti induktiviteta i otpora pojedinih odcjepa zračne prigušnice L01 i L02, danih u tablici 6 i 7, bitno za uočiti kako su otpori pojedinog odcjepa L01 manji od $0,5 \Omega$ dok su kod L02 veći od $1,0 \Omega$.

S obzirom na ustanovljene zaključke, odlučeno je za sljedeća mjerenja koristiti sklop za korekciju u sljedeća dva spoja i sa skraćenim nazivima radi lakše preglednosti rezultata:

- CT01 u spoju 100:1 A i prigušnica L01 kada je u spoju 1-5, $X_L = 1,16 \Omega$ i $R_L = 0,27 \Omega$, naziv: manji induktivitet
- CT01 u spoju 100:1 A i prigušnica L01 kada je u spoju 1-11, $X_L = 3,07 \Omega$ i $R_L = 0,48 \Omega$, naziv: veći induktivitet

6. Numeričko modeliranje korekcijskog sklopa

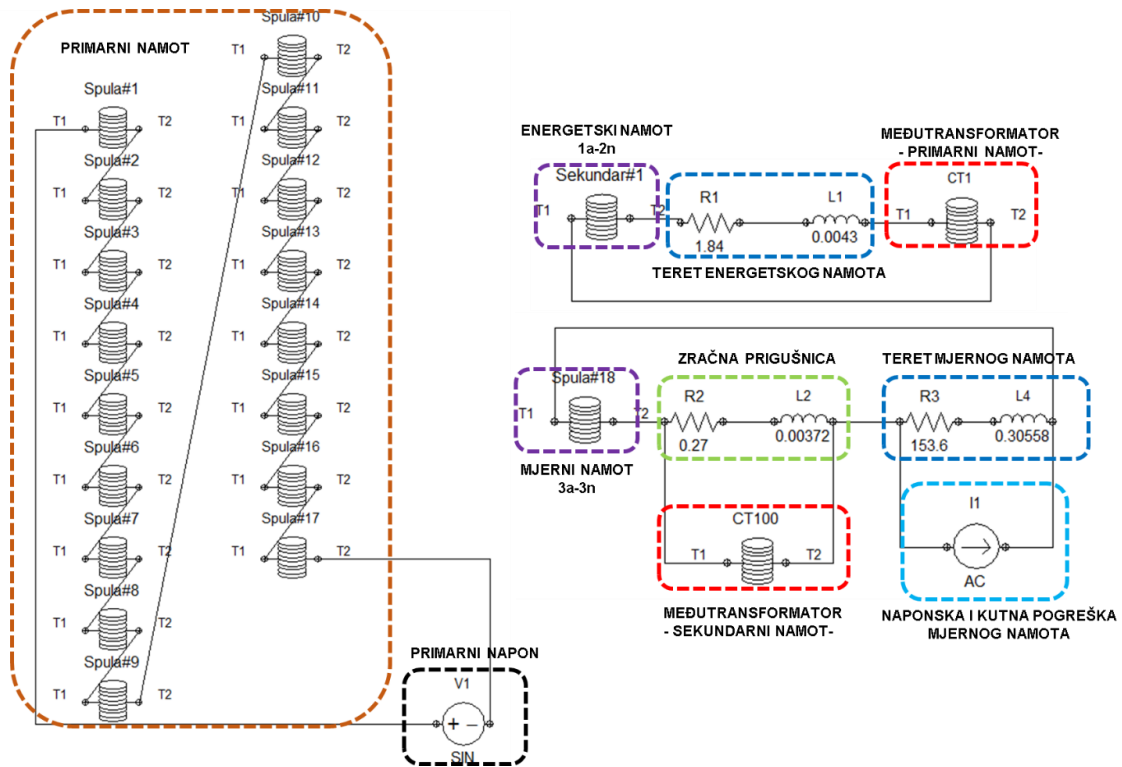
Kako bi se potkrijepili rezultati ispitivanja, korišten je programski alat Mentor Graphics MagNet verzije 7.7 za sve numeričke simulacije. Na slici 24 prikazan je 3D model VPT-a i međutransformatora. Međutransformator CT modeliran je na dovoljnoj udaljenosti kako bi se izbjegao među utjecaj od modela VPT-a, budući da je i tijekom ispitivanja međutransformator bio smješten izvan VPT-a, kao što je prikazano na slici 16.



Slika 24. Mentor Graphics MagNet 3D model VPT-a (lijevo), 3D model međutransformatora (desno)

Elementi zračne prigušnice L01 simulirani su električki R i L elementom. Slika 25 prikazuje električnu shemu korištenu za modeliranje strujnog kruga. Na električnoj shemi su prikazani elementi primarnog i sekundarnog namota VPT-a. Rađene su simulacije sa dodanim otporom primarnog namota (Model1) i bez otpora primarnog namota (Model2).

Za potrebe proračuna korišten je kvazi-statički trodimenzionalni proračun.



Slika 25. Električna shema

Rezultati dobiveni u numeričkim proračunom na strujnom izvoru $I1$ analitički su preračunati kako bi se promatrali parametri u skladu sa mjerenjima. Stoga je analitički preračunata vrijednost dobivenog napona kao pogreška s obzirom na nazivnu vrijednost, dok je kutna pogreška analitički preračunata u minute.

Budući da su mjerenja rađena sa 50% nazivnog napona 82000 V, onda je referentna nazivna vrijednost na mjernom sekundaru $0,5 * \frac{120}{\sqrt{3}}$ V. Izrazi kojim su računane naponske i kutne pogreške na mjernom namotu 3a-3n dane su nastavku.

$$p/\% = \left(\frac{u_{I1}}{0,5 * \frac{120}{\sqrt{3}}} - 1 \right) \times 100\% \quad (6.1)$$

$$\delta/min = -(90 - \alpha_{I1}) \times 60 \quad (6.2)$$

Gdje je:

u_{I1} / V– napon na strujnom izvoru $I1$

α_{I1} - kut u stupnjevima na strujnom izvoru $I1$

6.1. Usporedba mjerenja i proračuna

Za potrebe razumijevanja slijeda ispitivanja u tablicama 12 i 13 su prikazane točke promjene opterećenja na 3a-3n i energetskom namotu. Podjela je rađena ovisno o faktoru snage i iznosu tereta, kako bi se došlo do zaključka do koje mjere određene promjene utječu na ponašanje klase točnosti.

Tablica 12. Promatrane točke promjene tereta na mjernom i energetskom namotu uz $\cos\varphi = 0,8$

S_E/VA	S_M/VA	Oznaka na grafu
0	0, $\cos\varphi=0,8$	0 kVA
	12,5, $\cos\varphi=0,8$	
	25, $\cos\varphi=0,8$	
	50, $\cos\varphi=0,8$	
	75, $\cos\varphi=0,8$	
	100, $\cos\varphi=0,8$	
25000, $\cos\varphi=0,8$	0, $\cos\varphi=0,8$	25 kVA_ $\cos\varphi=0,8$
	12,5, $\cos\varphi=0,8$	
	25, $\cos\varphi=0,8$	
	50, $\cos\varphi=0,8$	
	75, $\cos\varphi=0,8$	
	100, $\cos\varphi=0,8$	
50000, $\cos\varphi=0,8$	0, $\cos\varphi=0,8$	50 kVA_ $\cos\varphi=0,8$
	12,5, $\cos\varphi=0,8$	
	25, $\cos\varphi=0,8$	
	50, $\cos\varphi=0,8$	
	75, $\cos\varphi=0,8$	
	100, $\cos\varphi=0,8$	

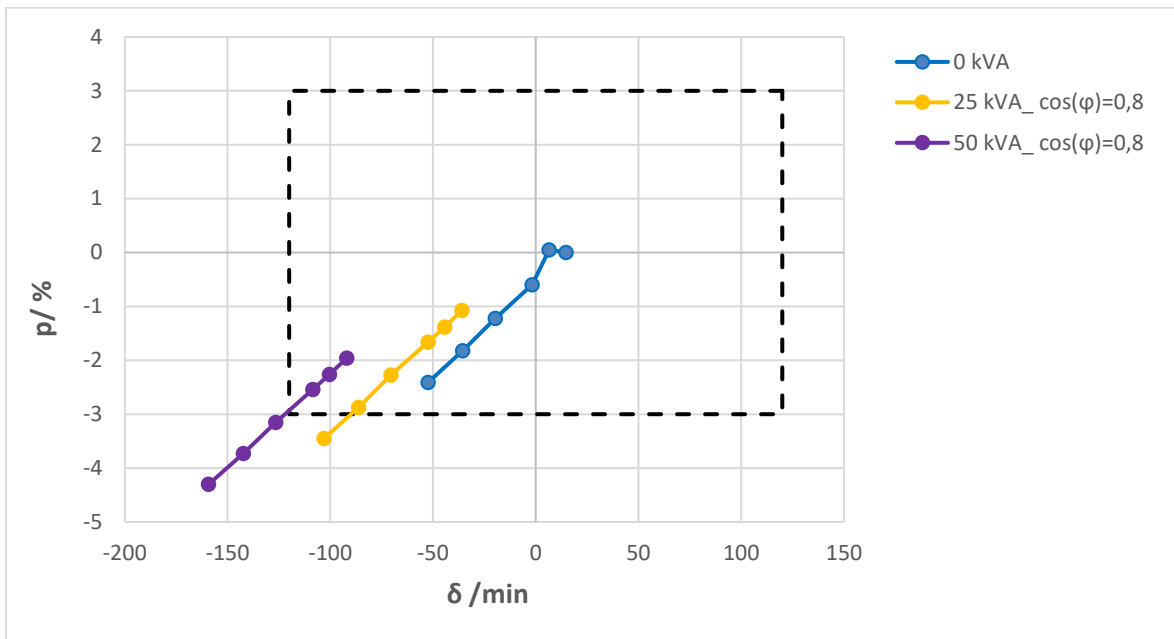
Tablica 13. Promatrane točke promjene tereta na mjernom i energetskom namotu uz $\cos\varphi = 1,0$

S_E/VA	S_M/VA	Oznaka na grafu
0	0, $\cos\varphi=0,8$	0 kVA
	12,5, $\cos\varphi=0,8$	
	25, $\cos\varphi=0,8$	
	50, $\cos\varphi=0,8$	
	75, $\cos\varphi=0,8$	
	100, $\cos\varphi=0,8$	
25000, $\cos\varphi=1,0$	0, $\cos\varphi=0,8$	25 kVA_ $\cos\varphi=1,0$
	12,5, $\cos\varphi=0,8$	
	25, $\cos\varphi=0,8$	
	50, $\cos\varphi=0,8$	
	75, $\cos\varphi=0,8$	
	100, $\cos\varphi=0,8$	
50000, $\cos\varphi=1,0$	0, $\cos\varphi=0,8$	50 kVA_ $\cos\varphi=1,0$
	12,5, $\cos\varphi=0,8$	
	25, $\cos\varphi=0,8$	
	50, $\cos\varphi=0,8$	
	75, $\cos\varphi=0,8$	
	100, $\cos\varphi=0,8$	

U nastavku je dana usporedba mjerenih (manji i veći induktivitet) i numerički (Model1 i Model2) računatih vrijednosti za sve točke navedene u tablicama 12 i 13.

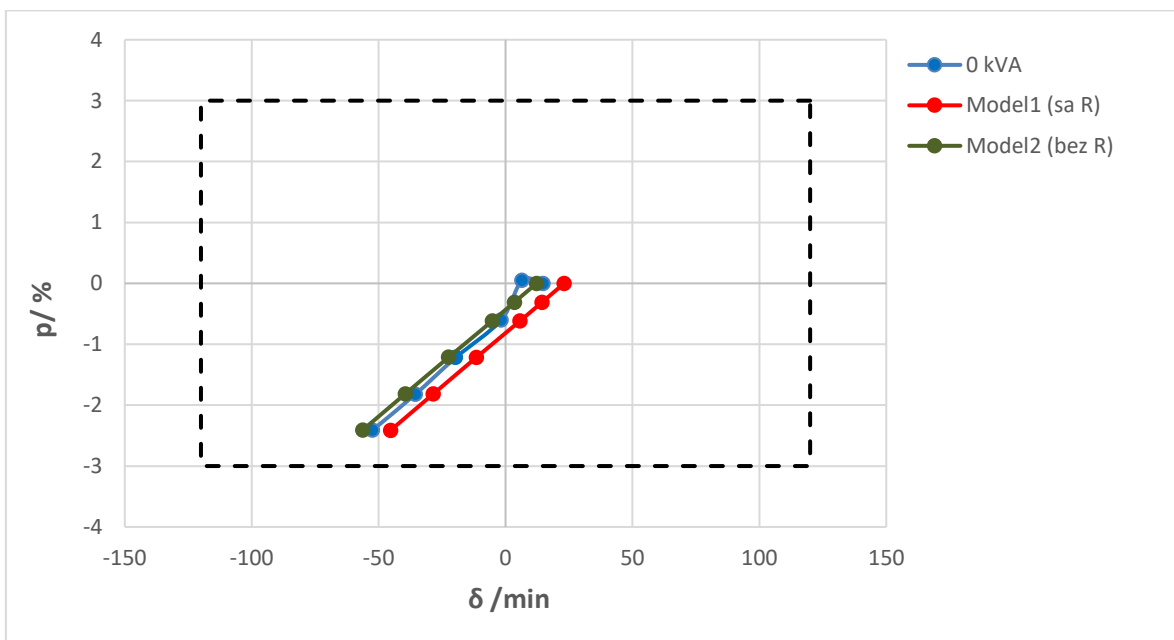
6.2. Korekcijski sklop sa manjim induktivitetom i teret $\cos\varphi=0,8$

Na slici 26 su prikazani svi rezultati ispitivanja klase točnosti na namotu 3a-3n uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom uz promjenu tereta kako je navedeno u tablici 12. Iz prikazanih rezultata može se zaključiti kako uz korišteni korekcijski sklop nisu zadovoljeni zahtjevi 3P klase točnosti za zadani raspon tereta na mjernom i energetskom namotu.

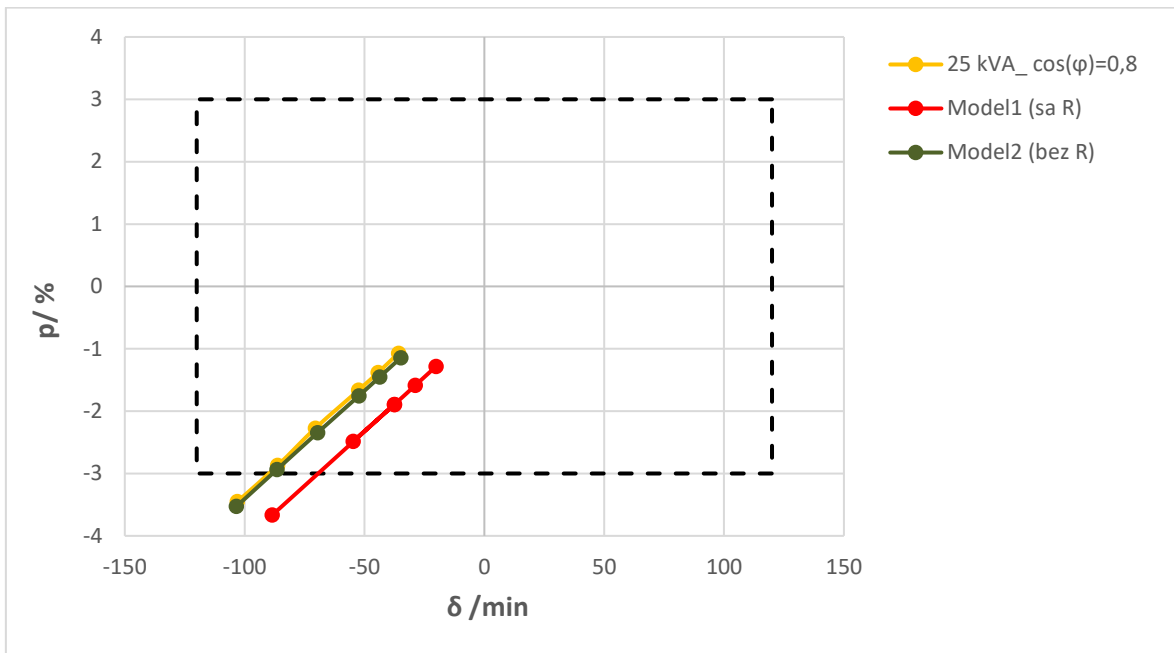


Slika 26. Rezultati ispitivanja uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom prema tablici 12

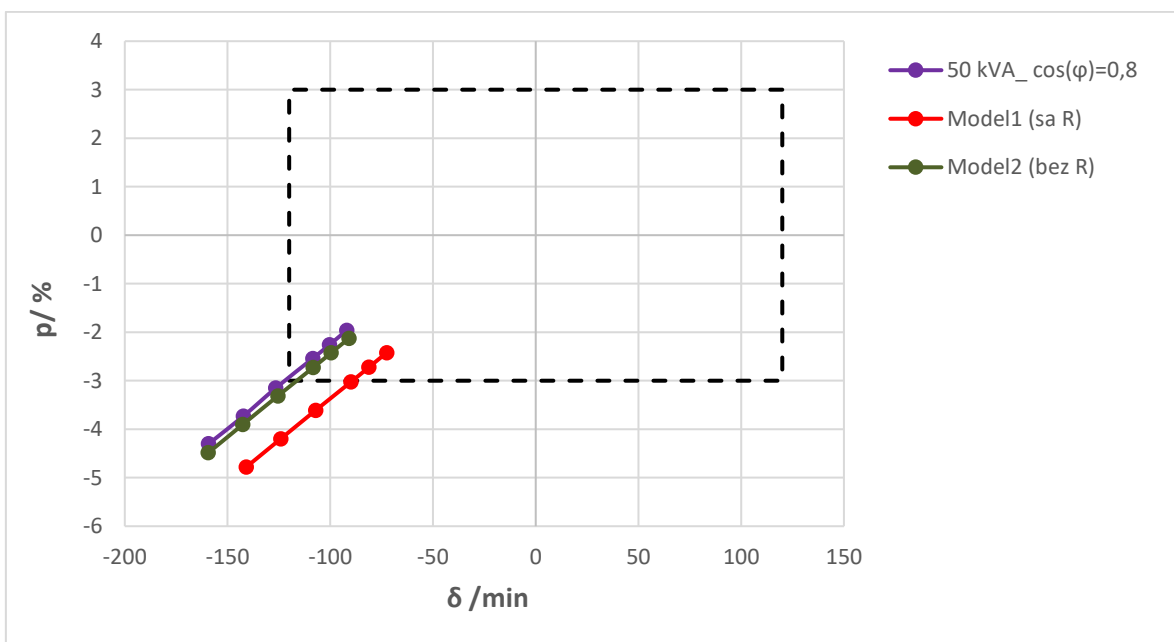
U nastavku je dana usporedba rezultata mjerenja i numeričkog proračuna. Vidljivo je da je trend ponašanja naponske i kutne pogreške zadržan uz određenu translataciju. Također je bitno za primijetiti kako numerički model, Model2, koji ne uzima otpor primarnog namota, daje rezultate bliže onim mjerenima.



Slika 27. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom za 0 kVA



Slika 28. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom za 25 kVA $\cos\varphi=0,8$



Slika 29. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom za 50 kVA $\cos\varphi=0,8$

Točne vrijednosti naponske i kutne pogreške izmjerene u ispitnoj stanici i dobivene iz oba numerička modela dane su u tablici 14. Poklapanje kutne pogreške najbolje je za slučaj kada se u numeričkom modelu ne uzme u obzir otpor primarnog namota (Model2) jer je onda najveća razlika mjerne i računate vrijednosti kuta 3,5 min dok je za Model1 48,7 min. Naponska pogreška

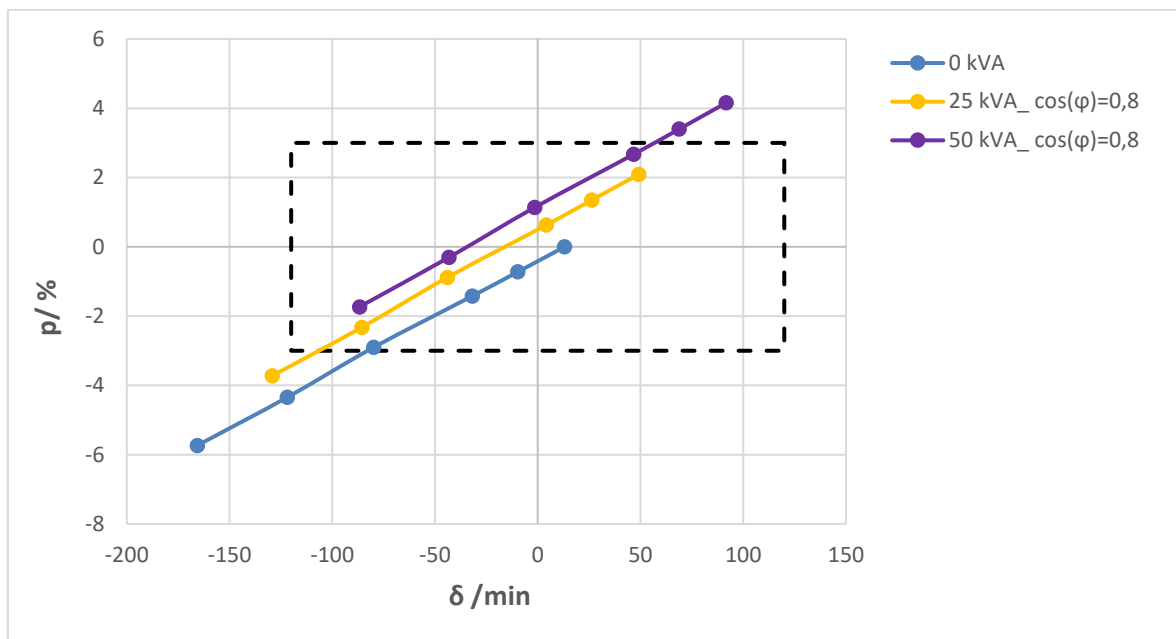
numeričkih modela u odnosu na mjerene vrijednosti iznosi između 0,4 – 1%, što ne predstavlja toliki problem budući da najveći utjecaj na naponsku pogrešku ima teret na mjernom namotu kada je u rasponu 50 – 100 VA, što je već prije zaključeno da je potrebno ograničiti na manji iznos.

Tablica 14. Rezultati ispitivanja i numeričkog proračuna uz spoj sklopa s manjim induktivitetom

Ispitne točke		Mjerene vrijednosti			Model2 (bez R)		Model1 (sa R)	
S_E/VA	S_M/VA	U_1/V	$p/\%$	δ /min	$p/\%$	δ /min	$p/\%$	δ /min
0	0	41000	0,00	14,80	0,00	12,30	0,00	23,10
	12,5	41000	0,10	6,50	-0,30	3,50	-0,30	14,40
	25	41000	-0,60	-1,70	-0,60	-5,20	-0,60	5,70
	50	41000	-1,20	-19,70	-1,20	-22,40	-1,20	-11,50
	75	41000	-1,80	-35,50	-1,80	-39,40	-1,80	-28,50
	100	41000	-2,40	-52,40	-2,40	-56,30	-2,40	-45,30
25000 $\cos\varphi=0,8$	0	41000	-1,10	-35,80	-1,10	-34,90	-1,30	-20,10
	12,5	41000	-1,40	-44,30	-1,40	-43,60	-1,60	-28,80
	25	41000	-1,70	-52,40	-1,80	-52,30	-1,90	-37,50
	50	41000	-2,30	-70,40	-2,30	-69,50	-2,50	-54,70
	75	41000	-2,90	-86,20	-2,90	-86,50	-1,90	-37,50
	100	41000	-3,50	-103,00	-3,50	-103,40	-3,70	-88,50
50000 $\cos\varphi=0,8$	0	41000	-2,00	-92,00	-2,10	-90,90	-2,40	-72,50
	12,5	41000	-2,30	-100,40	-2,40	-99,60	-2,70	-81,20
	25	41000	-2,50	-108,50	-2,70	-108,30	-3,00	-89,90
	50	41000	-3,10	-126,50	-3,30	-125,50	-3,60	-107,10
	75	41000	-3,70	-142,30	-3,90	-142,50	-4,20	-124,10
	100	41000	-4,30	-159,20	-4,50	-159,40	-4,80	-140,90

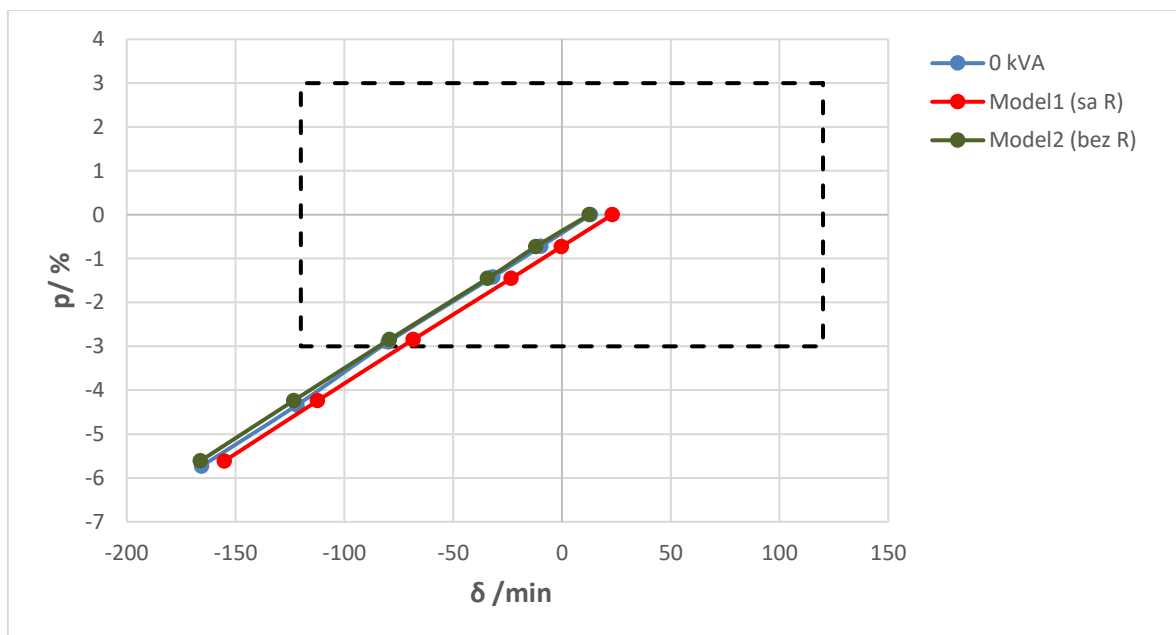
6.3. Korekcijski sklop sa većim induktivitetom i teret $\cos\varphi=0,8$

Slika 30. prikazuje sve rezultate ispitivanja prema točkama navedenim u tablici 12 uz korekcijski sklop s većim induktivitetom. Iz prikazanih rezultata može se zaključiti kako uz korišteni korekcijski sklop nisu zadovoljeni zahtjevi 3P klase točnosti za zadani raspon tereta na mjernom i energetsom namotu.

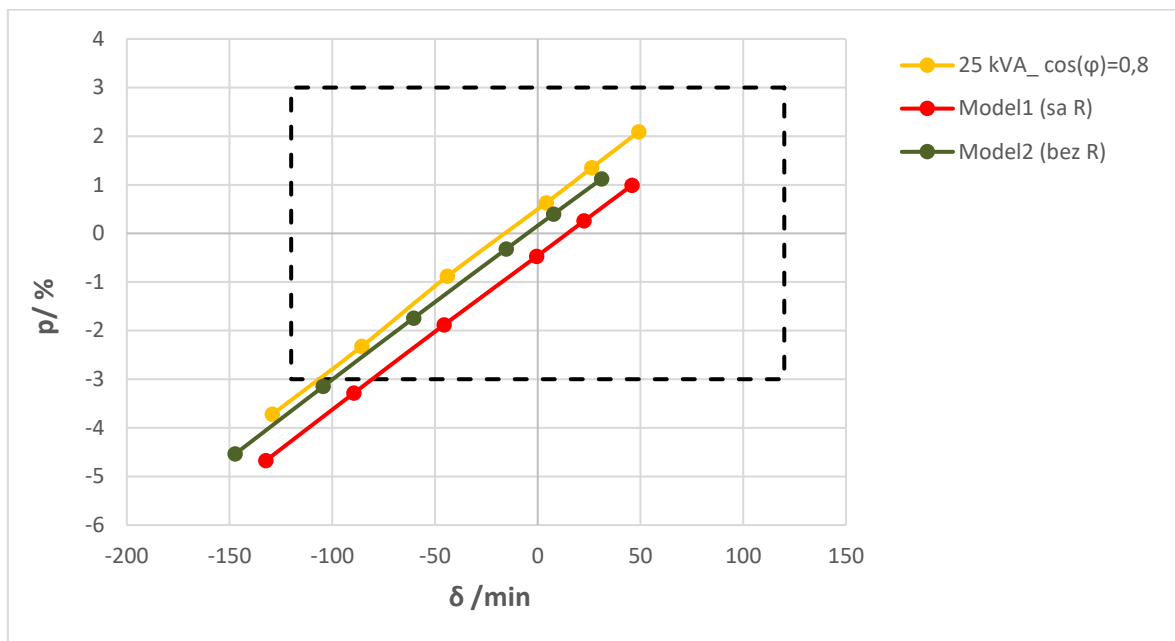


Slika 30. Rezultati ispitivanja uz korekcijski sklop s većim induktivitetom prema tablici 12

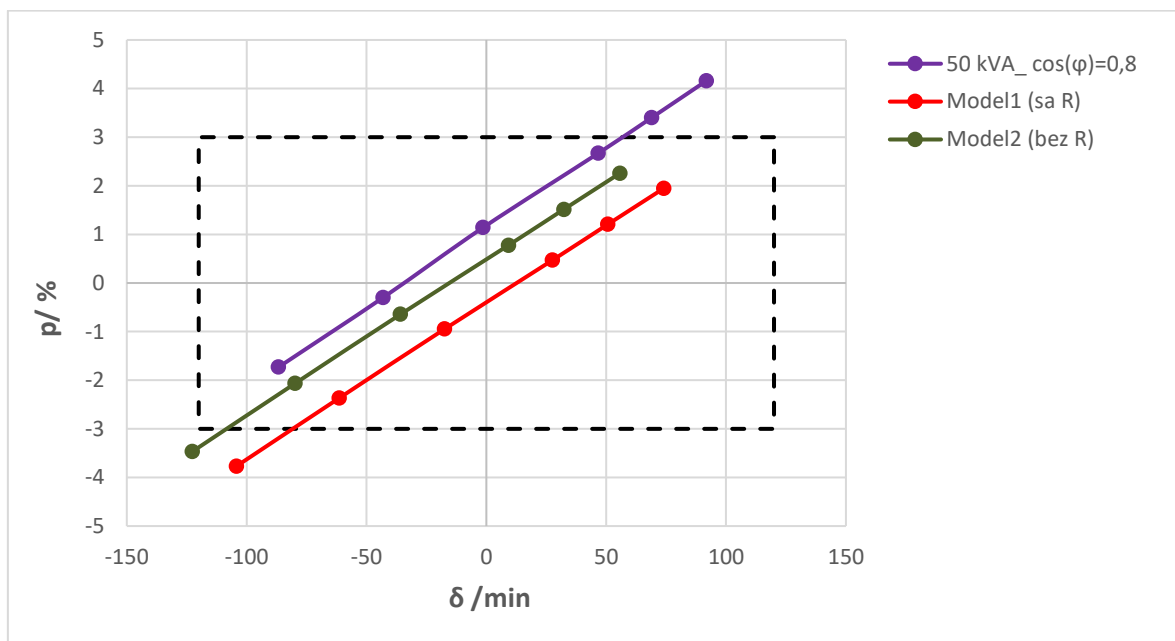
U nastavku je dana usporedba mjerene i numerički računane naponske i kutne pogreške. Iz rezultata je vidljivo da ovaj korekcijski spoj nepovoljno utječe na naponsku pogrešku u spoju kada je mjerni namot opterećen 75 VA i 100 VA $\cos \varphi = 0,8$. Usporedbom s rezultatima numeričkog proračuna može se zaključiti da oba modela imaju slično ponašanje kutne i naponske pogreške s tim da Model2 bilježi manja odstupanja od rezultata mjerenja.



Slika 31. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s većim induktivitetom za 0 kVA



Slika 32. Rezultati ispitivanja uz korekcijski sklop s većim induktivitetom za 25 kVA $\cos\varphi=0,8$



Slika 33. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s većim induktivitetom za 50 kVA $\cos\varphi=0,8$

Točne vrijednosti naponske i kutne pogreške izmjerene u ispitnoj stanici i dobivene iz oba numerička modela dane su u tablici 15. Poklapanje kutne pogreške najbolje je za slučaj kada se u numeričkom modelu ne uzme u obzir otpor primarnog namota (Model1) jer je onda najveća razlika mjerne i računate vrijednosti kuta 19,1 min dok je za Model2 37,5 min. Naponska pogreška numeričkih modela u odnosu na mjerene vrijednosti iznosi između 1,9 – 2,2%.

Uspoređujući rezultate uz korekcijski sklop sa većim i manjim induktivitetom i terete faktora snage $\cos \varphi = 0,8$, mogu se uočiti značajne razlike na ponašanje klase točnosti. U slučaju kada je zračna prigušnica u spoju manjeg induktiviteta rezultati naponske pogreške su bolji, ali je kutna pogreška pri većem opterećenju mjernog namota (>50 VA) van klase točnosti 3P. Kada je zračna prigušnica u spoju većeg induktiviteta bolji su rezultati glede ponašanja kutne pogreške, ali se stvara problem naponske pogreške koja uvelike varira. Tu se nameće potreba za praćenjem iznosa otpora i induktiviteta pojedinog spoja prigušnice budući da spoj sa manjim induktivitetom ima 43% manji otpor namota i time manje nepovoljan utjecaj na naponsku pogrešku a 62% manji induktivitet i zbog toga lošije ponašanje kutne pogreške, nego spoj sa većim induktivitetom.

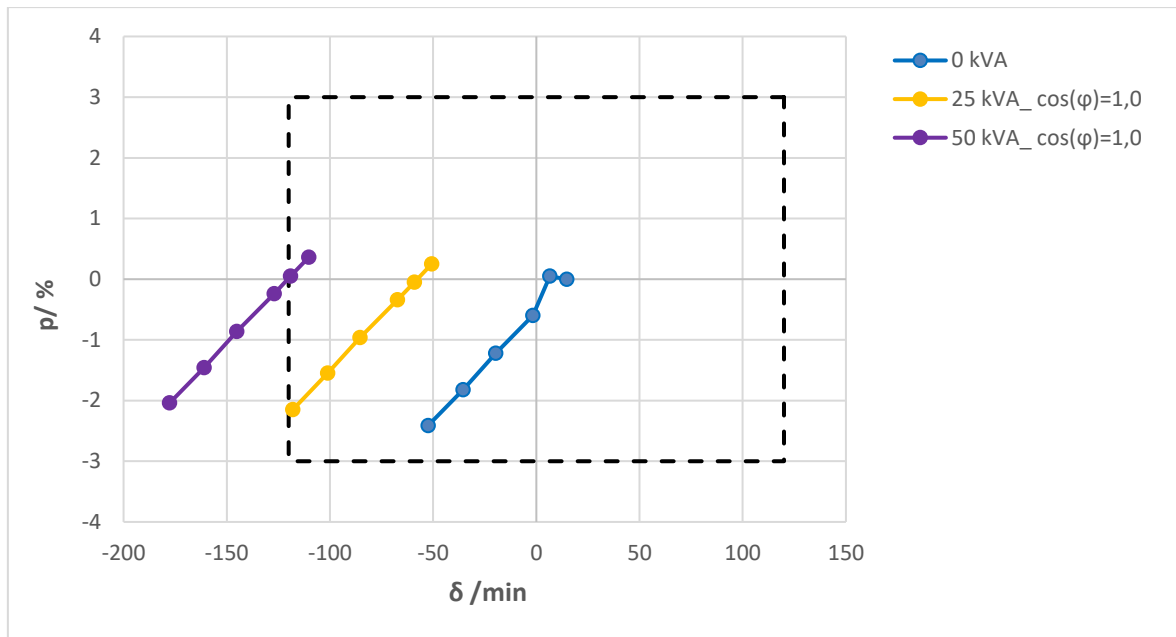
Tablica 15. Rezultati ispitivanja i numeričkog proračuna uz spoj sklopa s većim induktivitetom

Ispitne točke		Mjerene vrijednosti			Model2 (bez R)		Model1 (sa R)	
S_E/VA	S_M/VA	U_1/V	p/%	δ /min	p/%	δ /min	p/%	δ /min
0	0	41000	0,00	13,10	0,00	12,60	0,00	23,10
	12,5	41000	-0,70	-9,60	-0,70	-12,00	-0,70	-0,30
	25	41000	-1,40	-31,80	-1,50	-34,20	-1,50	-23,30
	50	41000	-2,90	-79,80	-2,80	-79,30	-2,80	-68,40
	75	41000	-4,30	-121,80	-4,20	-123,30	-4,20	-112,30
	100	41000	-5,70	-165,60	-5,60	-166,20	-5,60	-155,20
25000 $\cos\varphi=0,8$	0	41000	2,10	49,20	1,10	31,20	1,00	46,00
	12,5	41000	1,40	26,30	0,40	7,80	0,30	22,60
	25	41000	0,60	4,20	-0,30	-15,300	-0,50	-0,40
	50	41000	-0,90	-43,90	-1,70	-60,30	-1,90	-45,50
	75	41000	-2,30	-85,50	-3,10	-104,30	-3,30	-89,50
	100	41000	-3,70	-129,10	-4,50	-147,20	-4,70	-132,30
50000 $\cos\varphi=0,8$	0	41000	4,20	91,80	2,30	55,70	1,90	74,10
	12,5	41000	3,40	68,90	1,50	32,30	1,20	50,70
	25	41000	2,70	46,70	0,80	9,20	0,50	27,60
	50	41000	1,10	-1,40	-0,60	-35,80	-0,90	-17,40
	75	41000	-0,30	-43,10	-2,10	-79,80	-2,40	-61,40
	100	41000	-1,70	-86,70	-3,50	-122,70	-3,80	-104,20

6.4. Korekcijski sklop sa manjim induktivitetom i teret $\cos\varphi=1,0$

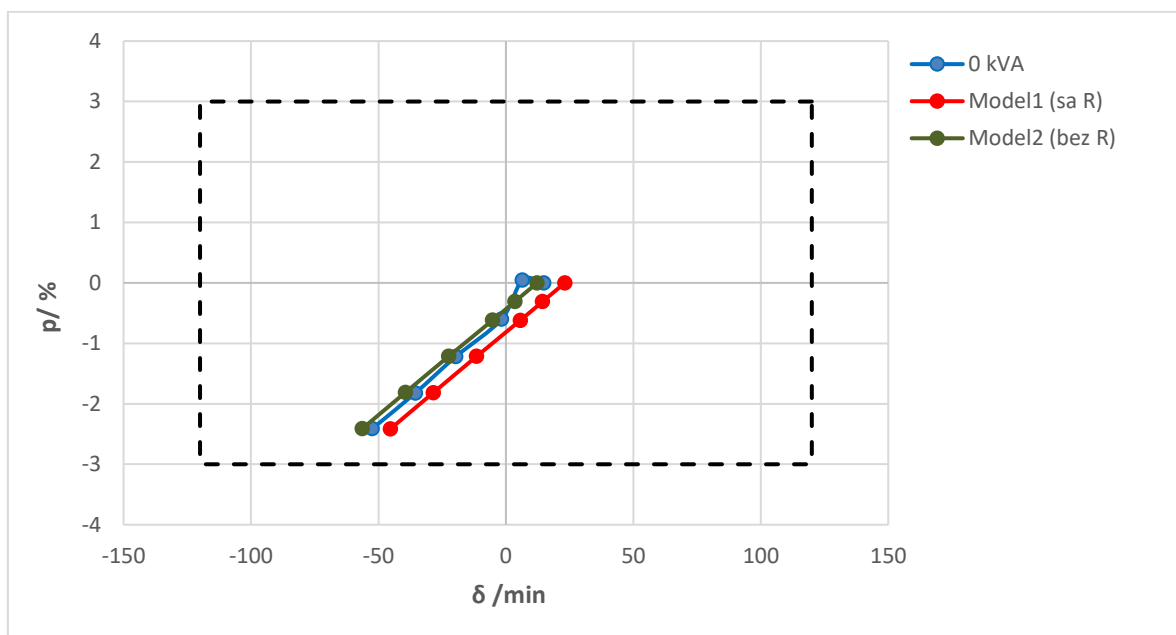
Na slici 34 su prikazani svi rezultati ispitivanja klase točnosti na namotu 3a-3n uz promjenu tereta na mjernom i energetsom namotu prema tablici 13. Iz grafa se može vidjeti kako uz korekcijski sklop sa manjim induktivitetom nisu zadovoljen

i zahtjevi za 3P klasom točnosti za slučaj kada je energetski namot terećen sa 50 kVA $\cos \varphi = 1,0$.

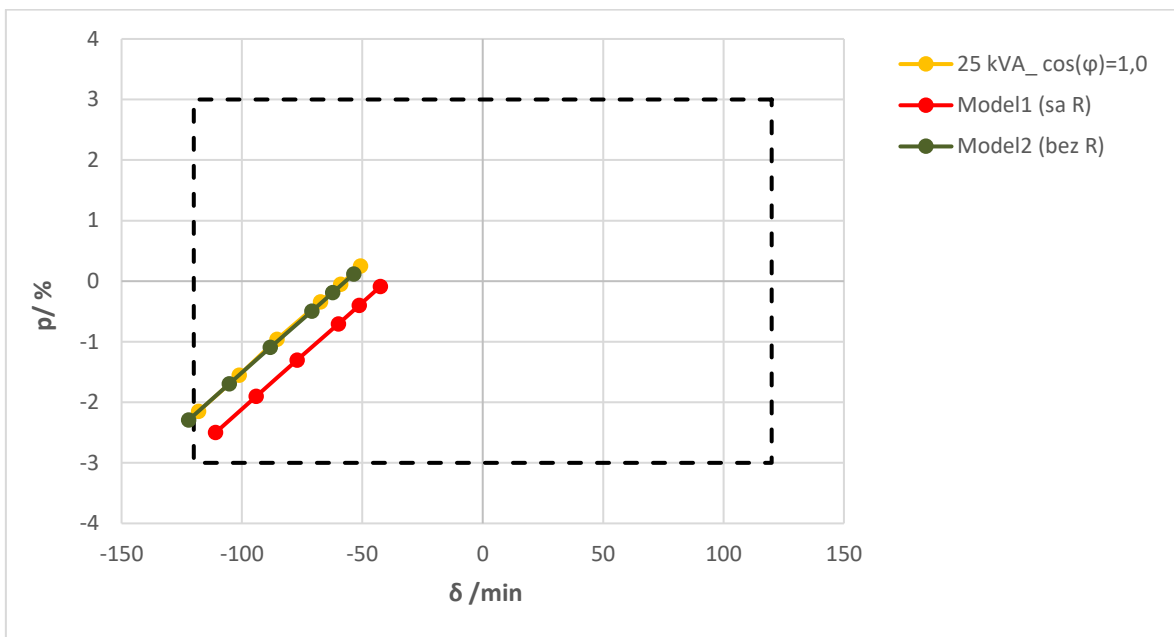


Slika 34. Rezultati ispitivanja uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom prema tablici 13

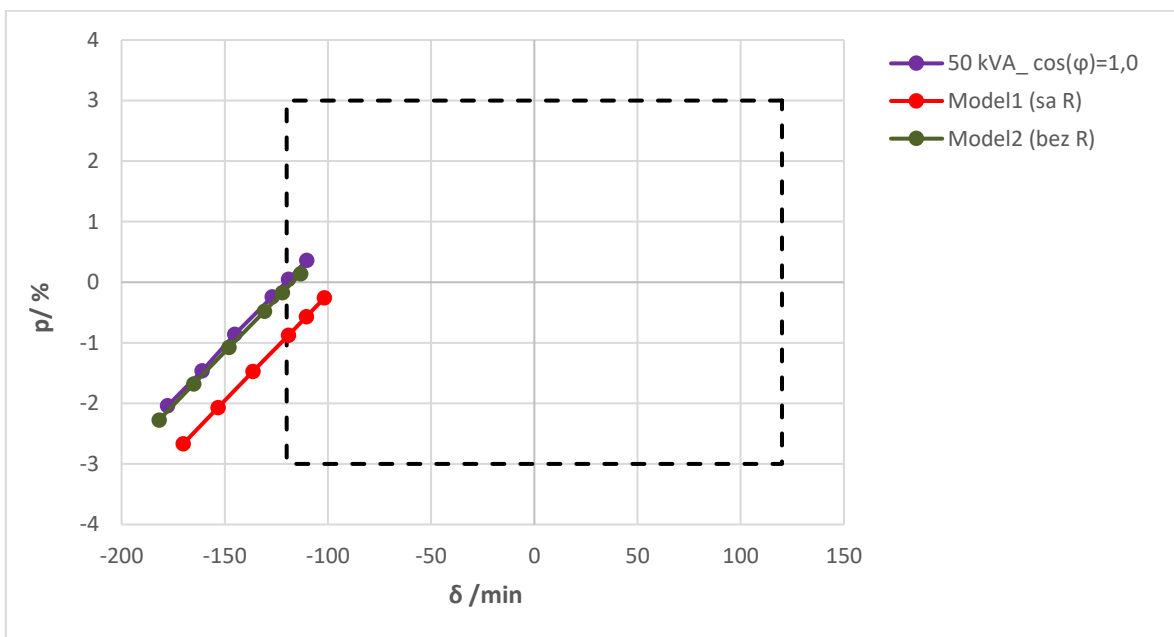
U nastavku će biti dana usporedba rezultata mjerenja i numeričkog izračuna. Trend ponašanja naponske i kutne pogreške zadržan je uz određenu translataciju. Također je bitno za primijetiti kako numerički model Model2, koji ne uzima otpor primarnog namota, daje rezultate bliže onim mjerenima.



Slika 35. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom za 0 kVA



Slika 36. Rezultati ispitivanja uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom za 25 kVA $\cos\varphi=1,0$



Slika 37. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom za 50 kVA $\cos\varphi=1,0$

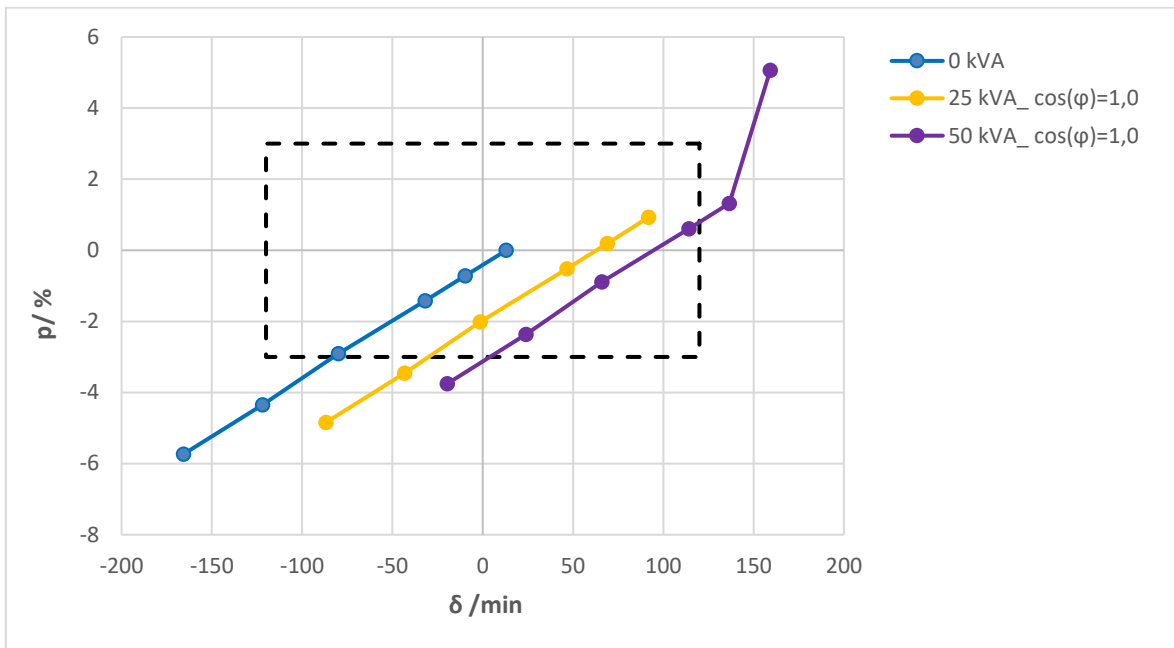
Točne vrijednosti naponske i kutne pogreške izmjerene u ispitnoj stanici i dobivene iz oba numerička modela dane su u tablici 16. Poklapanje kutne pogreške prihvatljivo je za oba numerička modela, budući da je najveća razlika mjerne i računate vrijednosti kuta Model2 4,1 min dok je za Model1 8,9 min. Naponska pogreška numeričkih modela u odnosu na mjerene vrijednosti iznosi 0,6%, što ne predstavlja problem budući da najveći utjecaj na naponsku pogrešku ima teret na mjernom namotu kada je u rasponu 50 – 100 VA.

Tablica 16. Rezultati ispitivanja i numeričkog proračuna uz spoj sklopa s manjim induktivitetom

Ispitne točke		Mjerene vrijednosti			Model2 (bez R)		Model1 (sa R)	
S_E/VA	S_M/VA	$U1/V$	$p/\%$	δ /min	$p/\%$	δ /min	$p/\%$	δ /min
0	0	41000	0,00	14,80	0,00	12,30	0,00	23,10
	12,5	41000	0,10	6,50	-0,30	3,50	-0,30	14,40
	25	41000	-0,60	-1,70	-0,60	-5,20	-0,60	5,70
	50	41000	-1,20	-19,70	-1,20	-22,40	-1,20	-11,50
	75	41000	-1,80	-35,50	-1,80	-39,40	-1,80	-28,50
	100	41000	-2,40	-52,40	-2,40	-56,30	-2,40	-45,30
25000 $\cos\varphi=1,0$	0	41000	0,30	-50,70	0,10	-53,50	-0,10	-42,50
	12,5	41000	0,00	-59,00	-0,20	-62,30	-0,40	-51,20
	25	41000	-0,30	-67,30	-0,50	-71,00	-0,70	-59,90
	50	41000	-1,00	-85,40	-1,10	-88,20	-1,30	-77,10
	75	41000	-1,50	-101,10	-1,70	-105,20	-1,90	-94,10
	100	41000	-2,10	-118,00	-2,30	-122,00	-2,50	-110,90
50000 $\cos\varphi=1,0$	0	41000	0,40	-110,30	0,10	-113,20	-0,30	-101,70
	12,5	41000	0,10	-119,10	-0,20	-122,00	-0,60	-110,40
	25	41000	-0,20	-126,90	-0,50	-130,70	-0,90	-119,10
	50	41000	-0,90	-145,10	-1,10	-147,90	-1,50	-136,20
	75	41000	-1,50	-160,90	-1,70	-164,90	-2,10	-153,30
	100	41000	-2,00	-177,70	-2,30	-181,80	-2,70	-170,10

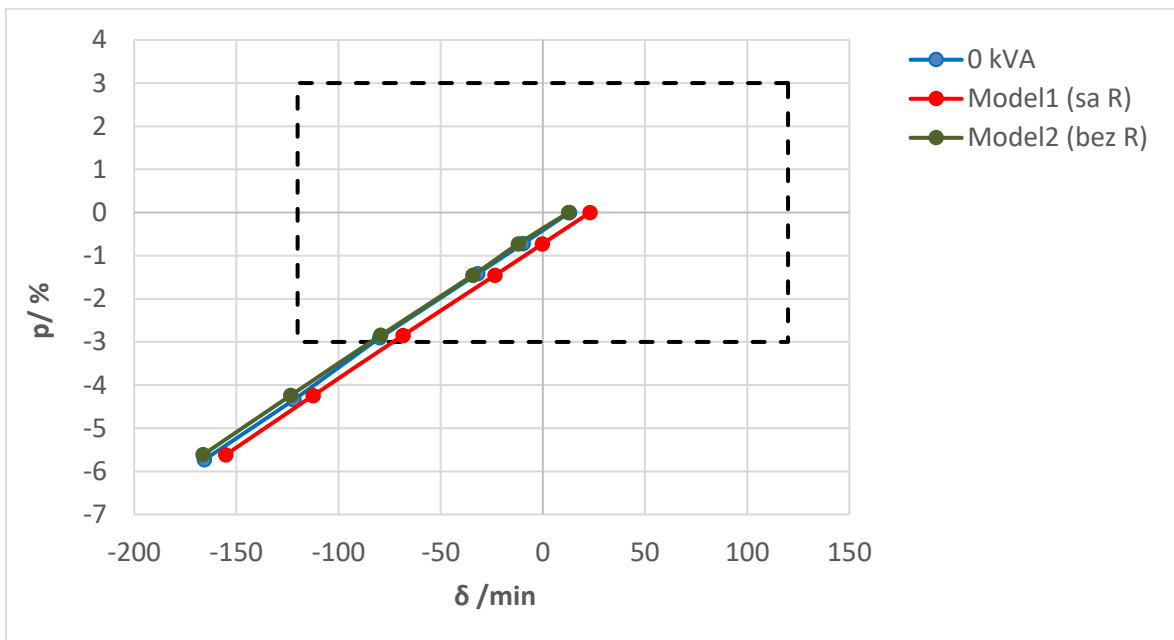
6.5. Korekcijski sklop sa većim induktivitetom i teret $\cos\varphi=1,0$

Na slici 38 su prikazani svi rezultati ispitivanja klase točnosti na namotu 3a-3n uz promjenu tereta na mjernom i energetskom namotu prema tablici 13. Iz grafa se može vidjeti kako uz korekcijski sklop sa većim induktivitetom, nisu zadovoljeni zahtjevi za klasom točnosti 3P na cijelom željenom rasponu prema tablici 13.

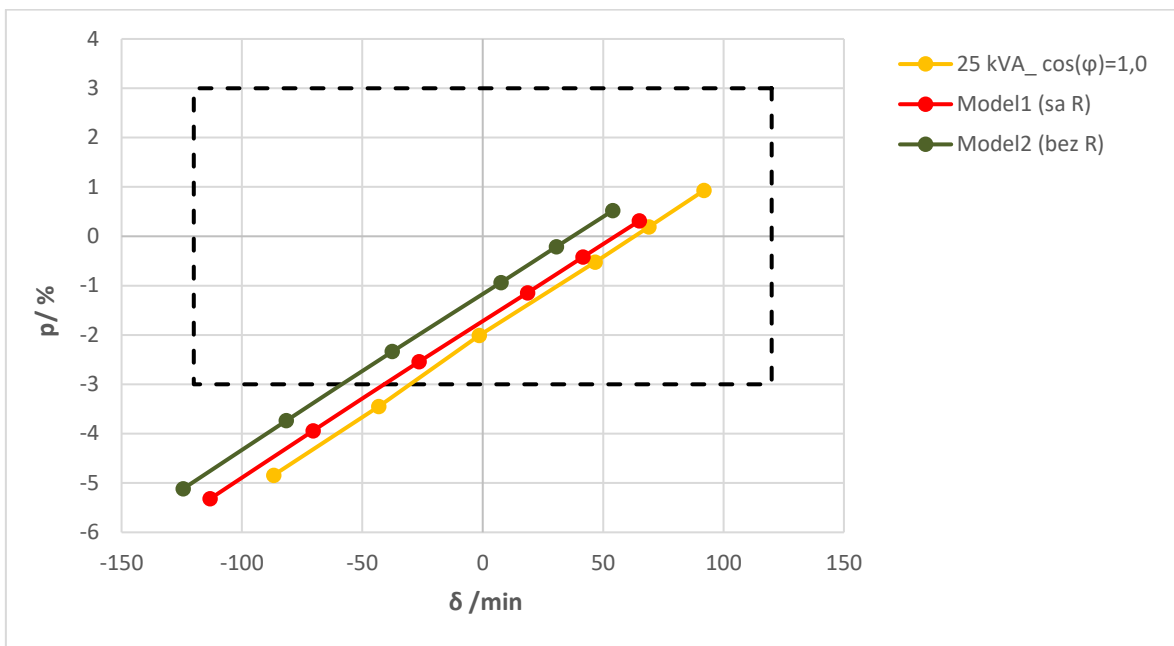


Slika 38. Rezultati ispitivanja uz korekcijski sklop s većim induktivitetom prema tablici 13

U nastavku će biti dana usporedba rezultata mjerenja i numeričkih proračuna. Sa slika je vidljivo kako rezultati proračuna prate trend ponašanja kutne i naponske pogreške.

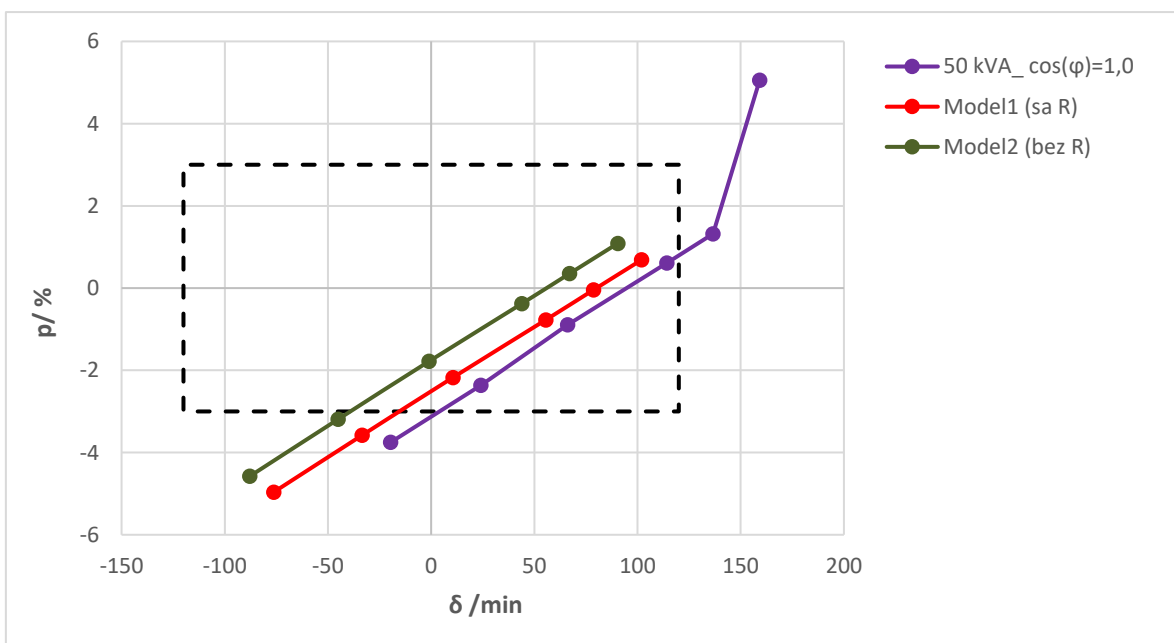


Slika 39. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s većim induktivitetom prema za 0 kVA



Slika 40. Rezultati ispitivanja uz korekcijski sklop s većim induktivitetom prema za 25 kVA $\cos\varphi=1,0$

Slika 41 prikazuje usporedbu rezultata za 50 kVA $\cos\varphi = 1,0$. Ponašanje pogreške kada je mjerni namot opterećen teretom 0-25 VA $\cos\varphi = 0,8$ može se smatrati pogreškom u mjerenju jer nije u skladu s ponašanjem pogreške iz prijašnjih rezultata.



Slika 41. Usporedba rezultati ispitivanja i numeričkih modela uz korekcijski sklop s većim induktivitetom za 50 kVA $\cos\varphi=1,0$

Točne vrijednosti naponske i kutne pogreške izmjerene u ispitnoj stanici i dobivene iz oba numerička modela dane su u tablici 17. Rezultati kutne pogreške razilaze se za oba numerička modela s obzirom na rezultate mjerenja, točnije najveća razlika mjerne i računate vrijednosti kuta za Model2 je 70,2 min dok je za Model1 58,6 min. Naponska pogreška numeričkih modela u odnosu na mjerene vrijednosti iznosi za Model2 je 4,0% dok je za Model1 4,4% što u oba slučaja zadire u granice klase točnosti 3P.

Tablica 17. Rezultati ispitivanja i numeričkog proračuna uz spoj sklopa s većim induktivitetom

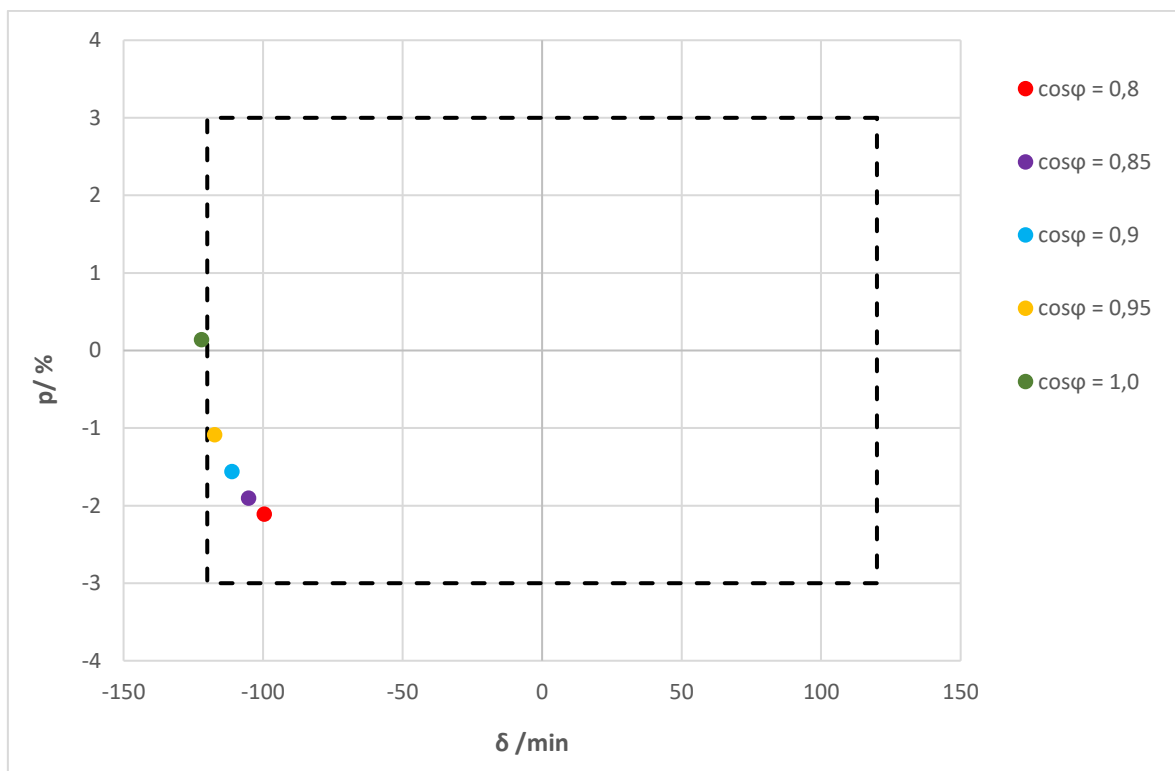
Ispitne točke		Mjerene vrijednosti			Model2 (bez R)		Model1 (sa R)	
S_E/VA	S_M/VA	U1/V	p/%	δ /min	p/%	δ /min	p/%	δ /min
0	0	41000	0,00	13,10	0,00	12,60	0,00	23,10
	12,5	41000	-0,70	-9,60	-0,70	-12,00	-0,70	-0,30
	25	41000	-1,40	-31,80	-1,50	-34,20	-1,50	-23,30
	50	41000	-2,90	-79,80	-2,80	-79,30	-2,80	-68,40
	75	41000	-4,30	-121,80	-4,20	-123,30	-4,20	-112,30
	100	41000	-5,70	-165,60	-5,60	-166,20	-5,60	-155,20
25000 $\cos\varphi=1,0$	0	41000	0,90	91,90	0,50	54,10	0,30	65,10
	12,5	41000	0,20	69,00	-0,20	30,70	-0,40	41,70
	25	41000	-0,50	46,70	-0,90	7,60	-1,10	18,60
	50	41000	-2,00	-1,40	-2,30	-37,50	-2,50	-26,40
	75	41000	-3,50	-43,20	-3,70	-81,50	-3,90	-70,40
	100	41000	-4,80	-86,80	-5,10	-124,40	-5,30	-113,20
50000 $\cos\varphi=1,0$	0	41000	5,10	159,20	1,10	90,50	0,70	102,10
	12,5	41000	1,30	136,60	0,40	67,10	0,00	78,70
	25	41000	0,60	114,20	-0,40	44,00	-0,80	55,60
	50	41000	-0,90	66,10	-1,80	-1,00	-2,20	10,60
	75	41000	-2,40	24,10	-3,20	-45,00	-3,60	-33,40
	100	41000	-3,70	-19,60	-4,60	-87,90	-5,00	-76,20

7. Dodatne analize

7.1. Utjecaj faktora snage, iznosa tereta i napona

Budući da rezultati dobiveni numeričkim proračunom vjerno prate rezultate mjerenja u ovom će poglavlju biti prikazani dodatni rezultati proračuna.

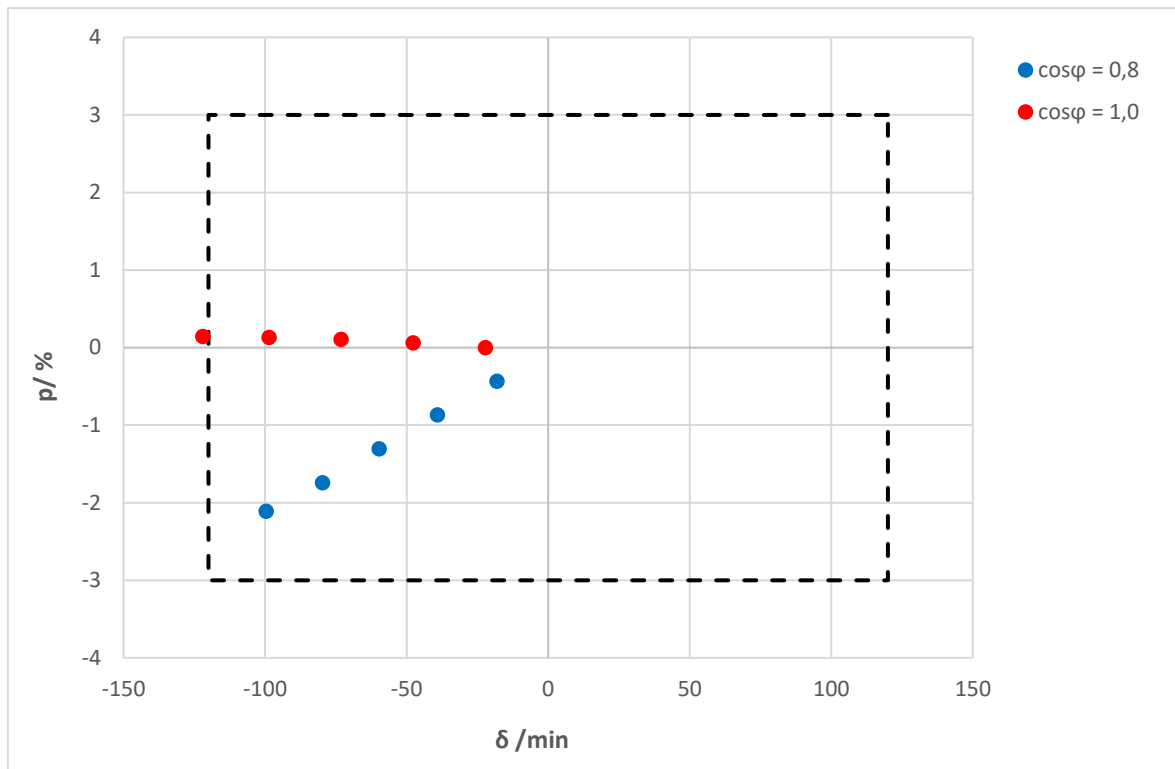
Za varijantu korekcijskog sklopa s manjim induktivitetom promatrano je ponašanje klase točnosti uz varijaciju karaktera teret 50 kVA $\cos \varphi$ od 0,8 do 1,0 u koracima od 0,05, dok je mjerni namot opterećen teretom 12,5VA $\cos \varphi = 0,8$. Grafički prikaz ponašanja naponske i kutne pogreške dan na slici 42. potvrđuje da uz isti priključeni teret $\cos \varphi$ 0,8 i 1,0 predstavljaju ekstremne slučajeve naponske i kutne pogreške.



Slika 42. Kutna i naponska pogreška u ovisnosti o promjeni faktora snage uz korekcijski sklop s manjim induktivitetom

Također je promatrano ponašanje klase točnosti za teret od 10 kVA do 50 kVA u koracima od 10 kVA karaktera $\cos \varphi = 0,8$ i $\cos \varphi = 1,0$, dok je mjerni namot opterećen teretom 12,5VA $\cos \varphi = 0,8$. Grafički prikaz ponašanja naponske i kutne pogreške dan na slici 43. potvrđuje da su dva glavna ekstrema mjerenja kutne i naponske pogreške kada transformator neterećen i kada je nazivno

terećen. Sva mjerenja između se mogu dobiti linearnom interpolacijom tih dvaju ekstremnih mjerenja.



Slika 43. Kutna i naponska pogreška u ovisnosti o promjeni tereta od 10 kVA do 50 kVA u koracima od 10 kVA za karaktera $\cos\varphi=0,8$ i $\cos\varphi=1,0$

Promjena kutne i naponske pogreške u ovisnosti o iznosu primarnog napona dana je u tablici 18. Proračun je rađen za varijantu korekcijskog sklopa s manjim induktivitetom, dok je energetski namot terećen sa 50 kVA $\cos\varphi$ 0,8 i 1,0 a mjerni namot je u oba proračuna terećen teretom 12,5VA $\cos\varphi = 0,8$. Iz prikazanih numeričkih rezultata može se uočiti kako iznos primarnog napona neznatno utječe na ponašanje kutne i naponske pogreške.

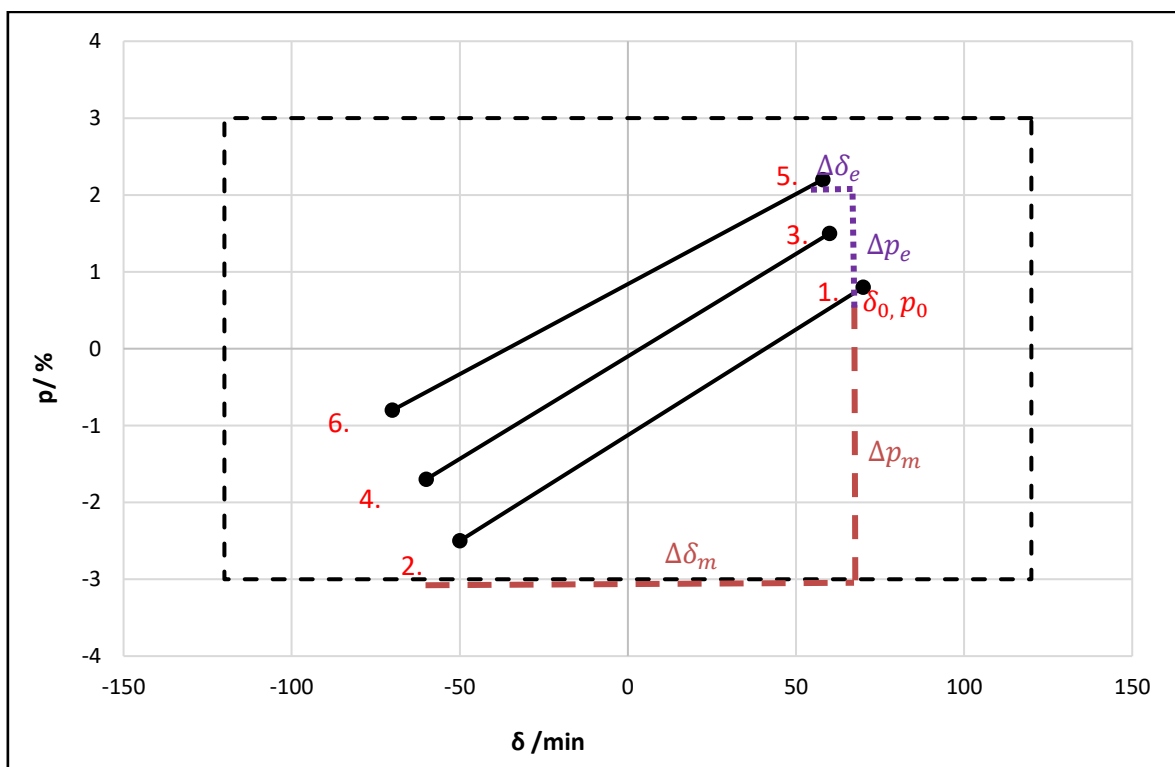
Tablica 18. Promjena naponske i kutne pogreške na mjernom namotu u ovisnosti o primarnom naponu

U1/%	$\cos\varphi = 1,0$		$\cos\varphi = 0,8$	
	p/%	δ /min	p/%	δ /min
5	-3,20	-99,30	-0,20	-124,20
25	-3,20	-99,30	-0,20	-124,20
50	-3,20	-99,30	-0,20	-124,10
75	-3,30	-99,20	-0,20	-124,00
100	-3,30	-99,10	-0,20	-123,90
120	-3,30	-99,10	-0,30	-123,80

7.2. Rezime i preporuke za dokazivanje klase točnosti

Iz prikazanih rezultata može se predložiti sljedeći mjerni opseg za buduća ispitivanja kako bi se dokazala klasa točnosti na mjernom namotu sa ugrađenim korekcijskim sklopom. Prema rezultatima prikazanim u poglavlju 7.1 promatraju se ekstremni slučajevi, odnosno kada je karakter energetske tereta $\cos \varphi = 0,8$ i $1,0$, te kada je transformator neterećen i nazivno terećen. Na slici 44 dan je grafički prikaz ponašanja kutne i naponske pogreške za šest predloženih točaka koje uzimaju u obzir najgori slučaj naponske i kutne pogreške uzrokovane terećenjem energetske namota.

1. $S_e = 0 \text{ VA}, S_m = 0 \text{ VA}$, čime se dobiva podatak o nultom položaju pogreške na mjernom namotu δ_0, p_0
2. $S_e = 0 \text{ VA}, S_m = \text{nazivni teret}$, čime se dobiva raspon pogreške mjernog namota $\Delta\delta_m, \Delta p_m$
3. $S_e = \text{nazivni teret karaktera } \cos \varphi = 0,8, S_m = 0 \text{ VA}$
4. $S_e = \text{nazivni teret karaktera } \cos \varphi = 0,8, S_m = \text{nazivni teret}$
5. $S_e = \text{nazivni teret karaktera } \cos \varphi = 1,0, S_m = 0 \text{ VA}$
6. $S_e = \text{nazivni teret karaktera } \cos \varphi = 1,0, S_m = \text{nazivni teret}$



Slika 44. Ispitne točke za dokazivanje klase točnosti na mjernom namotu

Kako bi se ustanovilo zadovoljava li mjerni namot klasu točnosti potrebno je odrediti iznos kutne i naponske pogreške prema navedenim točkama te dokazati da zbroj naponske i kutne pogreške bude manji od raspona koji je definiran pojedinom klasom točnosti.

$$p_0 + \Delta p_m + \Delta p_e < \Delta p_{klase\ točnosti} \quad (7.1)$$

$$\delta_0 + \Delta \delta_m + \Delta \delta_e < \Delta \delta_{klase\ točnosti} \quad (7.2)$$

Također je prihvatljivo, zbog ograničenja ispitne stanice, ispitivanja provoditi na manjem naponu nego nazivnom.

8. Zaključak

U ovom radu analiziran je utjecaj korekcijskog sklopa na mogućnost kompenzacije kutne pogreške mjernog namota kod naponskih transformatora velike snage. Iz prikazanog istraživanja može se zaključiti kako predložena izvedba sklopa za korekciju značajno poboljšava ponašanje kutne i naponske pogreške, te potvrđuje njegovu isplativost u budućoj primjeni.

Numeričko modeliranje razmatrane problematike korištenjem programskog paketa Mentor Graphics MagNet verzije 7.7 daje rezultate vrlo usporedive s mjerenjima. Važnost toga leži u činjenici da je moguće proračunati i procijeniti mnoge bitne parametre, kao što su parametri tereta i korekcijskog sklopa, naponska i kutna pogreška na pojedinom namotu, u ranim fazama dizajna i proizvodnje transformatora te na taj način ne samo dobiti relevantne analize već i smanjiti probleme i varijacije tokom izrade samih transformatora i korekcijskog sklopa. Dodatno, numerički model uzima u obzir geometriju i utjecaj otvorene magnetske jezgre.

Zahvaljujući zadovoljavajućim rezultatima dobivenim numeričkim izračunom u daljnjem istraživanju će se prethodno moći odrediti parametri korekcijskog sklopa, za koje se dobivaju najbolji rezultati za klasu točnosti, te nakon toga krenuti u njegovu izradu i ispitivanja, kako bi se smanjio broj iteracija ispitivanja. Točna optimizacija parametara korekcijskog sklopa s ciljem postizanja što bolje klase točnosti predmet je daljnjeg istraživanja, jer ovisi o nazivnoj snazi i naponskom nivou transformatora. Ipak zahvaljujući ovom istraživanju moguće je već sada u fazi nuđenja dati smjernice krajnjem korisniku što je izvedivo u pogledu sinergije naponskih transformatora velike snage i naponskih mjernih transformatora.

Budući da za ovakav tip transformatora ne postoji standard koji definira točke ispitivanja, u radu su dane preporuke prema kojima je potrebno provoditi ispitivanja.

Iz navedenog se može zaključiti kako je napravljen značajan iskorak u poboljšanju i proširenju performansi naponskih transformatora velike snage.

9. Literatura

[1] I.Žiger, D.Krajtner, Z.Ubrekić, M.Brkić, Design of the Open- Core Power Voltage Transformer, International Colloquium Transformer Research and Asset Management, Dubrovnik, Croatia, 2012.

[2] I.Žiger, Proračun rasipnog induktiviteta transformatora tipa VPT – Seminar iz predmeta :Transformatori –Teorija i primjena, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2011.

[3] M. Poljak, B. Bojanić, Dilema – Induktivni ili kapacitivni naponski transformatori, 6. Savjetovanje HK Cigre, Cavtat, 2003.

[4] IEC 61869-3:2009, Instrument Transformers- Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers, International Electrotechnical Commission, July 2011.

[5] IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers, IEEE Std C57.13-2016, Jun. 2016.

[6] V. Bego, Mjerni transformatori, Zagreb, Školska Knjiga, 1977, pp. 3-27.

[7] IEC/IEEE 63253-5713-8 Station Service Voltage Transformers (SSVT)

[8] I.Žiger, D.Papić, M.Čukman, Accuracy Performance of Power Voltage Transformers, Medpower 2018, Dubrovnik, 12.-15. studenoga 2018

[9] H.Nagaoka, "The inductance coefficients of Solenoids", Journal of the College of Science, Imperial University, Tokyo, Japan, 1909

Sažetak**Korekcija pogreške mjerenja naponskih transformatora velike snage**

Ovaj rad se bavi specifičnom problematikom naponskih transformatora velike snage s otvorenim jezgrom.

Korištenjem suvremenih metoda i njihovom eksperimentalnom verifikacijom ideja je nadograditi postojeći dizajn naponskih transformatora velike snage, točnije ugraditi dodatni sklop za potrebe zadovoljavanja klasa točnosti prema IEC 61869 ili IEEE C57.13. standardu.

Kako bi se navedeno moglo ostvariti, nužno je ustanoviti s kojim elementima se može utjecati na naponsku i kutnu pogrešku. U radu je opisana primjena sklopa za korekciju kutne pogreške, koji je izveden pomoću međutransformatora i zračne prigušnice. Uspješnost pristupa popraćena je proračunom u programskom paketu Mentor Graphics MagNet te verifikacijom tijekom laboratorijskih ispitivanja na stvarnom naponskom transformatoru velike snage. Pritom se analizira i određuje utjecaj raznih parametara koji su relevantni za navedeno korekcijsko rješenje, kako bi se dobio temeljit pregled predložene tematike.

Ključne riječi: naponski transformator velike snage, klasa točnosti

Summary

Power voltage transformers accuracy error correction

This paper deals with the specific issue of power voltage transformers with open core.

Using modern methods and their experimental verification, the idea is to upgrade the existing design of the power voltage transformer, more precisely the integration of an additional device in order to meet the accuracy classes according to IEC 61869 or IEEE C57.13.3 standard.

In order to achieve this, it is necessary to establish which parameters influence the voltage and angular error. This thesis describes the usage of the device for the angular error correction, that is derived of an current transformer and air inductance. Efficiency of the approach is followed by the calculation in the software package Mentor Graphics MagNet and verification of the methods by laboratory tests on a real power voltage transformer. In doing so, the impact of various parameters that are relevant to the above correction solutions is analyzed and determined, in order to obtain a thorough overview of the proposed topic.

Keywords: power voltage transformers, accuracy class

Životopis

Dijana Papić je rođena 22. siječnja 1987. godine u Tuzli, BiH. Osnovnu školu završila je u Zagrebu, a 2001. godine nastavila je obrazovanje u IV. gimnaziji u Zagrebu gdje je 2005. godine maturirala. Iste godine upisala je preddiplomski studij na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, te je u srpnju 2008. godine stekla titulu sveučilišnog prvostupnika inženjera elektrotehnike i informacijske tehnologije završivši modul Automatiku. Po završetku preddiplomskog studija, upisala je diplomski studij na istom fakultetu, odabravši studijski program Elektrotehniku i informacijsku tehnologiju, profil Automatiku. U srpnju 2010. godine je diplomirala stekavši titulu magistra inženjera elektrotehnike i informacijske tehnologije. 2019. godine upisala je postdiplomski specijalistički studij „Transformatori“.

U kolovozu 2010. godine zapošljava se u INA d.d. kao specijalist za informatičke sustave. Sudjeluje u provedbi funkcionalne informatičke strategije INA grupe, te vodi i samostalno obavlja poslove u okviru projekata informacijskih sustava. Provodi stručne i troškovno učinkovite implementacije informatičkog tehnološkog rješenja dizajniranog da zadovolji poslovne zahtjeve, te zahtjeve za potrebe učinkovitijeg poslovnog procesa.

U kolovozu 2016. godine zaposlena je u tvornici Končar-Mjerni transformatori u Projektnom uredu na radnom mjestu projektant transformatora. Kao projektant radi primarno naponske transformatore tipa VPU i naponske transformatore velike snage tipa VPT.

Biography

Dijana Papić was born in Tuzla, Bosnia and Herzegovina on 22nd January 1987. She finished elementary school in Zagreb and in 2001 she has continued education in IVth Gymnasium in Zagreb where she graduated in 2005. In the same year she has started Bachelor Programme at Faculty of Electrical Engineering and Computing which she finished in July of 2008 while acquiring title of Bachelor of Science in Electrical Engineering and Information Technology. After completion of Bachelor Programme, she enrolled Master Programme on the same faculty while choosing study program Electrical Engineering and Information Technology, profile Automation. In 2010 she graduated and acquired the title of Master of Science in Electrical Engineering and Information Technology. In 2019 she started Specialits study „Transformers“.

In August 2010, she joined INA d.d. as a specialist in IT systems. She anticipates in the implementation of IT strategy in INA Group, and manages and independently performs tasks within IT projects. Implements professional and cost-effective implementations of information technology solutions designed to meet business requirements and requirements for more efficient business processes.

Since August 2016, she has been employed at the Končar-Instrument transformers Inc. in the project department as an electrical design engineer. As a designer, she works mostly on VPU type voltage transformers and VPT type power voltage transformers.