

Dizajn induktivnog naponskog transformatora s obzirom na zahtjeve za sigurnost od eksplozije

Gazivoda, Dora

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:168:850338>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-19**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Dora Gazivoda

**DIZAJN INDUKTIVNOG NAPONSKOG
TRANSFORMATORA S OBZIROM NA
ZAHTJEVE ZA SIGURNOST OD EKSPLOZIJE**

SPECIJALISTIČKI RAD

Zagreb, 2022.

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING

Dora Gazivoda

**DESIGN OF INDUCTIVE VOLTAGE
TRANSFORMER CONCERNING EXPLOSION
SAFETY REQUIREMENTS**

SPECIALIST THESIS

Zagreb, 2022.

Mentor: doc.dr.sc. Tomislav Župan

Specijalistički rad: 66 stranica

Specijalistički rad br.:

Povjerenstvo za ocjenu u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Bojan Trkulja – predsjednik
2. Nasl. izv. prof. dr. sc. Tomislav Župan,
KONČAR – Institut za elektrotehniku 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. Tomislav Župan,
KONČAR – Institut za elektrotehniku d. o. o. - mentor
3. Prof. dr. sc. Željko Štih – član

Datum obrane: 7. lipnja 2022.

Sadržaj

1.	Uvod	1
2.	Zahtjevi za sigurnost od eksplozije u pogonu	3
2.1.	Tehnička brošura CIGRE 512	3
2.2.	Međunarodni standardi	4
3.	Induktivni naponski transformatori.....	9
3.1.	Induktivni naponski transformatori s otvorenom jezgrom.....	9
3.2.	Naponski transformator velike snage tipa VPT	11
3.3.	Kvarovi u sekcioniranom aktivnom dijelu	12
4.	Prijedlog sekvence i kriterija ispitivanja	15
5.	Numerički model prikladan za proračun promatranog tipa kvara.....	18
5.1.	Proračun stope porasta energije kvara i određivanje kritičnog mjesta kvara.....	20
5.2.	Specifičnosti vezane uz modeliranje naponskog transformatora velike snage.....	21
5.3.	Utjecaj kvara na raspodjelu napona	27
6.	Eksperimentalna verifikacija kritičnog mjesta kvara	31
6.1.	Opis mjerenja	31
6.2.	Analiza rezultata na naponskim transformatorima	33
6.3.	Mjerenja na naponskim transformatorima velike snage	34
7.	Ispitivanje transformatora na unutarnji kvar	40
7.1.	Priprema ispitivanja	40
7.2.	Tijek ispitivanja na prototipu transformatora.....	43
7.3.	Rezultati ispitivanja	44
7.4.	Defektaža transformatora	48
8.	Načini minimiziranja pojavnosti eksplozije u pogonu	54
8.1.	Dizajn aktivnog dijela i kućišta.....	54
8.2.	Monitoring transformatora i tlačna sklopka.....	55
9.	Zaključak	59
10.	Literatura	61

Popis tablica

Tablica 1. Kvarovi s požarom i eksplozijom za svaki tip mjernih transformatora	4
Tablica 2. Usporedba kriterija različitih standarda za ispitivanje na unutarnji kvar	6
Tablica 3. Rezultati proračuna kvara FEM analizom za transformator VPU-145	20
Tablica 4. Rezultati FEM analize maksimalne energije kvara na cjelokupnom asortimanu transformatora tipa VPU	21
Tablica 5. Rezultati proračuna kvara po svitku za transformator VPT-245	23
Tablica 6. Tereti odabrani za proračun	24
Tablica 7. Prosječno i maksimalno odstupanje promatranih parametara	34
Tablica 8. Prosječno i maksimalno odstupanje promatranih parametara za VPT-245	39
Tablica 9. Pripremna ispitivanja	41
Tablica 10. Vremenski slijed ispitivanja	44
Tablica 11. Usporedba točnosti mjernog transformatora i mjerene struje kvara prije i poslije ispitivanja na unutarnji kvar	49

Popis slika

Slika 1. Položaj mjernih transformatora u odnosu na drugu visokonaponsku opremu u trafostanici	3
Slika 2. Uzrok kvara za kvarove s požarom i eksplozijom za različite tipove transformatora	4
Slika 3. Usporedba ekvivalentnih struja unutarnjeg luka prema standardima	6
Slika 4. Presjek induktivnog naponskog transformatora s otvorenom jezgrom	10
Slika 5. Pojednostavljeni prikaz aktivnog dijela	10
Slika 6. Presjek naponskog transformatora velike snage s otvorenom jezgrom	11
Slika 7. Mogući načini kvara mjernih transformatora sa sekcioniranim aktivnim dijelom (a) Kvar nastao u glavnoj izolaciji (b) Kvar nastao u primarnom namotu	12
Slika 8. Napon po sekciji za gubitak zadanog broja sekcija aktivnog dijela (a) VPU-145 s 11 sekcija (b) VPT-245 s 34 sekcije	14
Slika 9. Prijedlog sekvence ispitivanja na unutarnji kvar kod transformatora sa sekcioniranim aktivnim dijelom	15
Slika 10. (a) Natpisna pločica (b) Fotografija promatranog transformatora	19
Slika 11. (a) 3D model aktivnog dijela (b) Primarni strujni krug korišten u numeričkim proračunima	19
Slika 12. (a) Natpisna pločica VPT transformatora (b) Fotografija promatranog transformatora	22
Slika 13. (a) 3D model aktivnog dijela VPT-a (b) Primarni krug za numerički proračun	22
Slika 14. Ovisnost maksimalne stope porasta energije kvara o faktoru snage tereta	25
Slika 15. Ovisnost maksimalne stope porasta energije kvara o iznosu tereta	25
Slika 16. Struja kroz svitke primarnog namota, pri čemu je kratko spojen svitak broj 9	26
Slika 17. Usporedba raspodjele napona na primarnom namotu induktivnog naponskog transformatora	28
Slika 18. Usporedba raspodjele napona na primarnom namotu naponskog transformatora velike snage	29
Slika 19. (a) Shematski prikaz mjernog kruga ispitivanja kratko spojenih svitaka (b) Fotografija mjernog kruga u laboratoriju	32
Slika 20. Usporedba mjerenih i izračunatih vrijednosti (a) omjera I_{FP}/I_{RP} (b) omjera I_{CP}/I_{RP}	33
Slika 21. Usporedba mjerenih i izračunatih vrijednosti stope porasta energije E_{RP}	34
Slika 22. (a) Shematski prikaz mjernog kruga ispitivanja s promjenjivim teretom (b) Fotografija mjernog kruga u laboratoriju	35
Slika 23. Usporedba mjerenih i računatih struja u slučaju neopterećenog transformatora (a) I_{FP} (b) I_{CP} (c) E_{FP}	36
Slika 24. Usporedba mjerenih i računatih struja kod tereta 167 kVA $\cos \varphi = 0,8$ (a) I_{FP}	37
Slika 25. Usporedba mjerenih i računatih struja kod tereta 167 kVA $\cos \varphi = 1,0$ (a) I_{FP}	38
Slika 26. Aktivni dio transformatora s kratko spojenim 5. svitkom	42
Slika 27. Mjerni krug za ispitivanje na unutarnji kvar	43
Slika 28. Fotografija mjernog kruga	43

Slika 29. Položaj membrane: lijevo - početni, desno - maksimalni	45
Slika 30. Oscilogram u trenutku 2:03 minute od početka (a) primarni napon (b) struja I_{FP}	45
Slika 31. Stanje ispitnog objekta (a) na početku ispitivanja (b) nakon završetka ispitivanja.....	46
Slika 32. Porast tlaka tijekom ispitivanja	47
Slika 33. Usporedba mjerenih vrijednosti prije i poslije ispitivanja na unutarnji kvar: (a) kapaciteta sekcija glavne izolacije, (b) faktora dielektričkih gubitaka sekcija glavne izolacije, (c) otpora pojedine sekcije	49
Slika 34. Aktivni dio transformatora nakon ispitivanja	50
Slika 35. Detaljan pregled izolacijskog cilindra	52
Slika 36. Usporedba oštećenja na petom svitku sa zdravim četvrtim i šestim svitkom	52
Slika 37. Tlačna sklopka (a) model (b) fotografija	57

1. Uvod

Sigurnost pogona visokonaponske opreme predstavlja jedno od njezinih najvažnijih svojstava te je unazad nekoliko godina postala jedan od glavnih fokusa u transformatorskoj industriji. Razlog tome su kvarovi koji mogu imati značajne posljedice na preostalu opremu u svojoj okolini ili, u ekstremnim slučajevima, na osoblje u trafostanici. Najgori kvarovi kod mjernih transformatora su oni koji za posljedicu imaju požar i eksploziju, što je ujedno i poseban tip kvara prema definiciji tehničke brošure CIGRE 512 [1]. Prema tom dokumentu, takvi kvarovi čine otprilike 3 % svih kvarova zabilježenih kod mjernih transformatora, a čak 80 % njih potječe iz unutarnjih dielektričnih svojstava, a ponajviše iz glavne izolacije (otprilike 70 %).

U pokušaju poboljšanja performansi u slučajevima koji bi mogli dovesti do katastrofalnih kvarova, ispitivanje otpornosti na unutarnji luk uvedeno je u relevantne međunarodne standarde mjernih transformatora [2] i [3]. Ovo je ispitivanje i dalje jedno od kontroverznijih u industriji mjernih transformatora, a zahtjevi i kriteriji ispitivanja predmet su trajnih rasprava i poboljšanja. Glavna pretpostavka ispitivanja je da je kvar visokoenergetski, ispitujući tako samo izdržljivost kućišta i mogućnost rasterećenja tlaka. Ova vrsta ispitivanja prikladna je samo za unutarnje kvarove nastale unutar kućišta mjernog transformatora dok kvar u predjelu visokonaponskog izolatora ostaje neprovjeren. Nadalje, glavni uzročnici požara i eksplozija (starenje, manjkavosti u kontroli kvalitete i greške pri projektiranju) ovim se ispitivanjem uopće ne provjeravaju [1] i [5].

Konstrukcije mjernih transformatora koje su posebno dizajnirane da ograniče energiju unutarnjih kvarova predstavljene su u [5], [6] i [7]. Takav dizajn, koji se temelji na sekcioniranom aktivnom dijelu transformatora, istovremeno usporava širenje kvara i smanjuje učinke eskalacije kvara. Kvar u sekcioniranom aktivnom dijelu ograničen je samo na sekciju u kojoj je nastao, a ostatak aktivnog dijela ostaje zdrav i neoštećen, te onemogućava direktan kvar prema zemlji.

Za takve izvedbe ispitivanje unutarnjih kvarova prema zahtjevima navedenim u [2] i [3] nije primjenjivo zbog toga što ne odražava realne pogonske scenarije u kojima se mjerni transformatori sa sekcioniranim aktivnim dijelom mogu naći, a ujedno podrazumijeva generiranje i održavanje unutarnjeg luka nerealno visoke

energije, za koju transformator nije i ne mora biti dimenzioniran. Iako je ova činjenica prepoznata u međunarodnim standardima [3] i [4], stvarna metoda ispitivanja kako dokazati ponašanje takvih jedinica u slučaju unutarnjeg kvara još uvijek nije definirana i predmet je dogovora između proizvođača i korisnika.

Ovaj rad bavi se dizajnom aktivnog dijela induktivnog naponskog transformatora s obzirom na zahtjeve za sigurnost od eksplozije. Tvrtka Končar – Mjerni transformatori d.d. ima dugogodišnju tradiciju proizvodnje induktivnih naponskih, kombiniranih i transformatora velike snage sa sekcioniranim aktivnim dijelom, koji za jednu od glavnih uloga ima upravo ograničenje energije koja se oslobađa prilikom kvarova koji mogu uzrokovati eksplozije. Uz detaljan opis dizajna induktivnog naponskog transformatora te transformatora velike snage, kroz rad bit će opisan numerički model za proračun kvarova velike snage kao i način eksperimentalne verifikacije rezultata dobivenih takvim proračunom. Nadalje, rad daje detaljan opis prijedloga ispitivanja otpornosti na unutarnji kvar za transformatore koji svojim dizajnom limitiraju energiju kvara i time ne ulaze u okvire ispitivanja koje propisuju postojeći standardi, [2] i [3].

Naponske transformatore velike snage karakterizira relativno velik priključeni teret u odnosu na ostale tipove mjernih transformatora, stoga je još jedno od pitanja na koje će ovaj rad pokušati dati odgovor utjecaj iznosa i karaktera tereta na ponašanje transformatora u režimu unutarnjeg kvara.

S obzirom na to da je kod sekcioniranog aktivnog dijela kvar ograničen samo na pojedinu sekciju, ne dolazi do naglog razvoja plinova i porasta tlaka što omogućava praćenje stanja transformatora. Jednostavan i robustan sustav monitoringa u vidu tlačne sklopke omogućava praćenje porasta tlaka u transformatoru te pravovremenu detekciju i isključenje mjernog transformatora u kvaru iz pogona. Tlačna sklopka i njezina primjena bit će opisane na samom kraju rada.

2. Zahtjevi za sigurnost od eksplozije u pogonu

Kao što je spomenuto u uvodu, pogonska sigurnost visoko je na listi traženih karakteristika kod visokonaponske opreme pa tako i mjernih transformatora. Glavni pokretač iza toga je činjenica da katastrofalni kvar opreme koja je u svojoj naravi veoma pouzdana može imati značajne posljedice na opremu trafostanice koja je okružuje ili, u ekstremnim slučajevima, na osoblje u trafostanici. Pridoda li se tome činjenica da je oprema u trafostanici veoma skupa i da njezino potencijalno isključenje zbog popravka ili zamjene može značiti velike troškove i gubitke, ne čudi da je tema pogonske sigurnosti vrlo aktualna posljednjih godina.



Slika 1. Položaj mjernih transformatora u odnosu na drugu visokonaponsku opremu u trafostanici

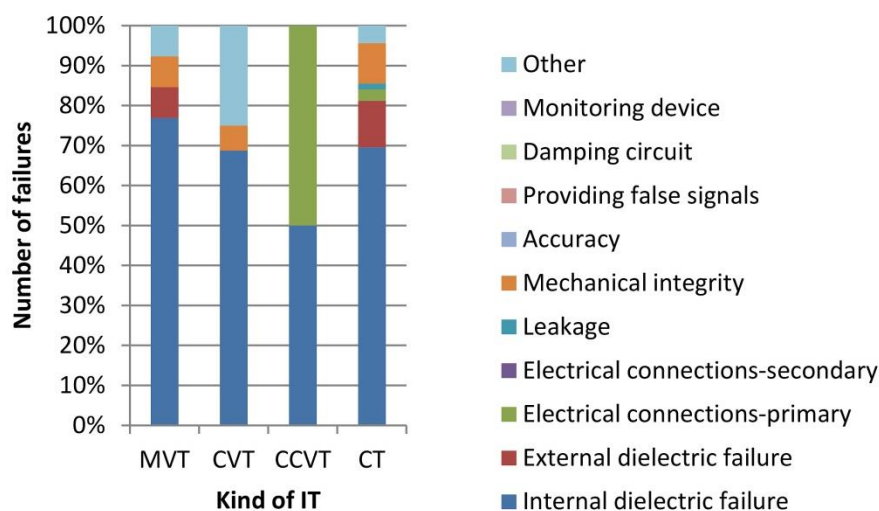
2.1. Tehnička brošura CIGRE 512

Tehnička brošura CIGRE 512 iz 2012. godine najnoviji je dostupan izvor relevantnih podataka o kvarovima tijekom rada mjernih transformatora [1]. Istraživanje je provedeno nad populacijom od 322500 jednofaznih mjernih transformatora s pogonskim iskustvom od 1290335 transformator-godina. Ukupno je obrađeno 3179 kvarova. Dokument definira veliki kvar kao kvar koji zaustavlja jednu ili više temeljnih funkcija uređaja. Podskup velikih kvarova čine kvarovi koji su rezultirali požarom i eksplozijom, a oni su prikazani u tablici 1.

Tablica 1. Kvarovi s požarom i eksplozijom za svaki tip mjernih transformatora

Naponski nivo	Tip mjernih transformatora			
	Induktivni naponski transformatori	Kombinirani transformatori	Kapacitivni naponski transformatori	Strujni transformatori
$60 \leq U \leq 100$ kV	0	0	0	2
$100 \leq U \leq 200$ kV	8	4	2	32
$200 \leq U \leq 300$ kV	1	4	1	25
$300 \leq U \leq 500$ kV	3	7	1	9
$500 \leq U \leq 700$ kV	0	0	0	0
$U \geq 700$ kV	0	0	0	1
Ukupno	12	15	4	69

Iz tablice je vidljivo da su mjerni transformatori vrlo pouzdana visokonaponska oprema. Međutim, veliki kvar takve opreme utječe na okolne objekte i može imati značajna oštećenja i posljedice. Brošura u istraživanju kvarova pronalazi da 80 % takvih kvarova proizlazi iz unutarnjih dielektričkih kvarova, a čak 70 % potječe iz glavne izolacije, slika 2. 65 % njih je zbog starenja izolacije, a 12 % zbog greške u projektiranju ili proizvodnji [1].



Slika 2. Uzrok kvara za kvarove s požarom i eksplozijom za različite tipove transformatora

2.2. Međunarodni standardi

U pokušaju da se poboljšaju performanse u slučajevima koji bi mogli dovesti do katastrofalnih kvarova, tijekom 2000-tih uvedeno je ispitivanje unutarnjeg luka u relevantne međunarodne standarde za mjerne transformatore [2], [3]. Prema [4],

zahtjevi prisutni u sadašnjim standardima temelje se na iskustvu akumuliranom od strane Électricité de France (EDF) koji je provodio interna ispitivanja luka na strujnim transformatorima od 1987. godine i na drugim tipovima od 1993. Ti zaključci usavršavali su se kroz nekoliko godina uz kontinuirani rad radnih grupa te su naposljetku uvršteni u važeće IEC i IEEE standarde za mjerne transformatore.

Od samih početaka rasprava o ispitivanjima unutarnjeg luka, definicija samog ispitivanja je poprilično kontroverzna. Među prigovorima na nju navode se neadekvatni zahtjevi struja kvara, neprilagođeno trajanje ispitivanja koje dovodi do nerealne energije kvara koju transformator mora izdržati te, potencijalno najkontroverzniji, odabir mjesta kvara koji je nerijetko ili pristran za određene konstrukcije mjernih transformatora ili ne predstavlja mjesto na kojem je najizglednije da će doći do kvara tijekom pogona transformatora [4]. Zahtjevi za struju kvara koji vrijede danas temelje se na iznosima struja kratkog spoja cijele mreže, koje jesu relevantne za termičko dimenzioniranje opreme, ali ne koreliraju nužno sa strujama kvara zabilježenima na stvarnim transformatorima. Upravo zbog toga, kako bi uspješno prošli ispitivanje, mjerni transformatori moraju biti značajno predimenzionirani. Ovo je činjenica koju priznaju i literatura i važeći standardi, [2] i [4]. Štoviše, iskustva iz pogona i istraživanja kvarova s unutarnjim lukom pokazuju niže razine struje luka od onih koje definira standard, kao i rijetku pojavu potpune asimetrije kod luka (faktor asimetrije je ispod 2,5), [7]. U nadolazećim revizijama obaju relevantnih standarda adresirat će se ovo pitanje uvođenjem struje otporne na luk u IEEE standard, koja se temelji na struji kvara faze prema zemlji definiranoj u IEC standardu.

Za bolje razumijevanje problematike ispitivanja na unutarnji kvar, potrebno je detaljnije usporediti zahtjeve koje definiraju navedeni standardi, [2], [3] i [4]. Iako standardi na sličan način definiraju ispitivanje na unutarnji kvar te je zbog toga nepotrebno ponavljati ispitivanje ako je napravljeno prema samo jednom od standarda, ipak među njima postoje manje razlike. Važeći IEC [2] definira dva režima odnosno kriterija za podnošenje unutarnjeg kvara mjernog transformatora. U oba režima podrazumijeva se da dolazi do kontroliranog otpuštanja tlaka, a razlikuju se u posljedicama ispitivanja koje dopuštaju:

- Klasa I. – Tijekom i neposredno nakon ispitivanja svi dijelovi i komponente transformatora moraju se zadržati unutar zadanog prostora

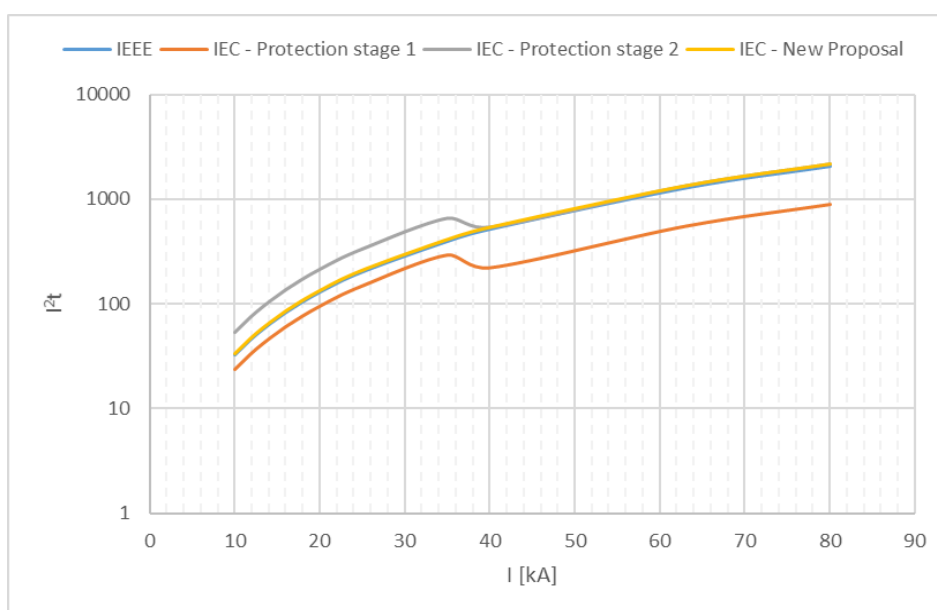
oko transformatora. Radijus tog prostora iznosi jednu širinu najšireg dijela transformatora uvećanu za dvije visine transformatora. U ovoj klasi dozvoljena su oštećenja kućišta i vatra.

- Klasa II. – Tijekom i neposredno nakon ispitivanja smije doći do oštećenja samo dijela koji je zadužen za kontrolirano otpuštanje tlaka (odtlačnik, membrana i slično). Svi ostali dijelovi transformatora moraju biti neoštećeni, a vatra je dozvoljena.

U tablici 2 prikazana je usporedba kriterija IEC standarda (Protection stage 1 i 2), IEEE standarda i buduće revizije IEC standarda. Na slici 3 prikazan je graf usporedbe ekvivalentnih struja unutarnjeg luka prema istim standardima. IEC/IEEE standard za naponske transformatore velike snage, [4], definiciju unutarnjeg kvara i njegovog ispitivanja preuzima iz IEEE standarda.

Tablica 2. Usporedba kriterija različitih standarda za ispitivanje na unutarnji kvar

Standard	Struja [kA]	Trajanje [s]	Faktor asimetrije
<i>IEC 61869-1</i>	< 40	0,2	
<i>Protection stage 1</i>	≥ 40	0,1	1,7
<i>IEC 61869-1</i>	< 40	0,5	
<i>Protection stage 2</i>	≥ 40	0,3	1,7
<i>IEEE C57.13.5 2019</i>	Zadana struja luka	0,2	2,7
<i>Revizija IEC 61869-1 standarda</i>	60 % struje kvara mreže	0,3	1,7



Slika 3. Usporedba ekvivalentnih struja unutarnjeg luka prema standardima

Najvažnija razlika je u trajanju samog ispitivanja; u važećem IEC standardu trajanje ovisi o struji pri unutarnjem luku, a IEEE ne radi razliku i ispitivanje u svim slučajevima traje 0,2 sekunde. Novi IEC standard neće razlikovati kriterije za ispitivanje na unutarnji kvar kao ni iznose struje pri ispitivanju pa je prijedlog trajanja ispitivanja 0,3 sekunde za struju luka koja iznosi 60 % struje kvara mreže. Ovdje je bitno napomenuti da literatura prepoznaje razliku između struje pri unutarnjem luku i struje kvara mreže, gdje je prva u praksi značajno niža od druge, a to prati i novi prijedlog IEC standarda, [11], [17].

Mjesto nastanka kvara je potencijalno najosjetljiviji dio za raspravu. Oba standarda trenutno definiraju lokaciju kvara kao mjesto gdje je dielektričko naprezanje najveće. Kod papirno-uljnih mjernih transformatora to mjesto su rubovi kapacitivnih ekrana unutar izolatora (a ne unutar kućišta), [4]. Inicijacija luka na tom mjestu prema važećim iznosima struje i trajanja značila bi rasprsnuće izolatora. Kako bi se to izbjeglo, neki proizvođači namjerno povećavaju dielektričko naprezanje u dijelovima transformatora povoljnijim za otpuštanje tlaka, što ne pokazuje stvarno stanje u pogonu. Dakle, osim što samom definicijom isključuje određena mjesta nastanka kvara, važeće ispitivanje na unutarnji kvar ne uzima u obzir niti kvarove koji nastaju unutar kućišta, ali daleko od mjesta dizajniranog za otpuštanje tlaka. Predložena redefinicija u novim izdanjima oba transformatora mjesto kvara definira kao mjesto s najvećim rizikom za nastanak kvara, pri čemu taj rizik procjenjuje proizvođač na temelju vlastitoga dizajna i iskustva.

Posljednja problematika s definicijom kvara s unutarnjim lukom je ta što je taj kvar definiran na način da podrazumijeva kvar velike energije, što znači da je ispitivanje prilagođeno tako da garantira određenu razinu sigurnosti kod takvog kvara. Zapravo, to onda znači da je ispitivanje definirano tako da ispituje isključivo transformatorsko kućište i njegove uređaje za rasterećenje tlaka, ali ne i dizajn izolacijskog sustava transformatora. Takvo ispitivanje prilagođeno je za dizajn plinom izoliranih mjernih transformatora, ali za papirno-uljne transformatore potrebno je uzeti i te faktore u obzir jer je kod njih razvoj velikih kvarova sporiji događaj. Dodatno, ispitivanje uopće ne provjerava glavne uzroke koji dovode do kvarova koji uzrokuju požar i eksplozije, a koji se navode u [1]: starenje, kontrolu kvalitete i greške u projektiranju.

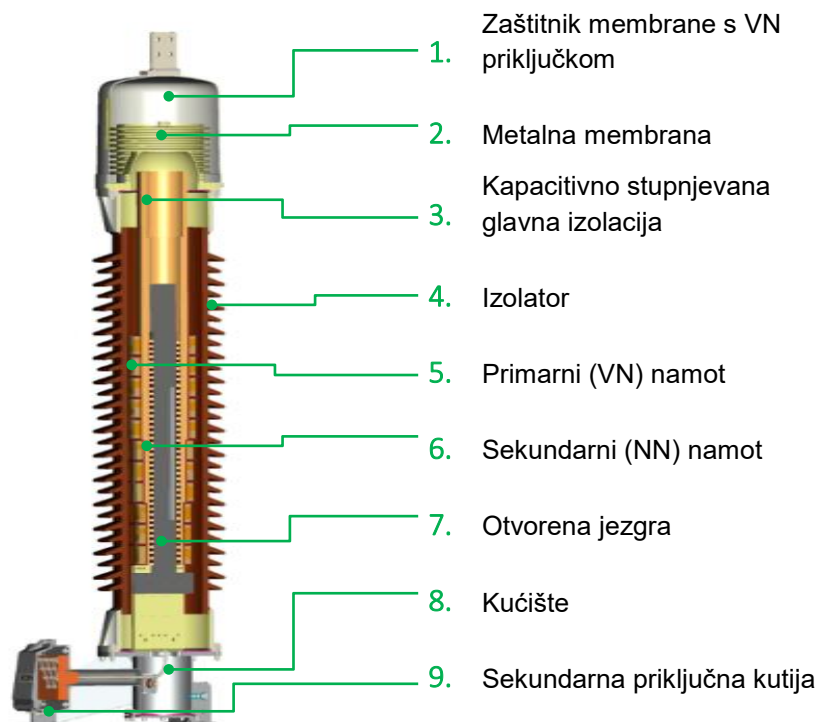
Rješenje ovih problema uvrstiti je u postojeće standarde činjenicu da postoje transformatori koji svojim dizajnom ograničavaju mogućnost nastanka, usporavaju propagaciju te limitiraju energiju kvarova koji mogu dovesti do požara i eksplozije. Upravo ovaj rad ima zadatak objediniti dosadašnje rezultate kontinuiranog rada na temi kvarova s unutarnjim lukovima te na razvoju i specifikaciji adekvatne sekvence ispitivanja (rutinskog, tipskog i specijalnog) koja bi verificirala pogonsku sigurnost mjernih transformatora dizajniranih specifično za ograničavanje energije unutarnjeg luka.

3. Induktivni naponski transformatori

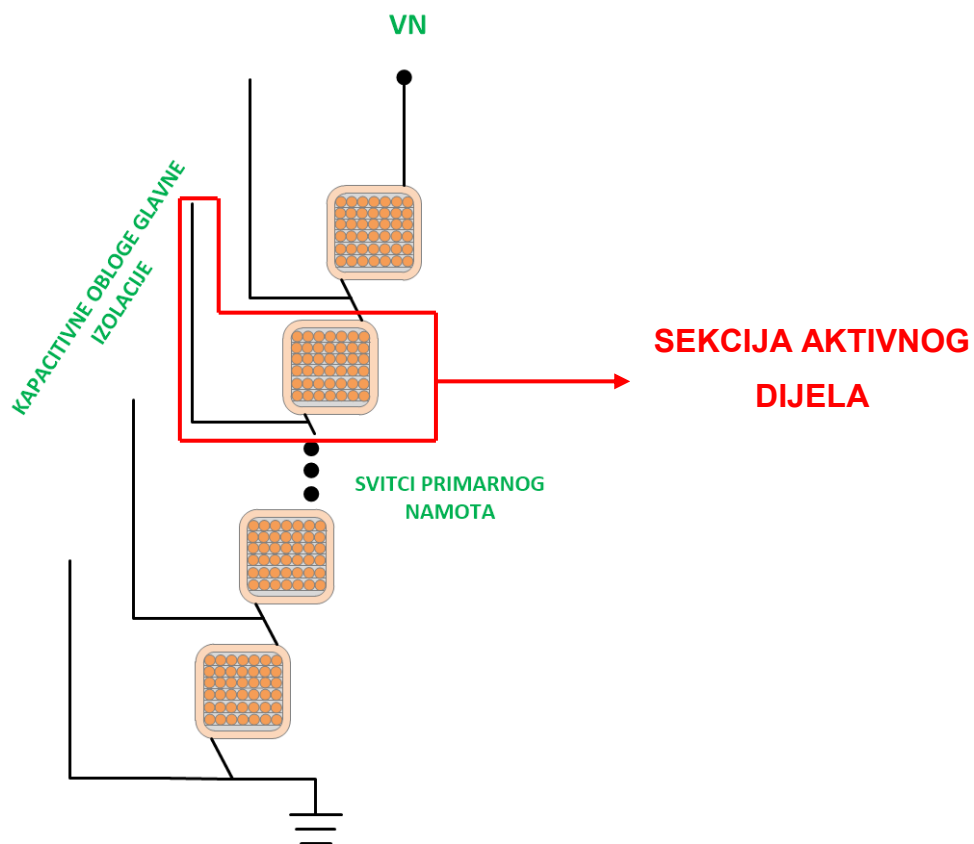
Induktivni naponski transformatori su transformatori koji transformiraju mjerene napone u stalnom omjeru i bez fazne pogreške na vrijednosti koje su prikladne za napajanje mjernih instrumenata, zaštitnih i regulacijskih uređaja, [6]. Postoje dvije izvedbe induktivnih naponskih transformatora – sa zatvorenom i s otvorenom jezgrom. Iako je dizajn sa zatvorenom jezgrom češći u svijetu, tvrtka Končar – Mjerni transformatori d.d. proizvodi induktivne naponske transformatore s otvorenom jezgrom pa će u ovom poglavlju biti detaljnije prikazana konstrukcija takvih transformatora.

3.1. Induktivni naponski transformatori s otvorenom jezgrom

Izoliranje naponskih transformatora za visoke napone znatno se pojednostavljuje ako njihova jezgra nije zatvorena već otvorena, u obliku stupa [6]. Time se postiže da visokonaponski namot nije potrebno izolirati prema jarmu jezgre, kao što je slučaj kod transformatora sa zatvorenom jezgrom. Koncept otvorene jezgre induktivnim naponskim transformatorima omogućava specifičan dizajn aktivnog dijela koji se sastoji od kapacitivno gradirane izolacije i sekcioniranog primarnog namota. Poprečni presjek jednog takvog transformatora prikazan je na slici 4, a pojednostavljeni prikaz njegovog aktivnog dijela na slici 5. Sekundarni namot nalazi se uz jezgru, gotovo cijelom visinom stupa jezgre i praktički je jednako dugačak kao i primarni namot. Izolaciju između primarnog i sekundarnog namota čini cilindar namotan od tankog papira s umetnutim kondenzatorskim oblogama kojima se postiže jednolična raspodjela električnog potencijala u izolaciji. Iz slike je vidljivo da ova izvedba aktivnog dijela podrazumijeva da je svaki svitak primarnog namota izoliran od susjednih svitaka i galvanski povezan s pripadajućom kapacitivnom oblogom glavne izolacije, s kojom čini jednu izoliranu sekciju aktivnog dijela transformatora, [10]. Nekoliko je prednosti takvog, sekcioniranog, aktivnog dijela, od kojih je najvažnija lokalizacija kvarova unutar aktivnog dijela transformatora [8].



Slika 4. Presjek induktivnog naponskog transformatora s otvorenom jezgrom

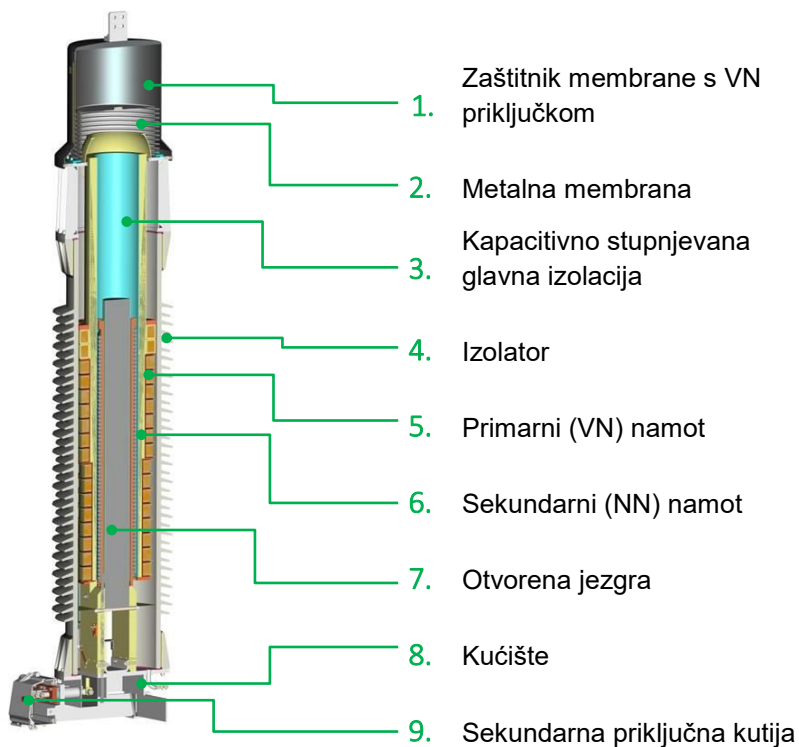


Slika 5. Pojednostavljeni prikaz aktivnog dijela

3.2. Naponski transformator velike snage tipa VPT

Naponski transformator velike snage jednofazna je induktivna jedinica koja služi za direktnu transformaciju i prijenos određene količine energije s visokog (72,5 do 550 kV) na niski napon (< 1 kV) [15]. Njegova primarna namjena je prijenos snage uz transformaciju napona, što je zapravo namjena energetskih (ili distributivnih) transformatora. Međutim, zbog visokog prijenosnog omjera, zahtjeva za izolaciju i funkcije u postrojenju, tehnička rješenja ovih transformatora temelje se na induktivnim naponskim mjernim transformatorima.

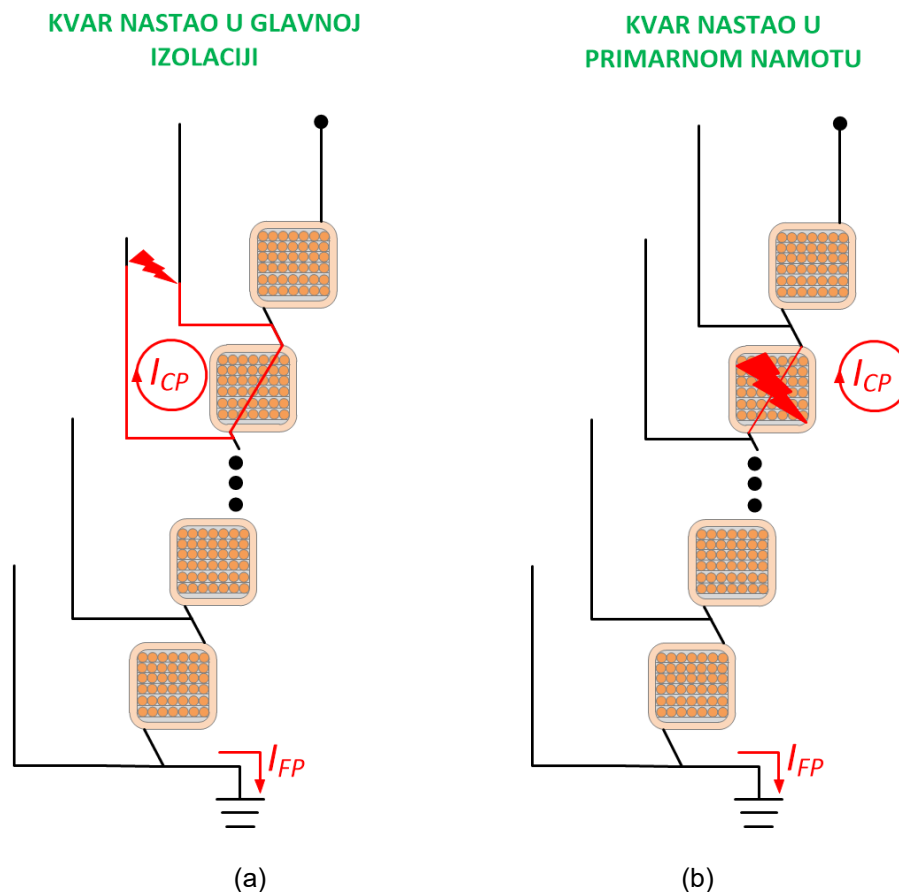
Naponski transformator velike snage koji proizvodi tvornica Končar – Mjerni transformatori d.d. jedinstven je u svijetu jer nasljeđuje dizajn s otvorenom jezgrom induktivnog naponskog transformatora. Slika 6 prikazuje presjek jednog takvog transformatora, gdje se može primijetiti da njegove glavne komponente odgovaraju komponentama induktivnog naponskog transformatora.



Slika 6. Presjek naponskog transformatora velike snage s otvorenom jezgrom

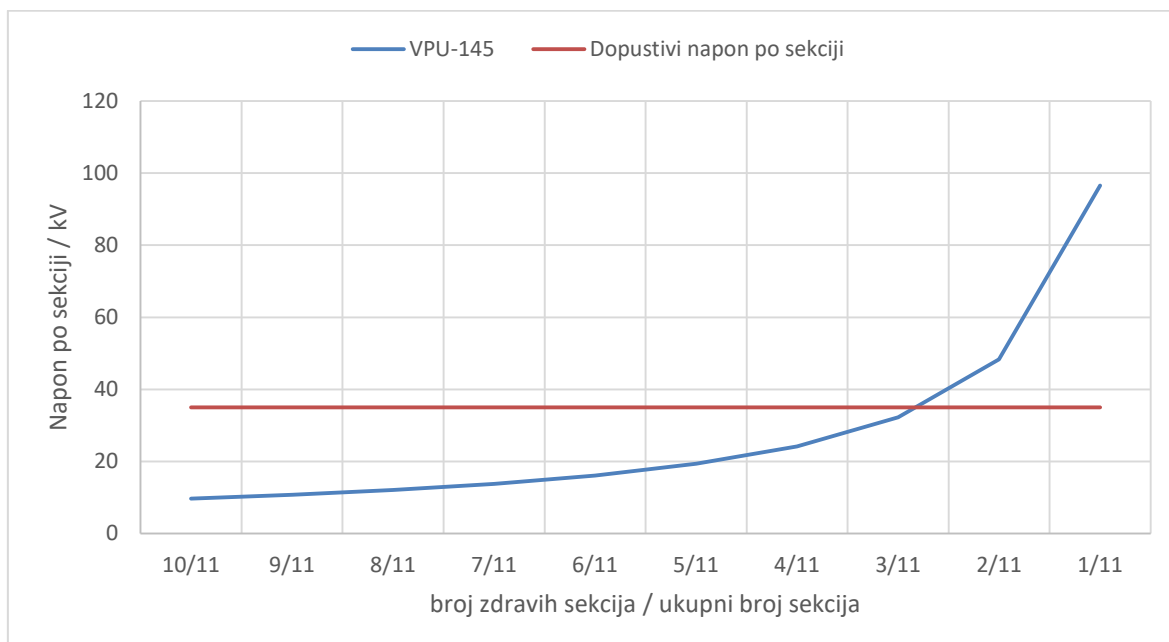
3.3. Kvarovi u sekcioniranom aktivnom dijelu

Postoje dva moguća načina kvara za jedinice sa sekcioniranim aktivnim dijelom; kvar u glavnoj izolaciji ili kvar u primarnom namotu. Oba su konceptualno prikazana na slici 7. Bez obzira na porijeklo kvara, jednom kad se on proširi na cijelu sekciju aktivnog dijela, taj dio postaje kratko spojen i napon napajanja jednoliko se raspoređuje po preostalim svitcima primarnog namota, što sprječava izravan kratki spoj između faze i zemlje i ograničava ukupnu struju kvara. Kao što je vidljivo na slici 7, postoje dvije varijable koje treba uzeti u obzir kad je u pitanju struja kvara. Prva je I_{CP} , struja kratkog spoja kroz sekciju u kratkom spoju, a druga je I_{FP} , ukupna struja kvara kroz ostatak primarnog namota. Struja I_{FP} obično doseže vrijednosti 2-4 puta nazivne struje i postupno toplinski napreže cijeli transformator, a I_{CP} 10-40 puta nazivne struje i uzrokuje lokalno toplinsko preopterećenje, stvaranje plinova te posljedično povećanje volumena ulja [8].

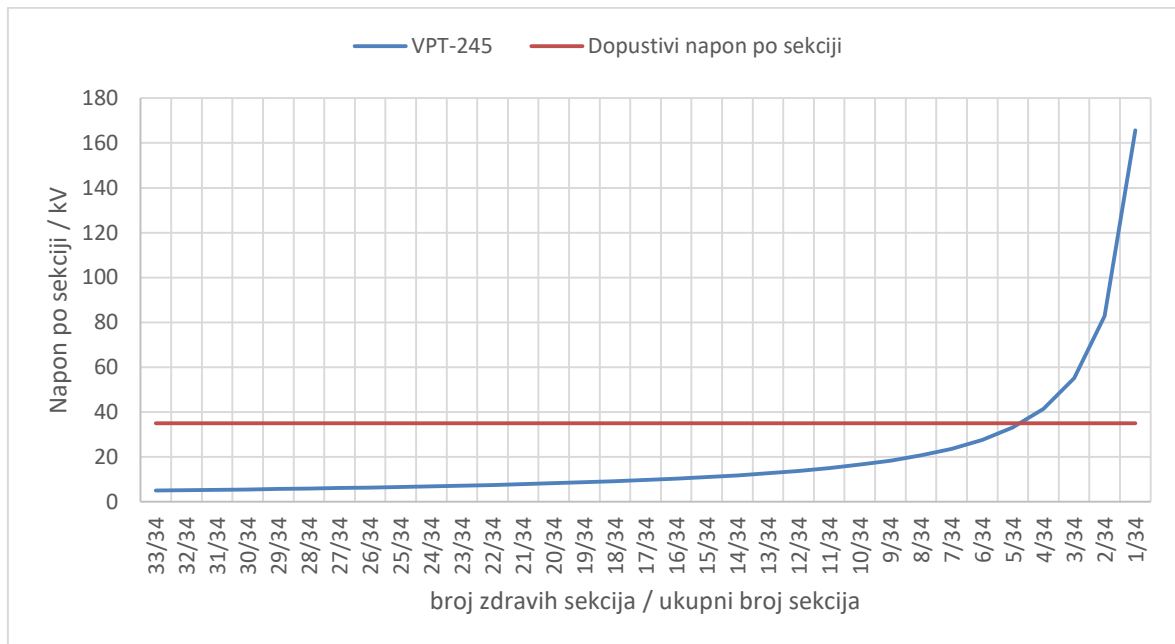


Slika 7. Mogući načini kvara mjernih transformatora sa sekcioniranim aktivnim dijelom
 (a) Kvar nastao u glavnoj izolaciji (b) Kvar nastao u primarnom namotu

Ovisno o ozbiljnosti kvara i ostalim parametrima, vrijeme širenja kvara je različito, ali u svakom slučaju dugotrajno [9], [11]. To je u direktnoj suprotnosti s kvarom nastalim zbog unutarnjeg luka kratkog trajanja i velike energije, kakvog definiraju međunarodni standardi [2], [3]. Izolacija primarnog namota dimenzionirana je tako da može izdržati maksimalni pogonski napon s polovicom sekcija. To znači da se izolacija dimenzionira tako da može podnijeti kvar odnosno kratki spoj polovice nazivnih sekcija pri kojem se ukupni napon raspodjeljuje na ostatak primarnog namota. Takav pristup naziva se $n/2$ kriterij, gdje je n broj sekcija. Ovaj kriterij može se vrlo jednostavno objasniti na primjerima induktivnog naponskog transformatora tipa VPU-145 (slika 8 (a)) i naponskog transformatora velike snage tipa VPT-245 (slika 8 (b)). Iz grafova ovisnosti napona po sekcijama o gubitku zdravih sekcija aktivnog dijela prikazanih na slikama 8 (a) i 8 (b) može se zaključiti da je napon po sekciji manji od dopuštenog za gubitak čak i više od polovice svih sekcija. Jasno je da je onda $n/2$ kriterij zapravo konzervativniji od stvarne izvedbe sekcioniranog aktivnog dijela. Uzevši u obzir iskustvo predstavljeno u [7] i [9] koje pokazuje da vjerojatni kvarovi ostaju lokalizirani na samo jednoj sekciji aktivnog dijela, a da su kvarovi koji obuhvaćaju više od jedne sekcije izuzetno rijetki, navedeni kriterij pruža još i značajniju sigurnosnu marginu.



(a)



(b)

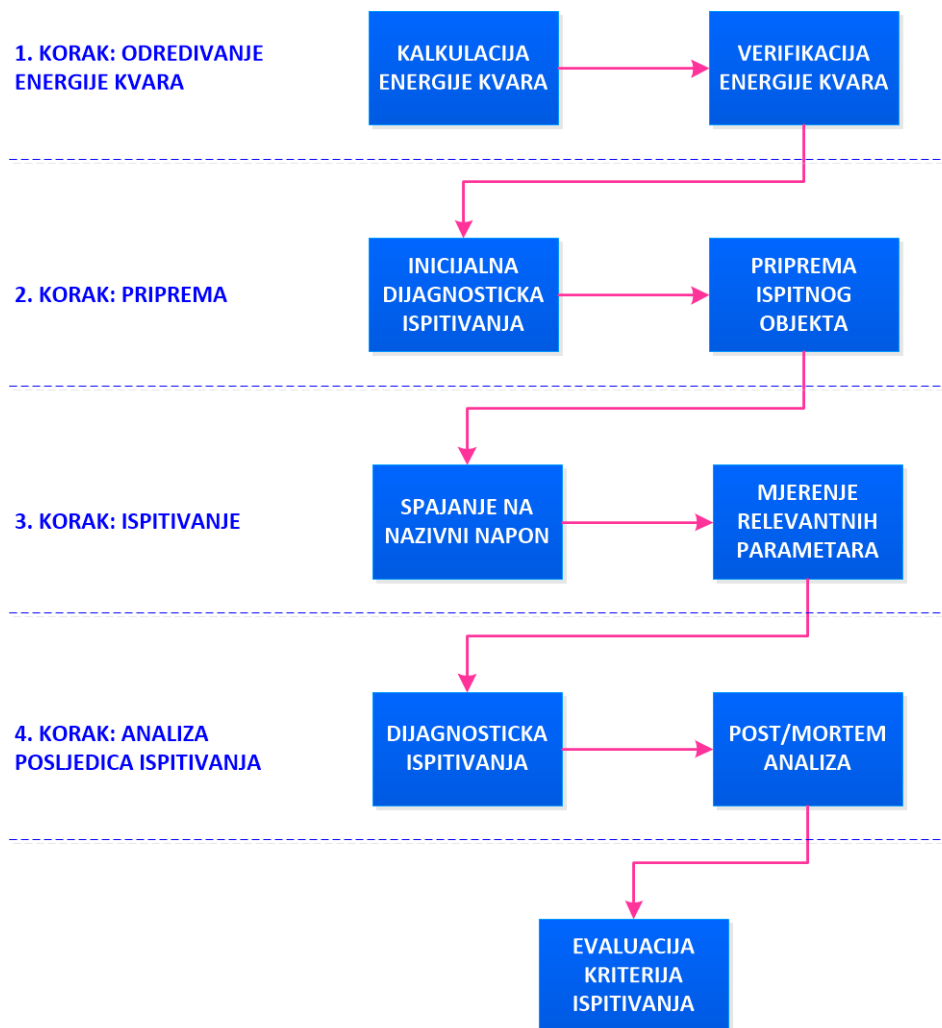
Slika 8. Napon po sekciji za gubitak zadanog broja sekcija aktivnog dijela (a) VPU-145 s 11 sekcija (b) VPT-245 s 34 sekcije

Uzimajući u obzir ova razmatranja, jasno je da sam koncept sekcioniranog aktivnog dijela ograničava unutarnji kvar. Međutim, energija kvara se svejedno generira tijekom njegova trajanja te ju je potrebno sigurno i kontrolirano odvesti. Za tu svrhu ključne su dvije komponente transformatora prikazane na slici 6 u prethodnom potpoglavlju - metalna membrana i zaštitnik membrane. Uloga metalne membrane osigurati je dilataciju ulja u transformatoru tijekom normalnog režima rada i hermetičko brtvljenje cijele jedinice. Kod kvara koji dovodi do stvaranja plina u unutrašnjosti transformatora, membrana će se raširiti i u maksimalnom položaju pritisnuti zaštitnik membrane. U tom trenutku će tlak, koji je do tada bio konstantan, početi rasti i mehanički naprezati zaštitnik. Zaštitnik membrane dimenzioniran je tako da je tlak pri kojem dolazi do njegovog odvajanja od transformatora nekoliko puta niži od dimenzioniranog tlaka pucanja ostalih komponenti transformatora. Budući da se na zaštitniku membrane nalazi primarni priključak, odvajanje zaštitnika automatski znači i prekid napajanja transformatora u kvaru. Materijal membrane mora biti takav da dozvoli deformaciju koja omogućava kontrolirano otpuštanje tlaka bez gubitka mehaničkog integriteta transformatora, odnosno ne smije doći do ispuštanja ulja.

4. Prijedlog sekvence i kriterija ispitivanja

Jedan od ciljeva ovog rada je prikazati slijed ispitivanja za provjeru dizajna naponskih transformatorskih jedinica (induktivnih naponskih ili naponskih transformatora velike snage) sa sekcioniranim aktivnim dijelom, uzimajući u obzir njihovu sigurnost tijekom rada, o čemu je bilo govora i u prethodnim poglavljima.

Opći shematski prikaz sekvence ispitivanja pokazan je na slici 9.



Slika 9. Prijedlog sekvence ispitivanja na unutarnji kvar kod transformatora sa sekcioniranim aktivnim dijelom

Prvi je korak procijeniti stopu porasta energije kvara (eng. *energy generation rate*), odnosno snagu kvara, i odrediti najgori mogući scenarij, koristeći numeričko modeliranje za izračun prethodno spomenutih struja kvara I_{CP} i I_{FP} . Rezultati proračuna zatim se provjeravaju niskonaponskim nerazornim ispitivanjima.

Početna eksperimentalna provjera, koja se provodi na osušenom i uljem impregniranom aktivnom dijelu, sastoji se od mjerenja struja kvara I_{CP} i I_{FP} pri sniženom naponu. Dobivene vrijednosti tada se koriste kao ulaz za izračun stope porasta energije kvara za pojedini kratko spojeni svitak. Za kratkospojno ispitivanje na kompletiranom transformatoru potrebno je odabrati najgori slučaj mjesta kvara – ono s najvećom vrijednosti snage kvara.

Drugi korak je priprema ispitnog objekta. Prije bilo kakvih pripremnih aktivnosti, preporučuje se izvršiti početna ispitivanja za provjeru stanja transformatora. Osim uobičajenih rutinskih ispitivanja prema [2] i [3], preporučuju se i neka dodatna ispitivanja, primjerice:

- Mjerenje kapaciteta i faktora dielektričkih gubitaka
- Mjerenje otpora namota
- Određivanje struje magnetiziranja I_{RP}

Svrha ovih ispitivanja isključiti je sve druge moguće kvarove unutar promatranog transformatora, osim naravno kvara izazvanog kratkim spajanjem najnepovoljnijeg svitka primarnog namota. Prema volji i preporuci proizvođača, tijekom ovog koraka gornjem popisu moguće je pridodati i druga ispitivanja. U ovom trenutku slijedi priprema transformatora za glavno ispitivanje što uključuje kratko spajanje odabranog svitka primarnog namota i implementaciju opreme za monitoring ako postoje (tlak, temperatura i dr.). Zatim se transformator zatvara i puni uljem.

Treći korak je izvođenje samog testa. Na transformator s unutarnjim kratkim spojem potrebno je narinuti nazivni napon i bilježiti struju, napon, tlak i druge opcionalne signale. Budući da je transformator sada zatvoren i individualne sekcije aktivnog dijela nisu dostupne, mjerenje struje I_{CP} više nije moguće. Međutim, struja I_{FP} se i dalje lako može snimiti. Uz I_{FP} , treba zabilježiti i tlak i vrijeme kako bi se definirao točan trenutak odvajanja transformatora od ostatka mreže i prestanak napajanja, kao i krivulja povećanja tlaka. U ovom je koraku ispitivanje destruktivno za transformator.

Nakon glavnog ispitivanja slijedi četvrti korak – detaljno dijagnostičko ispitivanje radi utvrđivanja njegovih posljedica. Ono uključuje ponavljanje dodatnih testova iz

drugog koraka. Nakon toga, transformator se rastavlja i aktivni dio se temeljito pregledava u takozvanoj „post-mortem analizi“.

Ispitivanje se smatra uspješnim ako su ispunjeni sljedeći kriteriji:

- Ispitivanje je završilo kontroliranim i predviđenim rasterećenjem tlaka.
- Nije bilo nasilnih događaja (požara, zapaljenja, izlivanja ulja, oštećenja kućišta osim predviđenog rasterećenja tlaka).
- Dijagnostička ispitivanja su potvrdila da se kvar nije proširio izvan sekcije u kojoj je iniciran (zaostala termička oštećenja su prihvatljiva).

Valja napomenuti da su zaostala termička oštećenja u neposrednoj blizini kratkog spoja očekivana i dopuštena, iako koncept sekcioniranog aktivnog dijela ograničava kvar na samo jednu sekciju.

5. Numerički model prikladan za proračun promatranog tipa kvara

Jedan od glavnih zahtjeva predloženog ispitivanja je da se provodi s kratko spojenom sekcijom aktivnog dijela koja generira najveću energiju kvara (najteži kvar). Imajući to na umu, određivanje stope porasta energije kvara podijeljeno je u dva dijela: proračun stope porasta energije kvara i verifikaciju proračunate vrijednosti. Za proračun stope porasta energije kvara koristi se modeliranje metodom konačnih elemenata (eng. Finite Element Method - FEM). Cijeli postupak prvi put se spominje u [9] i [16] s detaljnim opisom danim u [8], a sličan se pristup koristi i u [12]. Ideja je modelirati čitav sekcionirani aktivni dio transformatora i upotrijebiti kvazi-statički (eng. *time-harmonic*) proračun za dobivanje vrijednosti struja I_{CP} i I_{FP} . Vrijednosti ovih struja ključne su za račun snage kvara i određivanje mjesta kvara s najvećom snagom koji se koriste za daljnja ispitivanja transformatora. Svi proračuni izvedeni su korištenjem softverskog alata Mentor Graphics MagNet verzije 7.7 [19].

Za potrebe ovog rada, svi proračuni, analize i ispitivanja koji se tiču induktivnih naponskih transformatora detaljno su pokazani na primjeru transformatora tipa VPU naponskog nivoa 145 kV, čija su natpisna pločica i fotografija prikazane na slici 10, a 3D model aktivnog dijela na slici 11 (a).

Kao što je spomenuto u ranijem poglavlju, transformator sa sekcioniranim aktivnim dijelom može imati dva režima kvara – kvar u glavnoj izolaciji ili kvar na primarnom namotu. S obzirom na to da je posljedica oba režima jednaka, kratki spoj oštećene sekcije, kvar je jednostavno modelirati, što je vizualno prikazano na slici 11 (b). Za proračun je korištena 3D kvazi-statička analiza na nazivnoj frekvenciji, a kako bi se smanjilo vrijeme proračuna, modelirana je samo četvrtina simetričnog modela aktivnog dijela transformatora [8].

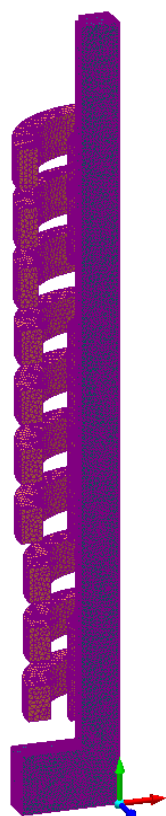
KONČAR INDUCTIVE VOLTAGE TRANSFORMER					
Type	VPU-145	Serial No.		Year of Manuf.	
	145/275/650	kV	H1-H2	80500	V
	145/275/650	kV	H1-H2	80500	V
Vf	1,9/30s		X1-X2	115	V
f	60	Hz	Y1-Y2	115	V
Insul PF	0.5	%	Thermal burden	1000+1000	VA
Total mass	305	kg	Oil	90	kg
			Seismic rating	"High" IEEE 693	
BC Hydro Catalogue ID	362 4351		BC Hydro Order No.	30362	
Made in Croatia			M64802		



(a)

(b)

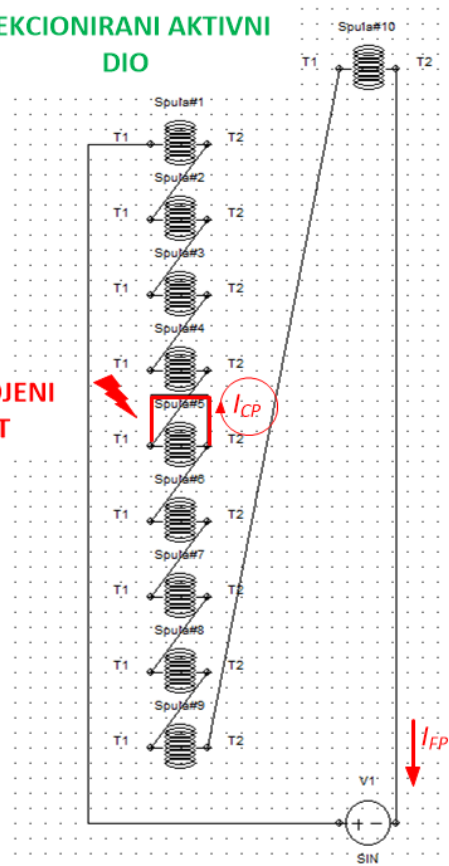
Slika 10. (a) Natpisna pločica (b) Fotografija promatranog transformatora



(a)

SEKCIONIRANI AKTIVNI DIO

KRATKO SPOJENI SEGMENT



(b)

Slika 11. (a) 3D model aktivnog dijela (b) Primarni strujni krug korišten u numeričkim proračunima

5.1. Proračun stope porasta energije kvara i određivanje kritičnog mjesta kvara

Inicijalni proračun proveden je za aktivni dio bez kratko spojene sekcije, kako bi se dobila vrijednost nazivne struje, I_{RP} . Pojava kvara simulirana je kratkim spajanjem jednog po jednog svitka primarnog namota, što je ponovljeno 11 puta jer je 11 ukupni broj sekcija aktivnog dijela analiziranog transformatora. Pri svakom proračunu zabilježene su vrijednosti struja kvara I_{CP} i I_{FP} . Kako bi rezultati proračuna bili usporedivi s ostalim varijantama dizajna aktivnog dijela s obzirom na tip transformatora, naponski nivo i broj sekcija, dobiveni rezultati struja, umjesto u apsolutnom iznosu, prikazani su kao omjeri struja kvara i nazivne struje, točnije I_{FP}/I_{RP} i I_{CP}/I_{RP} . Također, iz proračunom dobivenih vrijednosti struja I_{CP} i I_{FP} te poznatih vrijednosti otpora primarnog namota, prema formuli (4.1) moguće je odrediti stopu porasta energije koja se razvije za vrijeme kvara. Iako je jasno, kako je ranije spomenuto, da je stopa porasta energije kvara zapravo snaga kvara, preferirani izraz jest stopa porasta kvara i izražava se u džulima po sekundi radije nego u vatima. Razlog tome je mogućnost usporedbe sa stopama porasta energije kvara za druge izvedbe naponskih transformatora, [11], [12], [13], [14] i [17].

Stopa porasta energije kvara analitički se dobije pomoću izraza

$$E_{FP} = I_{FP}^2 \cdot R_w + I_{CP}^2 \cdot R_C \quad (5.1)$$

gdje je:

E_{FP} – stopa porasta energije kvara

R_w – ukupni otpor primarnog namota pri referentnoj temperaturi

R_C – otpor kratko spojenog svitka pri referentnoj temperaturi

Formula (5.1) temelji se na Kirchhoffovom zakonu, slično kao u [12], [13] i [14].

Tablica 3. Rezultati proračuna kvara FEM analizom za transformator VPU-145

	Redni broj svitka u kratkom spoju										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I_{FP}/I_{RP}	1,87	2,15	2,36	2,77	3,33	3,34	2,81	2,57	2,54	2,33	1,80
I_{CP}/I_{RP}	8,08	10,78	12,96	17,15	22,36	22,13	16,69	14,19	13,90	12,02	7,18
$E_{FP}[J/S]$	1283	1931	2595	4617	7691	7612	4856	3631	3525	2914	1759

Trend struje kvara i brzina stvaranja energije za razmatranu jedinicu od 145 kV prikazani su u tablici 3. Vektori kvara tipično se izražavaju kao omjeri I_{FP}/I_{RP} i I_{CP}/I_{RP} jer čine povećanje struje vidljivijim. Kao što se može vidjeti iz tablice 3, kvar na svitku broj 5 rezultira najvećim porastom energije kvara, što ga čini najgorim mogućim scenarijem za ovaj konkretni transformator. Također, u usporedbi s rezultatima vektora kvara za najnepovoljnije mjesto kvara, odnosno za najveću stopu porasta energije kvara, za cijeli asortiman proizvoda (prikazanima u tablici 4), može se vidjeti da ovaj transformator ima najveću snagu kvara, što je i bio glavni kriterij za odabir točno ovog naponskog nivoa za demonstraciju rezultata proračuna i ispitivanja. Glavna prednost predloženog FEM proračuna je ta što je brz, točan i jednostavan, kako je pokazano i u [8].

Tablica 4. Rezultati FEM analize maksimalne energije kvara na cjelokupnom asortimanu transformatora tipa VPU

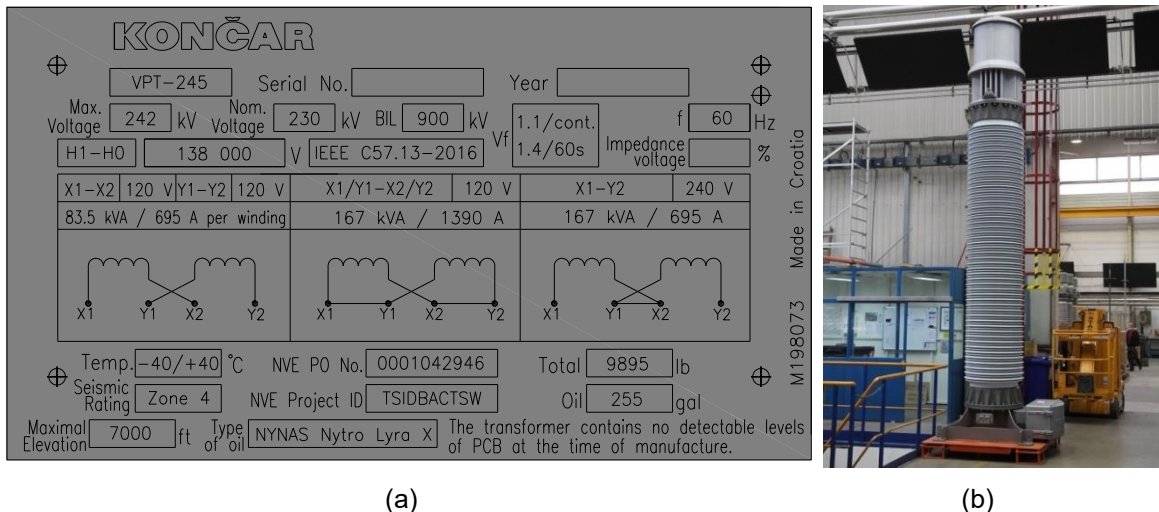
	Naponski nivo transformatora							
	72,5 kV	123 kV	145 kV	170 kV	245 kV	362 kV	420 kV	550 kV
I_{FP}/I_{RP}	3,77	3,61	3,35	3,18	2,89	2,52	2,18	2,47
I_{CP}/I_{RP}	20,86	21,69	22,24	24,58	33,69	40,33	33,65	37,27
$E_{FP}[J/s]$	4283	5901	7544	5778	4910	4810	4967	5446

5.2. Specifičnosti vezane uz modeliranje naponskog transformatora velike snage

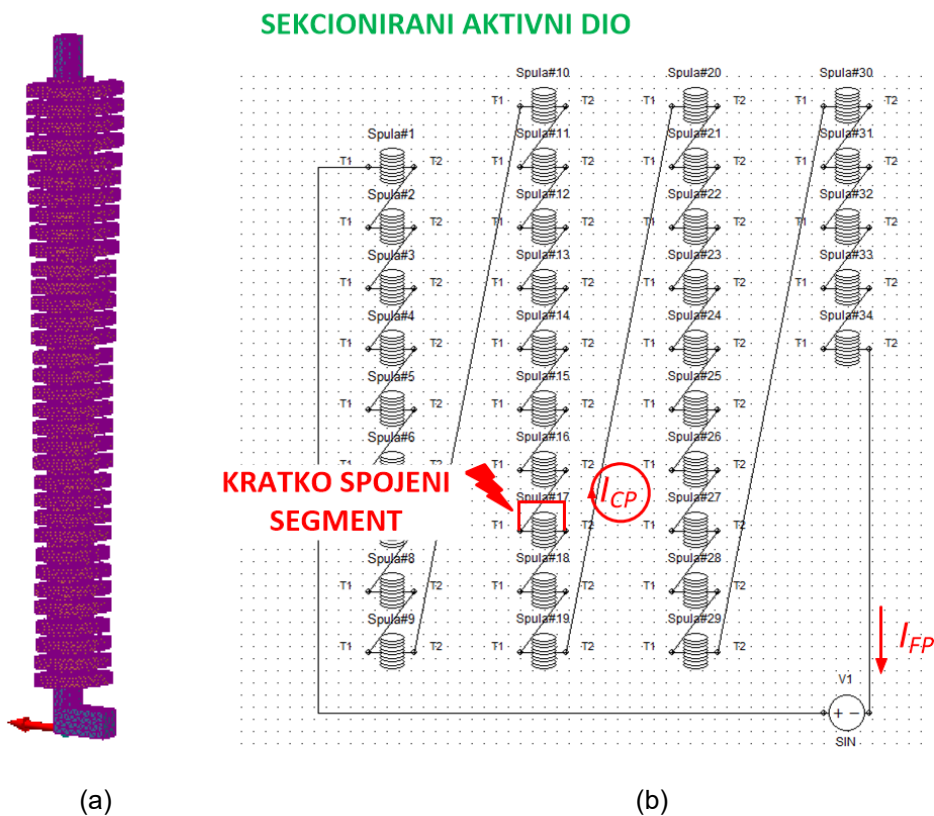
Kod proračuna stope porasta energije kvara, najznačajnija razlika između induktivnih naponskih i transformatora velike snage je priključen teret. Dok induktivni naponski transformatori uobičajeno imaju nazivne terete reda veličine 100 VA, tereti naponskih transformatora velike snage mogu doseći i do 333 kVA. Upravo zbog toga, potrebno je numeričkim proračunom provjeriti kako iznos i karakter tereta utječu na kvar tih transformatora.

Za numerički proračun i verifikaciju stope porasta energije kvara odabran je naponski transformator velike snage tipa VPT naponskog nivoa 245 kV i nazivne snage 167 kVA, čije su natpisna pločica i fotografija prikazane na slici 12. Važno je napomenuti da na ovom transformatoru nije provedeno ispitivanje s kratko spojenim kritičnim svitkom primarnog namota zbog ranije spomenutog

destruktivnog karaktera istog. 3D model aktivnog dijela i strujni krug korišteni za numerički proračun prikazani su na slici 13. Primjetna je sličnost u dizajnu s onim induktivnog naponskog transformatora, uz značajnu razliku u broju sekcija aktivnog dijela, koja proizlazi iz višeg naponskog nivoa i priključenog tereta VPT-a. transformatora.



Slika 12. (a) Natpisna pločica VPT transformatora (b) Fotografija promatranog transformatora



Slika 13. (a) 3D model aktivnog dijela VPT-a (b) Primarni krug za numerički proračun

Vektor struje kvara i brzina stvaranja energije za razmatranu jedinicu od 245 kV prikazani su u tablici 5. Iz prikazanih rezultata može se izvući nekoliko zaključaka. Najprije, da je ukupna struja I_{FP} porasla do 2,5 nazivne struje, što je nešto manje nego što je zabilježeno kod niza induktivnih naponskih transformatora. Struja kvara kroz kratko spojeni svitak I_{CP} veća je od nazivne struje 10-50 puta, što je nešto više nego kod induktivnih naponskih transformatora. Ovakve brojke su logične i očekivane budući da naponski transformatori velike snage tipično imaju više svitaka za isti naponski nivo što dodatno ograničava struju I_{FP} . Istovremeno, svaki svitak predstavlja i manju impedanciju pa omogućava razvoj veće vrijednosti struje I_{CP} . Nadalje, sama stopa porasta energije kvara za razmatrani naponski transformator velike snage približno je 9 % manja nego za induktivni naponski transformator istog naponskog nivoa, tablica 4. Sukladno tome i sam kvar, odnosno generacija plinova i posljedično tlaka traju duže nego kod naponskih transformatora, što ujedno i ostavlja više vremena za pravovremenu reakciju i isključenje transformatora.

Tablica 5. Rezultati proračuna kvara po svitku za transformator VPT-245

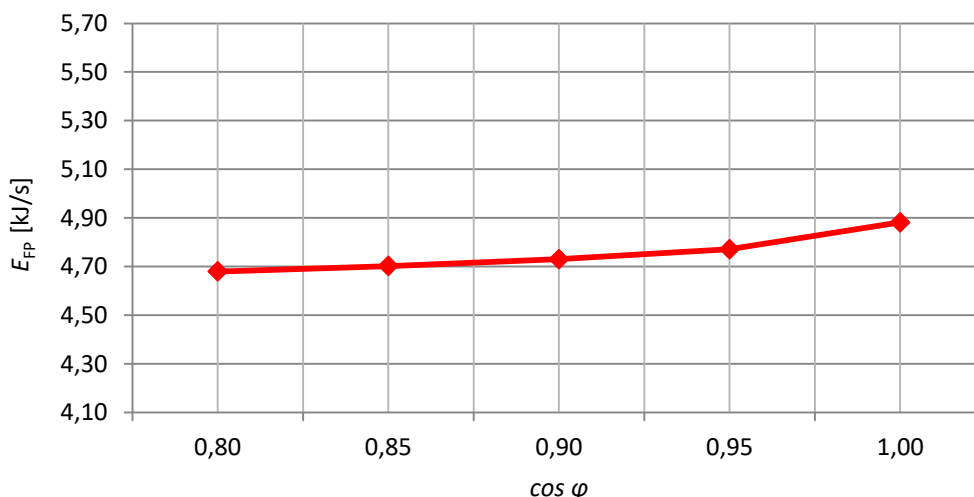
	Redni broj svitka u kratkom spoju											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I_{FP}/I_{RP}	1,46	1,56	1,66	1,75	1,86	1,95	2,04	2,13	2,21	2,29	2,36	2,41
I_{CP}/I_{RP}	14,19	16,95	20,09	23,14	26,55	30,03	32,53	35,52	38,32	40,90	43,34	45,39
$E_{FP}[J/s]$	626	809	1022	1253	1576	1877	2133	2423	2828	3136	3411	3671
	Redni broj svitka u kratkom spoju											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
I_{FP}/I_{RP}	2,45	2,50	2,53	2,55	2,55	2,54	2,51	2,45	2,42	2,37	2,31	2,23
I_{CP}/I_{RP}	46,95	48,05	48,84	49,30	49,45	49,29	48,79	47,41	45,15	42,93	41,25	38,49
$E_{FP}[J/s]$	4039	4227	4362	4443	4468	4438	4349	4286	4027	3782	3550	3210
	Redni broj svitka u kratkom spoju											
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34		
I_{FP}/I_{RP}	2,13	2,05	1,96	1,87	1,78	1,68	1,56	1,46	1,36	1,27		
I_{CP}/I_{RP}	35,22	32,87	29,44	26,50	23,40	20,27	17,05	15,55	13,91	12,08		
$E_{FP}[J/s]$	2905	2622	2260	1953	1640	1358	1192	999	810	625		

Drugi važan podatak koji nam daju rezultati dobiveni proračunom jest najnepovoljnije mjesto kvara, odnosno svitak koji, ako je kratko spojen, oslobađa najveću energiju kvara, a to je 17. svitak. Pokazano je da numerička analiza vrlo jednostavno može dati informaciju o najnepovoljnijem mjestu kvara unutar aktivnog dijela, što je vrlo pogodno u slučaju da se rad transformatora u režimu unutarnjeg kvara mora verificirati laboratorijskim ispitivanjem.

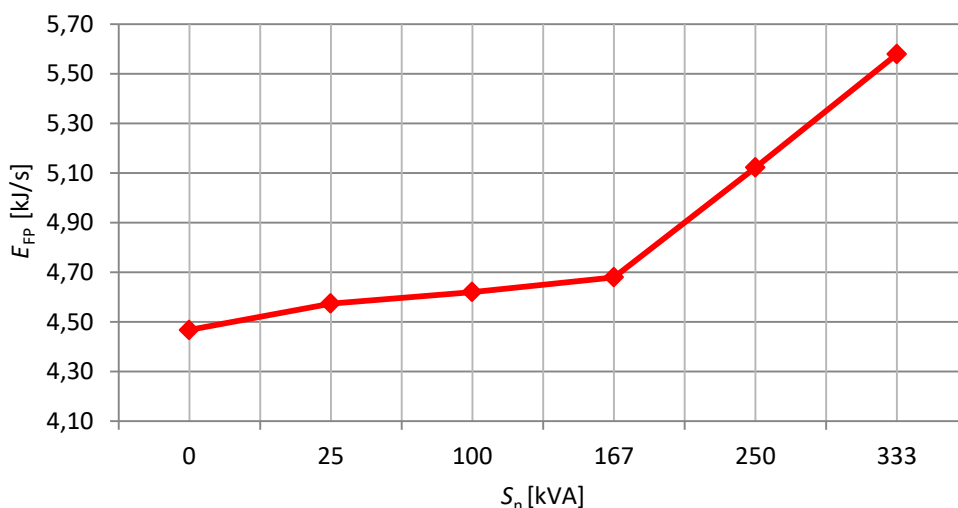
Tablica 5 prikazuje rezultate dobivene proračunom na modelu kojem je sekundarni namot u praznom hodu. To je praksa preuzeta od induktivnih naponskih transformatora i pokazala se odličnim alatom za određivanje kritičnog mjesta kvara u aktivnom dijelu. Međutim, kao što je već rečeno, značajna razlika u priključenom teretu između ova dva tipa transformatora uvjetovala je da se najprije istraži kakav je utjecaj iznosa i karaktera tereta na proračun stope porasta energije kvara transformatora velike snage. Za potrebe ovog rada odabrani tereti i pripadajući faktori snage prikazani su u tablici 6. U odnosu na 3D model aktivnog dijela opisan ranije, jedina je razlika to što je sada na sekundarni namot priključen teret kao kombinacija različitih otpora i induktiviteta, ovisnih o iznosu tereta i faktoru snage. Ostatak numeričkog proračuna proveden je na jednak način kao i ranije, dakle za kratki spoj na svakome od 34 svitaka primarnog namota, uz alternaciju tereta iz tablice 6 za svaki svitak. Rezultati dobiveni za najgori slučaj, kad je kratko spojen 17. svitak, prikazani su na dijagramima na slikama 14 i 15.

Tablica 6. Tereti odabrani za proračun

Odabrani tereti u ovisnosti o faktoru snage						Odabrani tereti u ovisnosti o iznosu					
S_n / kVA	167	167	167	167	167	S_n / kVA	25	100	167	250	333
$\cos \varphi$	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	$\cos \varphi$	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80



Slika 14. Ovisnost maksimalne stope porasta energije kvara o faktoru snage tereta



Slika 15. Ovisnost maksimalne stope porasta energije kvara o iznosu tereta

Iz rezultata dobivenih za odabrane terete istog iznosa (167 kVA), ali različitih faktora snaga može se zaključiti da energija kvara donekle ovisi o karakteru tereta spojenog na transformator. Slika 14 prikazuje da stopa porasta energije kvara gotovo linearno raste s porastom udjela omskog otpora u impedanciji tereta, međutim relativna promjena energije s karakterom tereta je svega 5 %, što je granica tolerancije iznosa energije u praznom hodu. Isto tako, za neopterećeni transformator i za transformator terećen bilo kojim iznosom tereta do nazivnog, razlike su dovoljno male pa se može zaključiti da iznos tereta ne utječe značajno na snagu kvara. Naravno, taj zaključak vrijedi dokle god je teret manji ili jednak nazivnome, što je i vidljivo iz grafa na slici 15. Ako se transformator preoptereći

snagom većom od nazivne za koju je aktivni dio dimenzioniran, logično je očekivati i oslobađanje veće energije kvara jer dolazi do strujnog preopterećenja transformatora i zbog kvara i zbog nazivne vrijednosti struje tereta. Rezultati proračuna pokazuju da je razlog tome što je, iako kroz opterećeni transformator teče veća ukupna struja I_{FP} , zbog superponirane struje tereta, struja I_{CP} manja. Slika 16 na primjeru kratko spojenog 9. svitka jasno pokazuje da je struja kvara I_{CP} gotovo u protufazi sa strujom tereta. To ima za posljedicu da je ukupna struja koja teče kroz kratko spojeni svitak zapravo manja od struje kvara kod neopterećenog transformatora.

Energy	Force	Flux Linkage	Ohmic Loss	Iron Loss	Current	Voltage
		Magnitude	Phase			
Spula#1		1.911964119543	-164.2449951651			
Spula#2		1.911964119543	-164.2449951651			
Spula#3		1.911964119543	-164.2449951651			
Spula#4		1.911964119543	-164.2449951651			
Spula#5		1.911964119543	-164.2449951651			
Spula#6		1.911964119543	-164.2449951651			
Spula#7		1.911964119543	-164.2449951651			
Spula#8		1.911964119543	-164.2449951651			
Spula#9		13.72472589687	2.598342393158			

Slika 16. Struja kroz svitke primarnog namota, pri čemu je kratko spojen svitak broj 9

Ovaj podatak je izrazito bitan budući da upućuje na to da je dovoljno točno raditi procjenu snage kvara samo u praznom hodu. Isto tako, u slučaju pripreme i provedbe ovakvog ispitivanja, može se smatrati prihvatljivim ispitivanje provesti u praznom hodu, što je vrlo povoljno iz izvedbenog aspekta budući da bi bilo vrlo zahtjevno napajati transformator u režimu kritičnog kvara koji je ujedno opterećen omskim teretom ($\cos \varphi = 1$) nazivne vrijednosti koji je nemoguće kompenzirati.

5.3. Utjecaj kvara na raspodjelu napona

Još jedan važan aspekt ponašanja transformatora tijekom kvara je raspodjela narinutog napona na primarnom namotu. Pretpostavka je da bi unutarnji kvar značajno pokvario idealnu raspodjelu napona i time potencijalno preopteretio ostatak „zdravog“ primarnog namota. Zbog toga je bilo potrebno istražiti utjecaj kvara na raspodjelu napona i dokazati da neće doći do naponskog preopterećenja zdravih svitaka.

Kako bi se pokazao utjecaj kvara u obliku kratko spojenog svitka na raspodjelu napona, napravljen je niz numeričkih proračuna na induktivnom naponskom transformatoru predstavljenom ranije u ovom poglavlju. Za svaki od 11 svitaka primarnog namota u kratkom spoju proračunata je raspodjela napona po namotu i dobivene vrijednosti uspoređene su s vrijednostima raspodjele kad nema kvara odnosno kratkog spoja.

Dobiveni rezultati usporedno su prikazani na grafu na slici 17. Iz grafa je vidljivo da raspodjela napona u slučajevima s kratko spojenim svitcima u velikoj mjeri odstupa od polazne raspodjele koju ima transformator bez kratko spojenih svitaka, što je u skladu s pretpostavkom. Unatoč tome što i one dosta odstupaju, zanimljivo je da raspodjele najbliže nominalnoj imaju slučajevi s kratko spojenim svitcima 5 i 6, koji prema proračunu najnepovoljnijeg mjesta kvara imaju najveću stopu porasta energije kvara.

Svrha rezultata proračuna raspodjele napona na primarnom namotu bila je dokazati da neće doći do preopterećenja zdravih svitaka, odnosno dokazati da niti jedan svitak neće prekoračiti maksimalno naponsko opterećenje zadano $n/2$ kriterijem, koji je opisan u potpoglavlju 3.3. Iz grafova na slici 8 u tom potpoglavlju vidljivo je da je dopustivi napon po svitku 35 kV, stoga je potrebno dokazati da maksimalno naponsko opterećenje neće prijeći tu vrijednost.

Maksimalno opterećenje računa se prema formuli

$$U_{max} = \Delta U_{max} \cdot F_V \cdot U_n / n \quad (5.2)$$

gdje je:

U_{max} – maksimalno naponsko opterećenje svitka primarnog namota

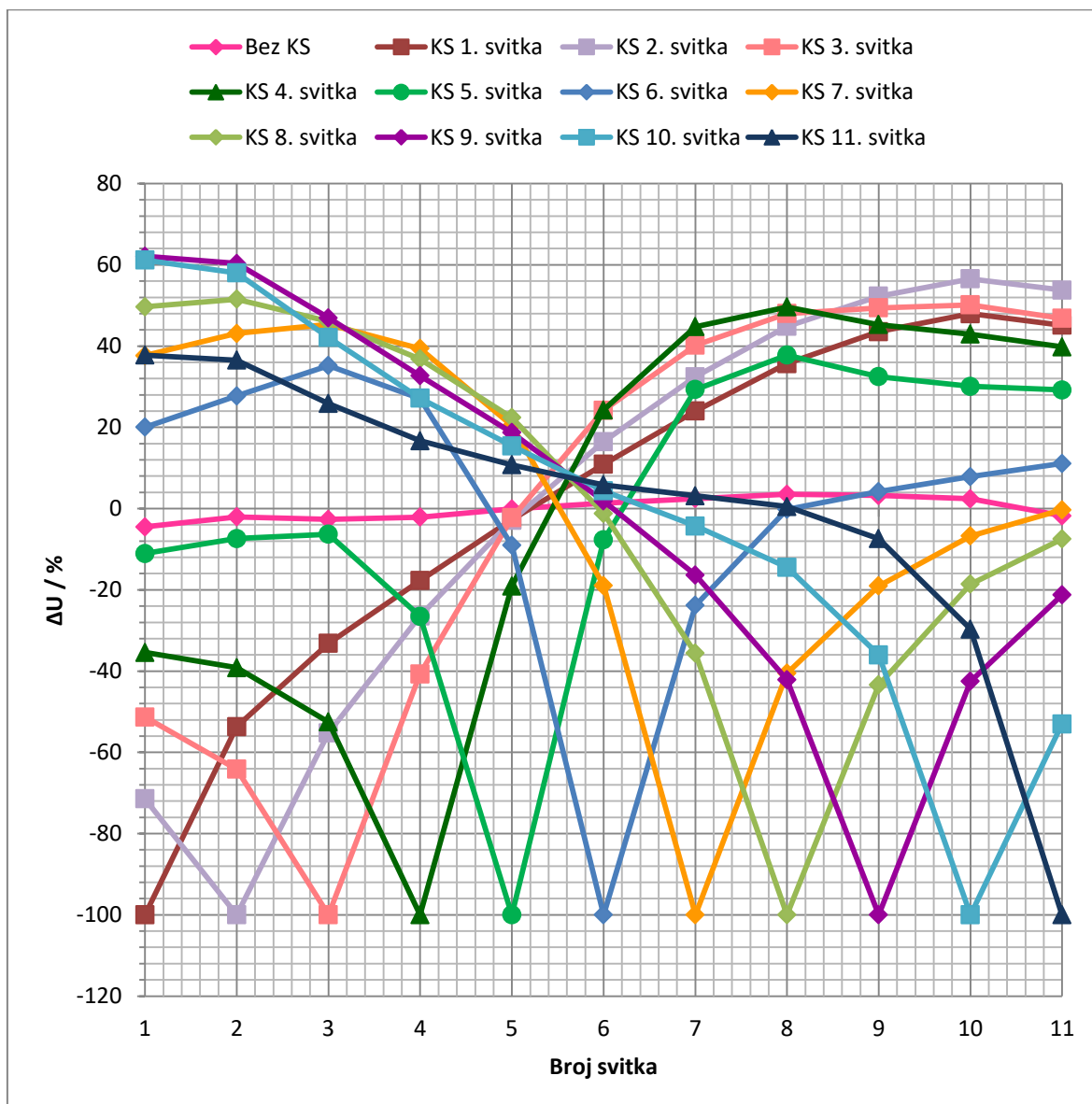
ΔU_{max} – maksimalno odstupanje napona od srednje vrijednosti

F_V – faktor trajnog prenapona

U_n – nazivni primarni napon

n – broj svitaka primarnog namota

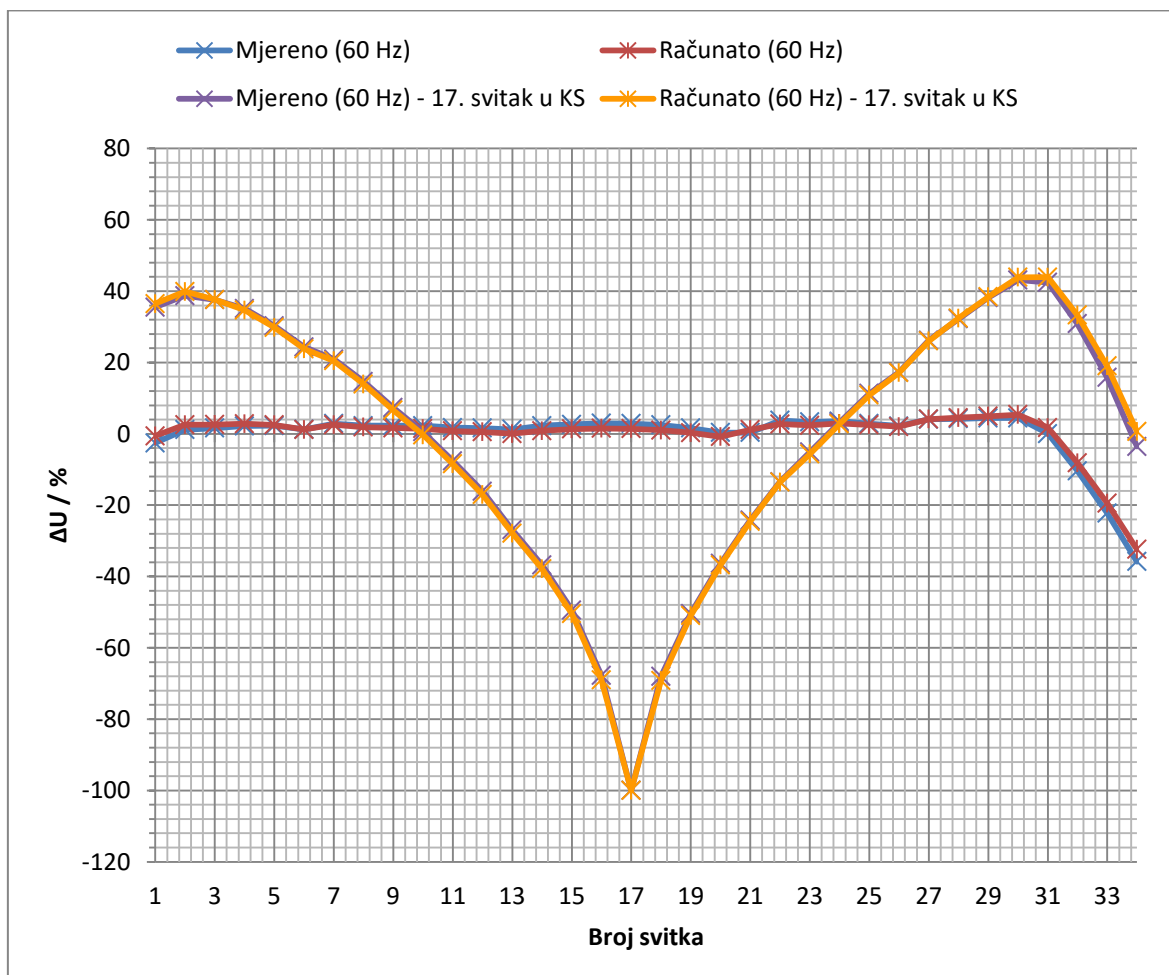
Za promatrani induktivni naponski transformator formula 5.2 daje maksimalno naponsko opterećenje od 14,23 kV po svitku, što je znatno ispod granice dopustivog napona.



Slika 17. Usporedba raspodjele napona na primarnom namotu induktivnog naponskog transformatora

Za naponski transformator velike snage tipa VPT-245 čiji su nazivni podatci dani potpoglavlju 5.2 napravljena je usporedba raspodjela napona na primarnom namotu za slučajeve kad nema kratko spojenog svitka i kad je kratko spojen svitak broj 34. Na ovom transformatoru u laboratoriju su izmjerene raspodjele neposredno prije i nakon spajanja kritičnog svitka broj 17 kratkospojnikom te su i ti rezultati uključeni u grafički prikaz na slici 18. Vidljivo je da se mjereni i računati rezultati dosta dobro poklapaju, ali ponovno, kao i kod induktivnog naponskog transformatora, kratko spajanje jednog svitka primarnog namota vrlo značajno kvvari njegovu raspodjelu.

Slično kao i kod induktivnog naponskog transformatora, prema formuli 5.2, izračunato je maksimalno naponsko opterećenje svitka te za promatrani transformator ono iznosi 14,08 kV po svitku.



Slika 18. Usporedba raspodjele napona na primarnom namotu naponskog transformatora velike snage

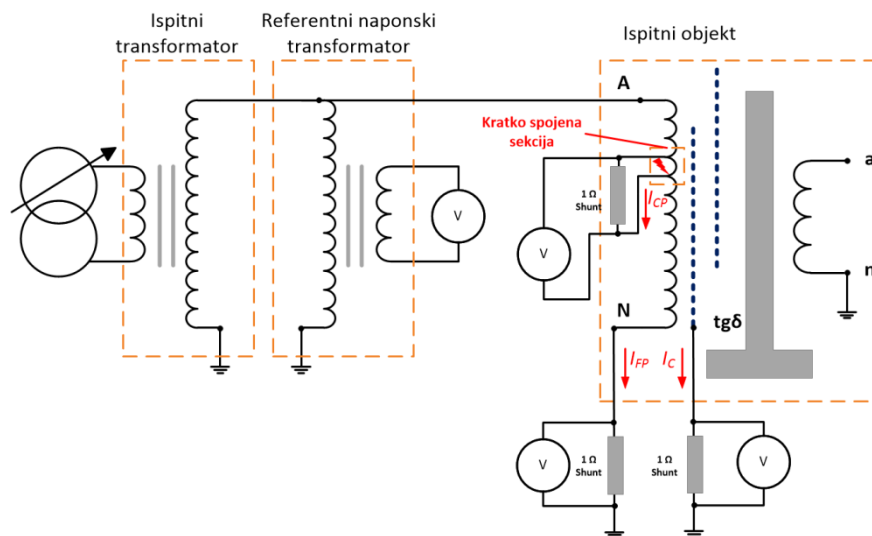
Rezultati dobiveni za oba tipa transformatora potvrđuju da unutarnji kvar na jednoj sekciji aktivnog dijela kviri raspodjelu napona na primarnom namotu, ali implementacija $n/2$ kriterija u dizajn primarnog namota ostavlja dovoljnu rezervu da, unatoč lošijoj raspodijeli odnosno većem naponskom opterećenju pojedinih svitaka, izolacija svitka nije kompromitirana.

6. Eksperimentalna verifikacija kritičnog mjesta kvara

Iako je metoda konačnih elemenata izvrstan alat za određivanje lokacije kvara za najgori slučaj, dobivene vrijednosti struja kvara ipak treba provjeriti prije finalnih priprema ispitnog objekta za kratkospojno ispitivanje.

6.1. Opis mjerenja

Kao što je ranije spomenuto, laboratorijsko ispitivanje u svrhu verifikacije rezultata dobivenih numeričkim proračunom provodi se na osušenom i uljem impregniranom aktivnom dijelu. Nakon impregnacije, ulje se ispusti i transformator se otvara kako bi se omogućio pristup svitcima primarnog namota za potrebe mjerenja struja kvara, I_{CP} i I_{FP} . Zbog nedostatka impregnata, ovo ispitivanje potrebno je provoditi pri sniženom naponu kako ne bi bilo destruktivno za transformator. Iako se mjerenja mogu izvesti na jedinici prije ulaska u postupak sušenja ili impregnacije uljem, preporuka je da se mjerenja provode na otvorenoj jedinici s potpuno sastavljenim aktivnim dijelom nakon što su završeni procesi sušenja i impregnacije ulja. Glavni argumenti za ovaj pristup su mogućnost sigurnog izvođenja mjerenja na širem nizu primijenjenih napona i iskustveno bolje usklađivanje izmjerenih i izračunatih rezultata. U ovom konkretnom slučaju mjerenja su provedena do približno 35 % nazivnog napona bez zabilježenog utjecaja na aktivni dio. Valja napomenuti da bi početno ispitivanje trebalo biti ograničenog trajanja kako bi se izbjeglo nepotrebno izlaganje razmatranog svitka struji kvara I_{CP} . Shematski prikaz mjernog kruga navedenog ispitivanja za promatrani induktivni naponski transformator iz poglavlja 4 te fotografija istoga prikazani su na slici 19.



(a)



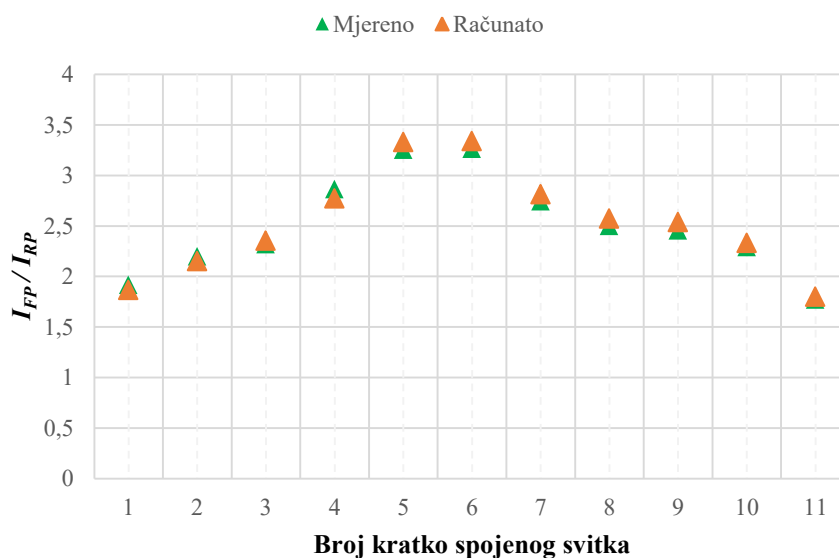
(b)

Slika 19. (a) Shematski prikaz mjernog kruga ispitivanja kratko spojenih svitaka (b) Fotografija mjernog kruga u laboratoriju

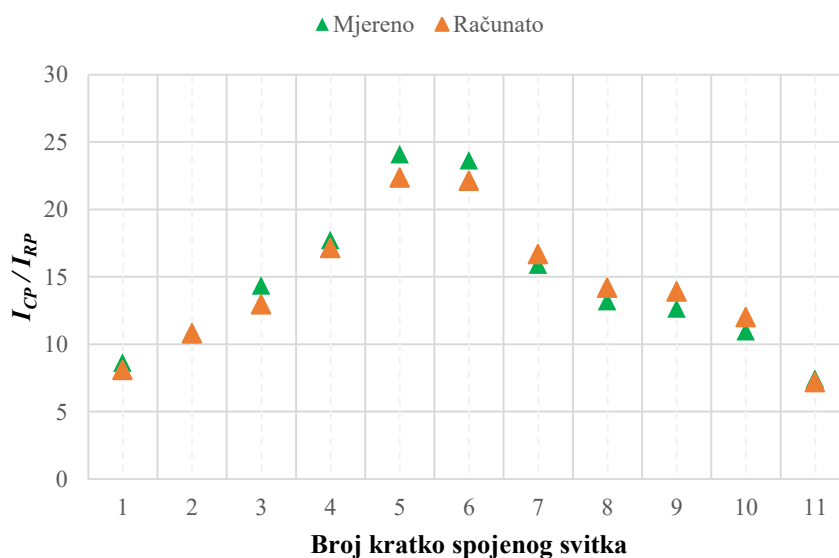
Za mjerenje struja kvara korišteni su 1Ω shuntovi za svaki strujni put, a za snimanje napona na svakom shuntu identični, kalibrirani multimetri FLUKE 179. Na ovaj način dobiju se točne vrijednosti struja I_{CP} i I_{FP} . Linearnost ponašanja struja kvara s narintim naponom objašnjena je u [8].

6.2. Analiza rezultata na naponskim transformatorima

Rezultati mjerenih veličina struja kvara I_{CP} i I_{FP} te njihova usporedba s proračunatim vrijednostima za induktivni naponski transformator tipa VPU prikazani su u nastavku slika 20 (a) i (b). Slika 21 prikazuje usporedbu mjerenih i izračunatih stopa porasta energije kvara E_{RP} .

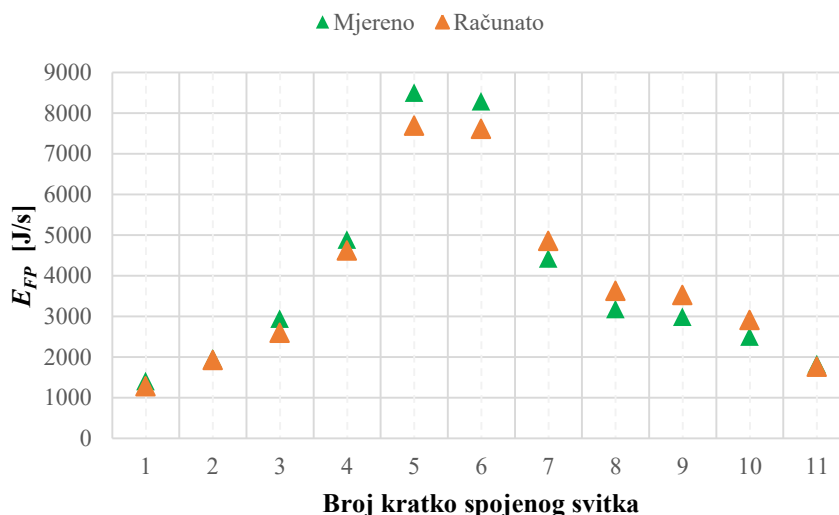


(a)



(b)

Slika 20. Usporedba mjerenih i izračunatih vrijednosti (a) omjera I_{FP}/I_{RP} (b) omjera I_{CP}/I_{RP}



Slika 21. Usporedba mjerenih i izračunatih vrijednosti stope porasta energije E_{FP}

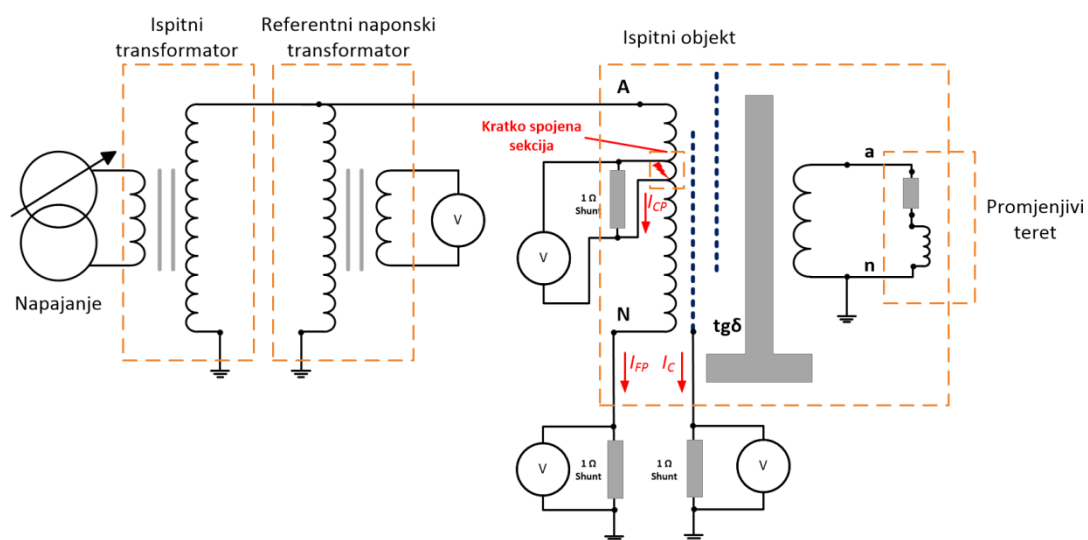
Iz sva tri grafa očito je da su rezultati mjerenja i izračuna dobro usklađeni. Analiza prosječnih i maksimalnih odstupanja za svaki razmatrani parametar dana je u tablici 7. Dobivene vrijednosti parametara kao i njihova odstupanja u skladu su s ranije dobivenima [8] i pokazuju da je provjera mjesta kvara (i oslobođene energije) metodom konačnih elemenata dovoljno točna za pripremu za ispitivanje.

Tablica 7. Prosječno i maksimalno odstupanje promatranih parametara

	Odstupanje [%]	
	Prosječno	Maksimalno
I_{FP}/I_{RP}	2,4	3,4
I_{CP}/I_{RP}	6,4	10,0
E_{FP} [J/s]	9,5	15,3

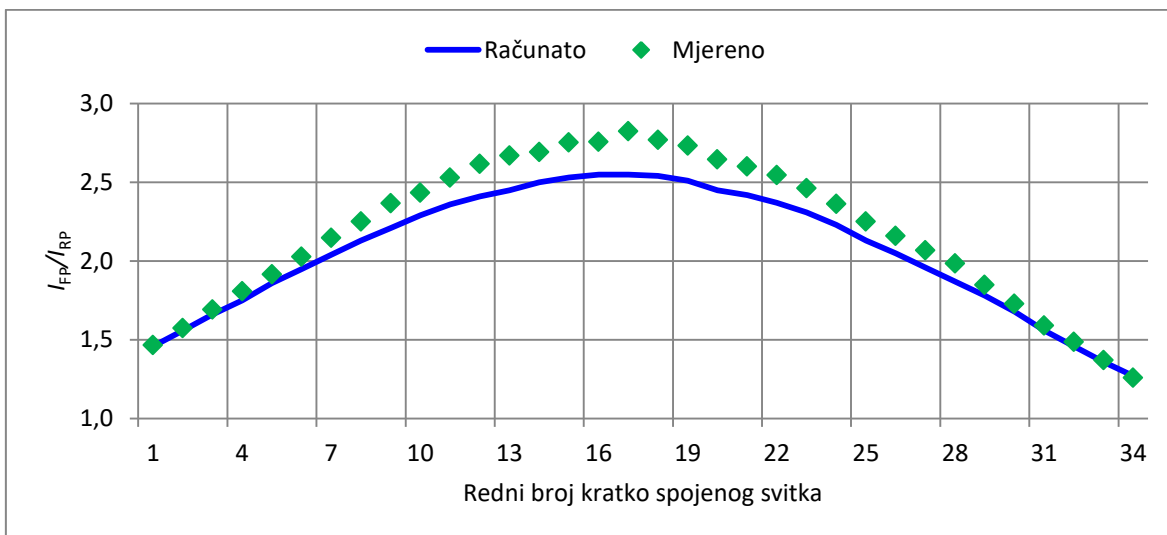
6.3. Mjerenja na naponskim transformatorima velike snage

Na 245 kV naponskom transformatoru velike snage koji je korišten kao model za numeričku analizu čiji su rezultati predstavljeni u potpoglavlju 4.2, provedeno je i laboratorijsko ispitivanje u svrhu verifikacije rezultata dobivenih proračunom. Shematski prikaz mjernog kruga navedenog ispitivanja sličan je prikazanom na slici 19 (a), uz dodatak promjenjivog tereta, slika 22 (a). Teret se mijenja po iznosu kombinacijom omske i induktivne komponente. Slika 22 (b) prikazuje fotografiju transformatora VPT-245 spojenog u mjerni krug za verifikacijsko ispitivanje.

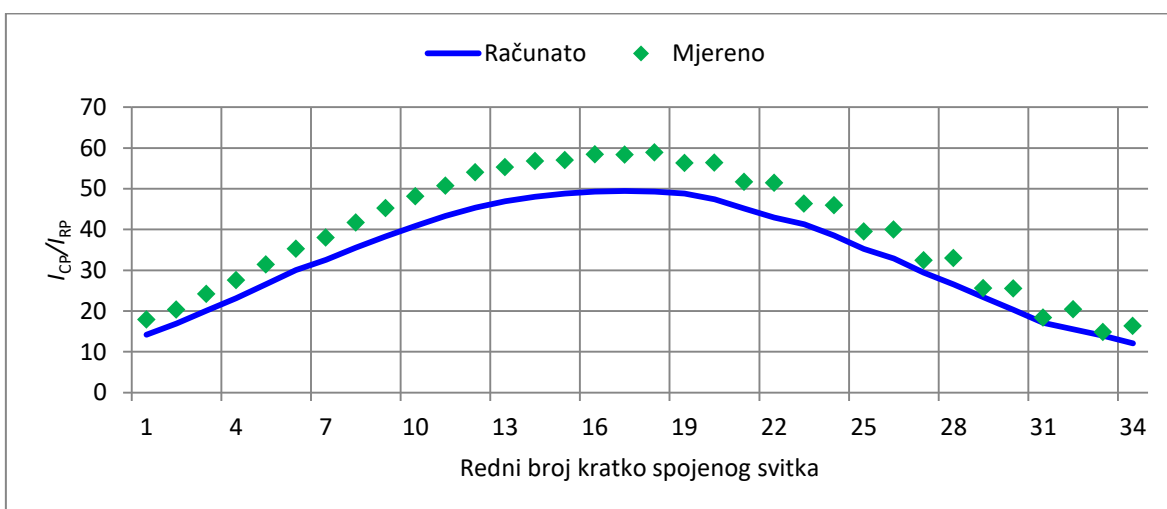


Slika 22. (a) Shematski prikaz mjernog kruga ispitivanja s promjenjivim teretom (b) Fotografija mjernog kruga u laboratoriju

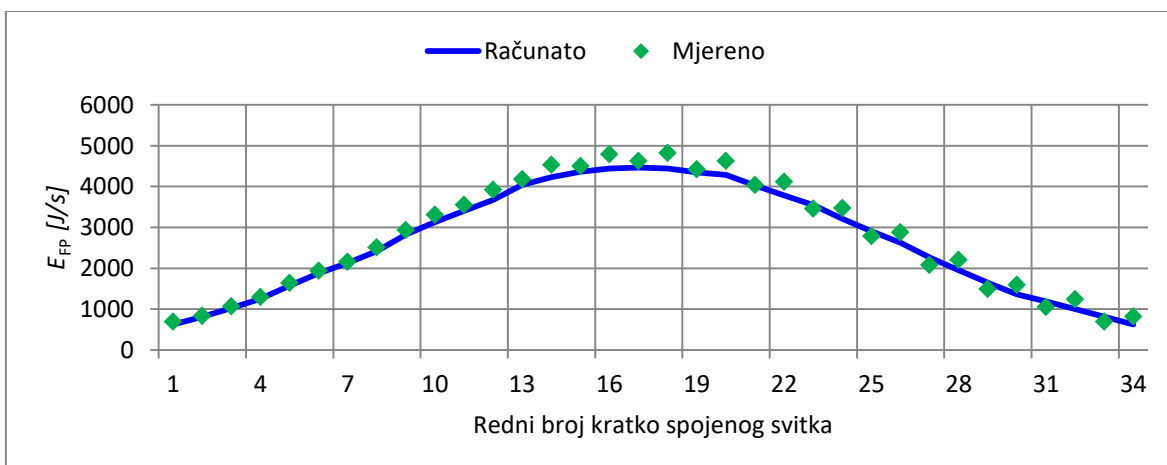
Struje kvara dobivene mjerenjem u omjeru s nazivnom strujom izmjerenu u slučaju kad nijedan svitak primarnog namota nije kratko spojen uspoređene su s omjerima dobivenim numeričkim proračunima i prikazane na slikama 23, 24 i 25. Također, usporedba mjerenih i računatih vrijednosti napravljena je i za stopu porasta energije kvara, E_{FP} . Usporedba je napravljena za tri varijante priključenog tereta na naponski transformator velike snage: neopterećeni transformator, teret 167 kVA $\cos \varphi = 0,8$ i teret 167 kVA $\cos \varphi = 1,0$.



(a)



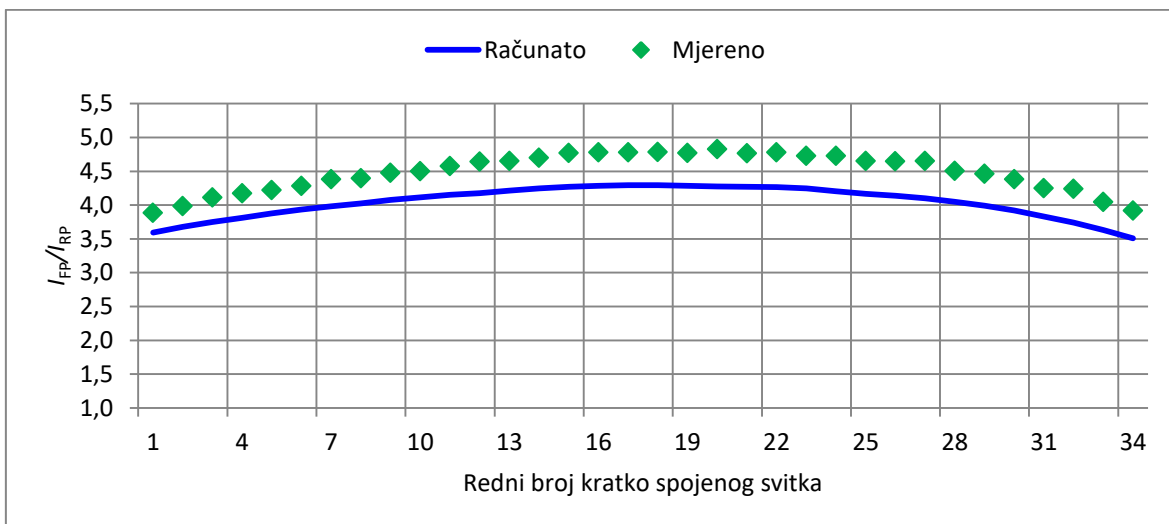
(b)



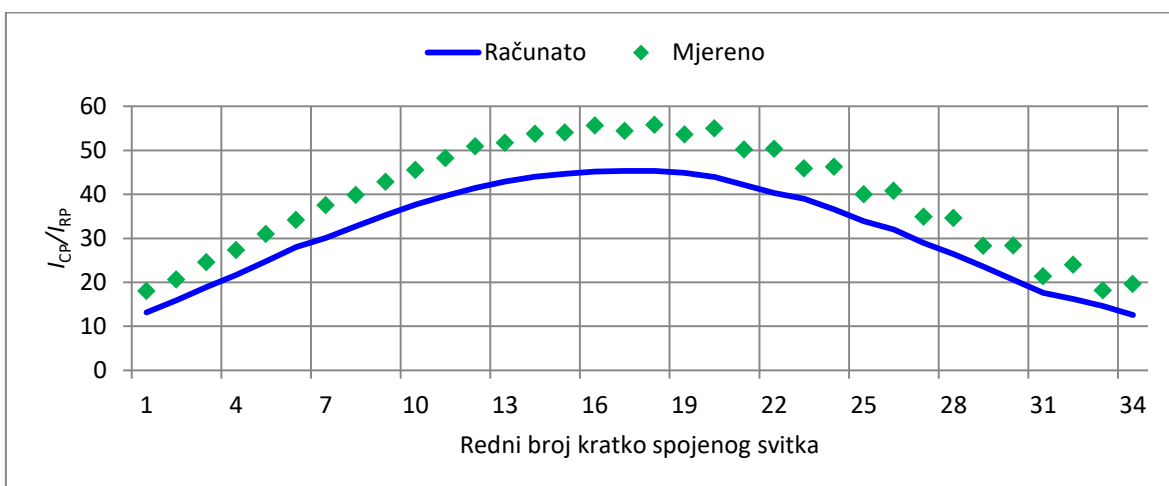
(c)

Slika 23. Usporedba mjerenih i računatih struja u slučaju neopterećenog transformatora

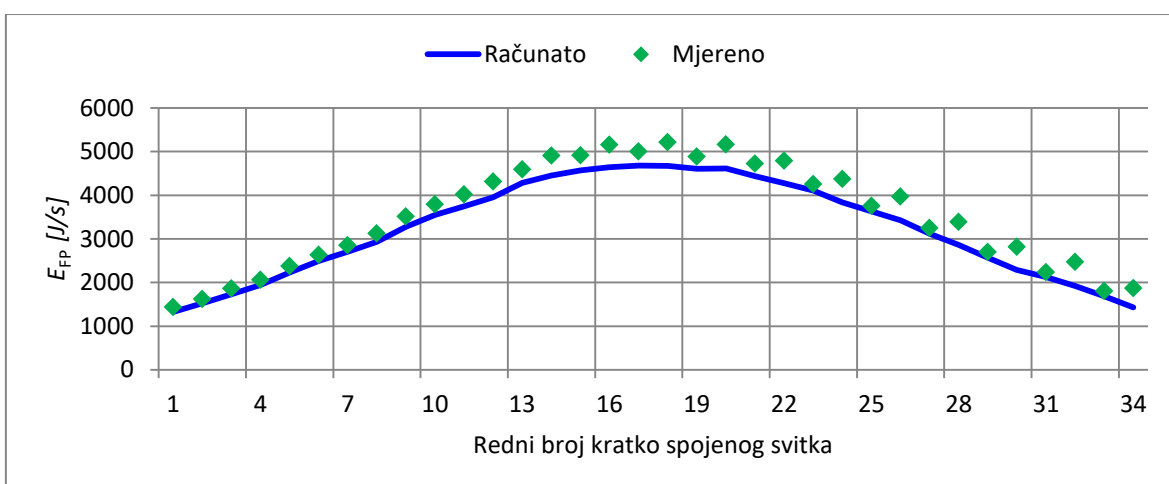
(a) I_{FP} (b) I_{CP} (c) E_{FP}



(a)



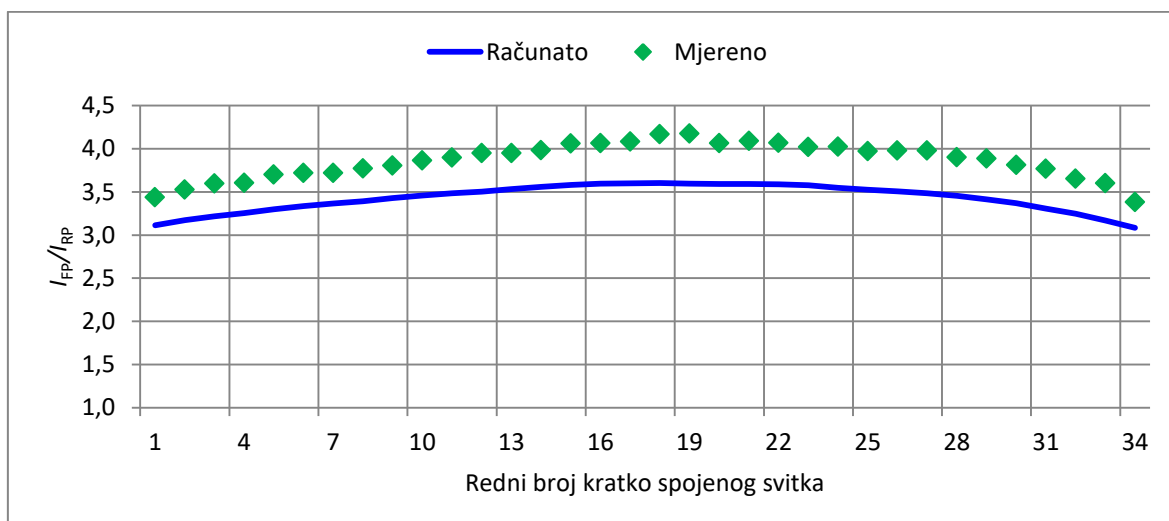
(b)



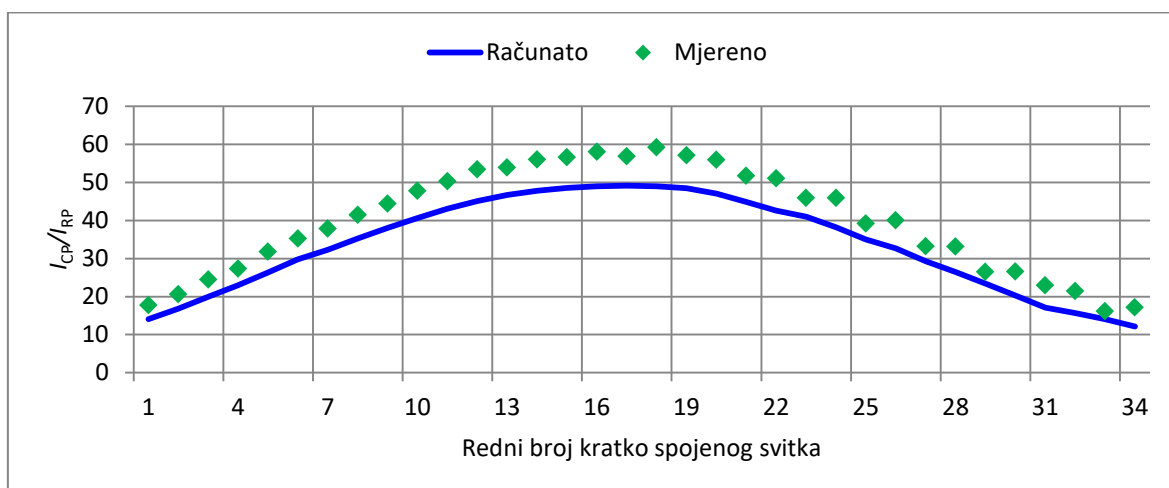
(c)

Slika 24. Usporedba mjerenih i računatih struja kod tereta 167 kVA $\cos \varphi = 0,8$ (a) I_{FP}

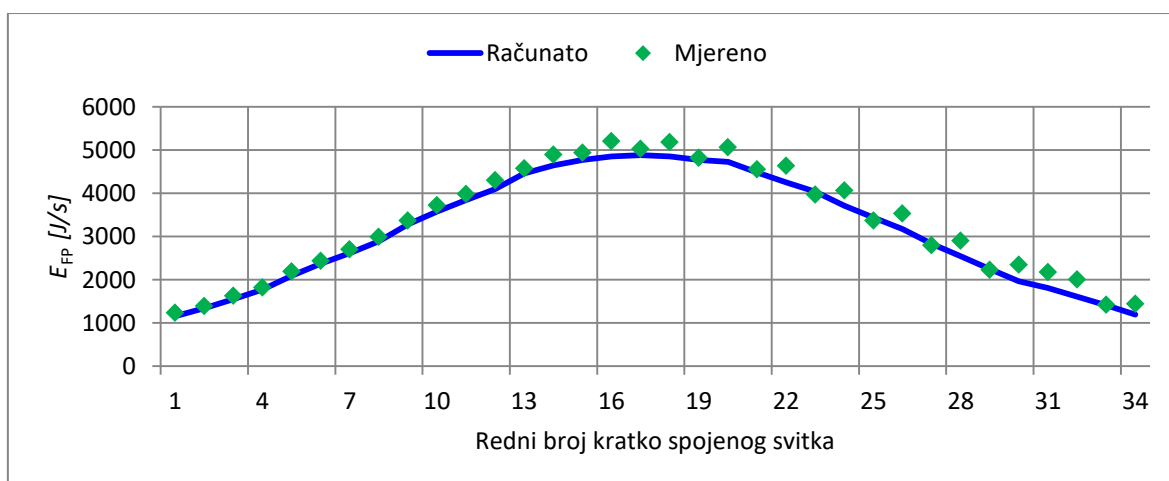
(b) I_{CP} (c) E_{FP}



(a)



(b)



(c)

Slika 25. Usporedba mjerenih i računatih struja kod tereta 167 kVA $\cos \varphi = 1,0$ (a) I_{FP}

(b) I_{CP} (c) E_{FP}

Može se zaključiti da su mjerene vrijednosti usporedive s računatima: srednje odstupanje ukupne struje kroz zdravi dio primarnog namota I_{FP} manje je od 10 %, a srednje odstupanje struje kroz kratko spojeni svitak I_{CP} iznosi do maksimalno 20 % s obzirom na teret. Dobivena odstupanja detaljnije su prikazana u tablici 8.

Tablica 8. Prosječno i maksimalno odstupanje promatranih parametara za VPT-245

Neopterećeni transformator	167 kVA, $\cos \varphi = 0,8$				167 kVA, $\cos \varphi = 1,0$			
	Odstupanje [%]		Odstupanje [%]		Odstupanje [%]		Odstupanje [%]	
	Prosječno	Maksimalno	Prosječno	Maksimalno	Prosječno	Maksimalno	Prosječno	Maksimalno
I_{FP}/I_{RP}	5,1	9,7	I_{FP}/I_{RP}	9,8	11,9	I_{FP}/I_{RP}	11,2	13,9
I_{CP}/I_{RP}	15,3	26,2	I_{CP}/I_{RP}	20,0	36,0	I_{CP}/I_{RP}	16,5	29,2
$E_{FP}[J/s]$	7,1	23,3	$E_{FP}[J/s]$	8,5	23,6	$E_{FP}[J/s]$	5,8	19,7

Razlog nešto većem odstupanju struje I_{CP} najvjerojatnije je posljedica mjerne metode i uključenja otpornog shunta koji je nužan za očitavanje vrijednosti struje. Međutim, navedena odstupanja dovoljno su malena da se numerički proračun može smatrati točnim za određivanje snage kvara i kritične lokacije kvara. Dakle, iako odstupanja postoje i iznosi nisu skroz bliski, lako se može odrediti trend odnosno krivulja kvara, što znači da se jasno može odrediti u kojoj je sekciji najveća snaga kvara. To u konačnici znatno pojednostavljuje ispitivanje, jer se unaprijed točno zna koji svitak treba kratko spojiti. Također, poklapanja između računatih i mjerenih vrijednosti usporediva su s rezultatima dobivenim za induktivni naponski transformator.

7. Ispitivanje transformatora na unutarnji kvar

Glavni cilj ovog rada dati je prijedlog ispitivanja kojim se provjerava otpornost na unutarnji kvar za one transformatore koji sami svojim dizajnom ograničavaju i usporavaju razvoj takvog kvara i za koje ispitivanja propisana važećim standardima, iako primjenjiva, nisu pogonski relevantna. Takvi transformatori su i oni temeljeni na konceptu otvorene jezgre kakve proizvodi tvornica Končar – Mjerni transformatori u asortimanu induktivnih naponskih, kombiniranih i transformatora velike snage. S obzirom na to da je ovo ispitivanje, kako je ranije spomenuto, destruktivne naravi, pokazno je provedeno na jednom dostupnom komadu induktivnog naponskog transformatora tipa VPU-145, na kojem je provedena i numerička analiza.

7.1. Priprema ispitivanja

Prema tijeku ispitivanja danom na slici 9, priprema transformatora za ispitivanje uključuje inicijalna dijagnostička ispitivanja i fizičku pripremu samog transformatora za ispitivanje.

Prije otvaranja jedinice za eksperimentalnu verifikaciju stope porasta energije kvara opisane u poglavlju 5., na transformatoru su provedena sva rutinska ispitivanja. S obzirom na to da je ovaj konkretni transformator proizveden za kanadsko tržište prema važećem standardu CAN/CSA C60044-2:07, popis njegovih rutinskih ispitivanja odgovara onima koje zahtjeva upravo taj standard [18]. Međutim, standard prema kojem se izvode rutinska ispitivanja nema utjecaj na ovo ispitivanje. Sve specifičnosti dizajna koje se odnose na različite zahtjeve, bilo standarda bilo specifikacije kupca, mogu se ocijeniti putem stope porasta energije. Uzevši to u obzir, stvarni popis pripremnih ispitivanja može uključivati rutinska ispitivanja prema bilo kojem standardu, kao i druga ispitivanja prema zahtjevu kupca. Uz rutinska ispitivanja, koja su provedena na potpuno sastavljenom transformatoru, provedena su i određena preventivna dijagnostička ispitivanja kako bi se dobili dodatni podaci o ponašanju transformatora. Konkretno, jedan od ciljeva ispitivanja je dokazati da se kvar nije proširio na druge sekcije aktivnog dijela pa je tako poželjno uključiti svako specifično ispitivanje koje

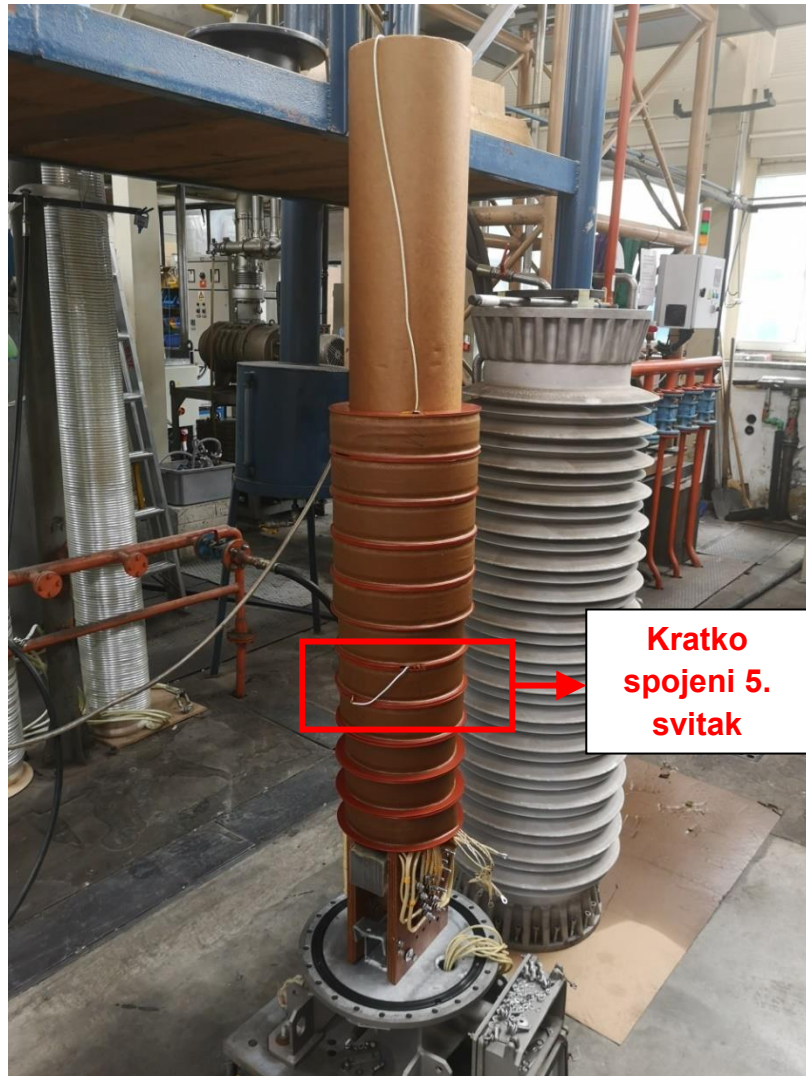
može potvrditi (ili opovrgnuti) tu činjenicu. Cjelovit popis pripremljenih ispitivanja dan je u tablici 9.

Tablica 9. Pripremna ispitivanja

Vrsta ispitivanja	Opis ispitivanja	Primjedba
Rutinska ispitivanja prije otvaranja transformatora	Ispitivanje izolacije stranim izmjeničnim naponom	-
	Ispitivanje izolacije induciranim naponom	-
	Mjerenje parcijalnih izbijanja	-
	Mjerenje kapaciteta i faktora dielektričkih gubitaka	-
	Provjera oznaka i polariteta	-
	Mjerenje pogrešaka	-
	Ispitivanje brtvljenja transformatora	-
Ispitivanja pri sniženom naponu uz otvoren transformator	Mjerenje struje magnetiziranja I_{RP}	Referentna vrijednost za utvrđivanje omjera struja kvara
	Mjerenje kapaciteta i faktora dielektričkih gubitaka svake sekcije	Koristi se za procjenu utjecaja kvara na sustav glavne izolacije
	Mjerenje otpora svake sekcije	Koristi se za procjenu utjecaja kvara na primarni namot
	Mjerenje struja kvara I_{CP} i I_{FP}	Detaljnije objašnjeno u poglavlju 5
Ispitivanja na montiranom i zatvorenom transformatoru uz kratko spojeni svitak	Mjerenje pogrešaka	Koristi se za usporedbu s rezultatima dobivenim tijekom rutinskog ispitivanja
	Mjerenje kapaciteta i faktora dielektričkih gubitaka	Koristi se za usporedbu s rezultatima dobivenim tijekom rutinskog ispitivanja
	Mjerenje struje kvara I_{FP}	Koristi se za usporedbu s rezultatima dobivenim tijekom verifikacije snage kvara

Nakon što su provedena sva inicijalna ispitivanja i nakon što je utvrđeno i potvrđeno mjesto kvara s najvećom oslobođenom energijom, odabrani svitak (u ovom slučaju svitak broj 5) je kratko spojen kao što je prikazano na slici 26, a transformator je sastavljen i napunjen uljem. Osim toga, transformator je opremljen kalibriranim manometrom tako da se tijekom ispitivanja može pratiti vrijednost tlaka u transformatoru. Manometar je odabran prema vrijednosti tlaka za koju je dizajnirano kućište transformatora. U ovom trenutku moguće je uključiti i

druge uređaje za praćenje stanja transformatora (primjerice temperaturne sonde, optičke senzore ili sustave za nadzor transformatora), ali oni nisu nužni za uspješan završetak ispitivanja.

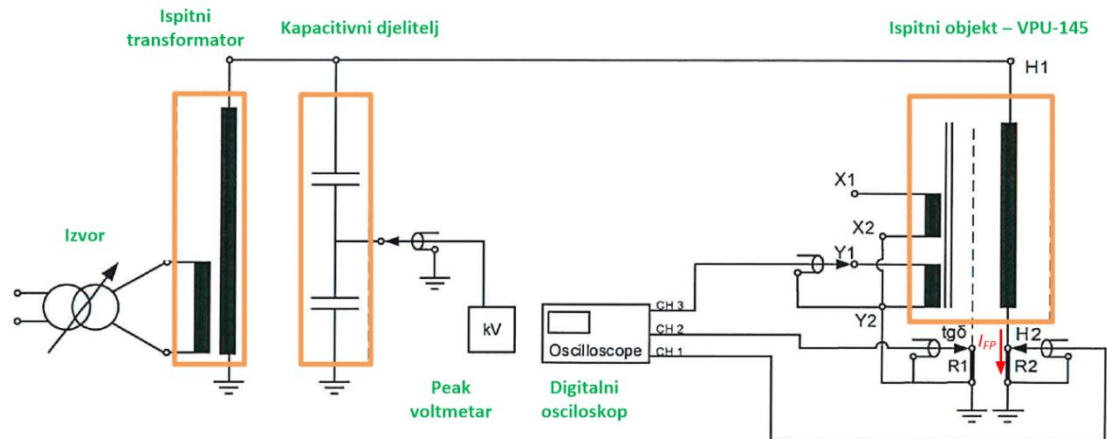


Slika 26. Aktivni dio transformatora s kratko spojenim 5. svitkom

Prije nego što je započeto glavno ispitivanje, na kompletiranom transformatoru provedena su dodatna ispitivanja prema tablici 9 kako bi se dobio uvid u ponašanje transformatora nakon što mu je kratko spojena kritična sekcija te utjecaj na točnost transformatora, struju kvara I_{FP} , kapacitet i faktor dielektričkih gubitaka. Očekivano, vrijednost struje I_{FP} bila je gotovo identična onoj izmjerenoj mjerenjem na otvorenoj jedinici. Također, nije bilo mjerljivog utjecaja na mjerenje kapaciteta i faktora dielektričkih gubitaka budući da je većina primarnog namota kratko spojena tijekom ovog mjerenja. Zabilježena su odstupanja u postotnoj i faznoj pogrešci, ali samo za utjecaj kratko spojene sekcije.

7.2. Tijek ispitivanja na prototipu transformatora

Potpuno sastavljen transformator prevezen je u laboratorij gdje se trebalo izvršiti ispitivanje. Ispitni krug prikazan je na slici 27.



Slika 27. Mjerni krug za ispitivanje na unutarnji kvar

Korištena mjerna oprema uključuje Haefely 750 kV kapacitivni djelitelj SN: 570187, voltmetar za mjerenje vršnih vrijednosti (peak) Končar RV-150 SN: 001 i digitalni osciloskop Tektronix DPO 4054 SN: C022599. Iako je jedan od uvjeta uspješnog ispitivanja da transformator ostane netaknut, zbog sigurnosti opreme mjerni krug formiran je tako da se transformator nalazio izvan laboratorija, slika 28.



Slika 28. Fotografija mjernog kruga

S obzirom na očekivano odvajanje transformatora od visokog napona odvajanjem zaštitnika s visokonaponskim priključkom, zaštitnik je pričvršćen užetom kako bi se zadržao unutar razumnog radijusa oko transformatora. Bitno je naglasiti da je uloga užeta bila prvenstveno zaštita osoblja, opreme i cjelokupnog prostora koji se nalazio u blizini transformatora. Tijekom pripreme i ispitivanja stavljen je velik naglasak na sigurnost jer se radilo o prvom takvom ispitivanju. U stvarnosti bi, tijekom kvara u pogonu, zaštitnik ostao pričvršćen za sabirnicu.

7.3. Rezultati ispitivanja

Jednom kad je priprema za ispitivanje završena, a ispitni krug kompletiran, na visokonaponski priključak transformatora primijenjen je nazivni napon. Tijekom trajanja ispitivanja kontinuirano se mjerila primarna struja I_{FP} i narinuti napon. Budući da je transformator zatvoren i nije moguć pristup svitcima primarnog napona, struja I_{CP} ne može se mjeriti tijekom ovog ispitivanja. Tlak u kućištu transformatora zabilježen je pomoću kamere montirane na ugrađeni manometar. Tablica 10 prikazuje vremenski slijed svih zabilježenih vrijednosti praćenih parametara.

Tablica 10. Vremenski slijed ispitivanja

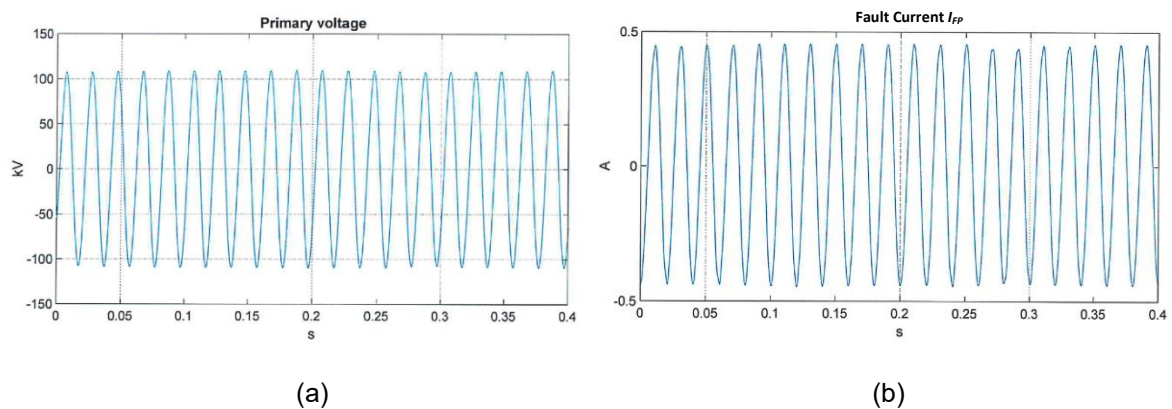
Relativno vrijeme / min	Primarni napon / kV	I_{FP} / mA	Tlak / bar	Opis
0:00	8	37	0	Primarni napon je narinut.
1:15	78	376	0	Dostignut nazivni napon.
2:03	78	342	0,1	Početak porasta tlaka.
2:19	78	309	1	-
2:32	78	299	2	-
3:18	22	346	4	-
3:21	-	-	4,1	Zaštitnik odspojen od visokog napona.

Gotovo trenutno nakon što je narinut napon membrana je počela ekspanzirati, što je vidljivo na pokazivaču smještenom na zaštitniku transformatora. Slika 29 prikazuje položaj membrane na početku ispitivanja i u trenutku dostizanja maksimalnog položaja.



Slika 29. Položaj membrane: lijevo - početni, desno - maksimalni

Trenutak kad je membrana došla u svoj maksimalni položaj i počela pritiskati zaštitnik transformatora je trenutak kad je manometar počeo bilježiti porast tlaka (2:03 min). U ovom trenutku zabilježeni su oscilogrami primarnog napona i struje kvara I_{FP} (slika 30).



Slika 30. Oscilogram u trenutku 2:03 minute od početka (a) primarni napon (b) struja I_{FP}

3 minute i 21 sekundu od početka ispitivanja, pri tlaku od 4,1 bar, zaštitnik se odvojio od transformatora i odspojio transformator s visokog napona. Stanje ispitnog objekta prije i nakon eskalacije prikazano je na slici 31.



(a)



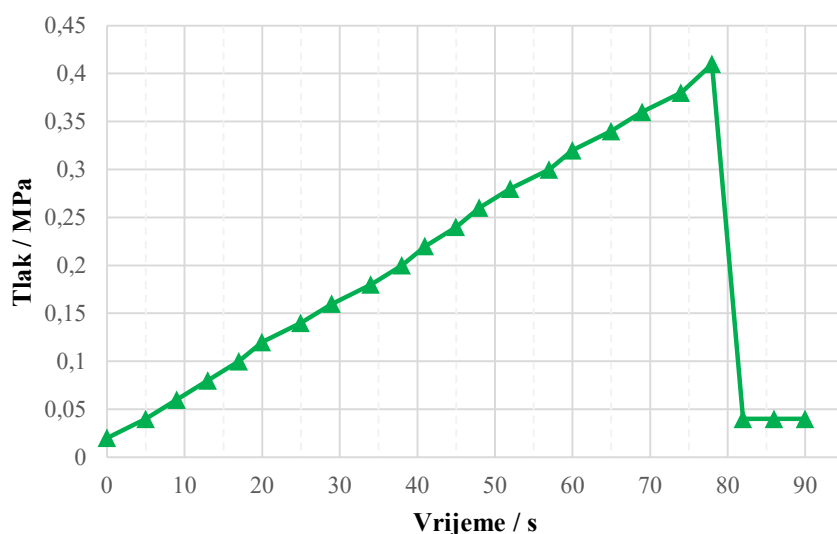
(b)

Slika 31. Stanje ispitnog objekta (a) na početku ispitivanja (b) nakon završetka ispitivanja

Ispitivanje je dovršeno bez neočekivanih i nasilnih događaja, izlivanja ulja ili požara, s cijelim volumenom ulja i generiranih plinova zadržanim unutar dilatacijske membrane. Otpuštanje tlaka kompenzirano je odvajanjem zaštitnika i deformacijom membrane, nakon čega je vrijednost tlaka kojeg je mjerio manometar pala na nulu. Ovakvo ponašanje zabilježeno je i kod drugih transformatora ovog dizajna, u laboratorijskim uvjetima i u pogonu, [5], [8] i [9].

Na temelju rezultata moguće je jednostavnim umnoškom proračunate stope porasta energije iz potpoglavlja 5.1 i trajanja ispitivanja (201 sekunda) odrediti ukupnu energiju kvara kojoj je transformator bio izložen te ona iznosi približno 1,55 MJ. U usporedbi s dostupnim podacima oslobođena energija kvara do 20 puta je manja od tipičnih vrijednosti, [1], [11], [13] i [17]. Nadalje, bitno je napomenuti da takva energija neće ugroziti tipičan dizajn transformatora odnosno njegovo kućište i izolator. Može se zaključiti da je jednako važno raspodijeliti energiju kvara tijekom vremena kao i ograničiti njezinu ukupnu oslobođenu količinu.

Ovim testom dokazano je da dizajn omogućuje postupno oslobađanje energije umjesto nasilnog i trenutnog naleta. To je dodatno potvrđeno brzinom porasta tlaka, prikazanom na slici 32. Ona je za ispitani transformator iznosila 0,005 MPa/s, što je od 200 do čak nekoliko tisuća puta sporije u usporedbi s podacima dostupnima u referencama [11] i [13]. Kako bi se promatrani tip kvarova mogao kontrolirati, potrebno je usporiti njegovu propagaciju i kulminaciju, što sekcioniрани dizajn omogućuje, a provedeno ispitivanje potvrđuje.

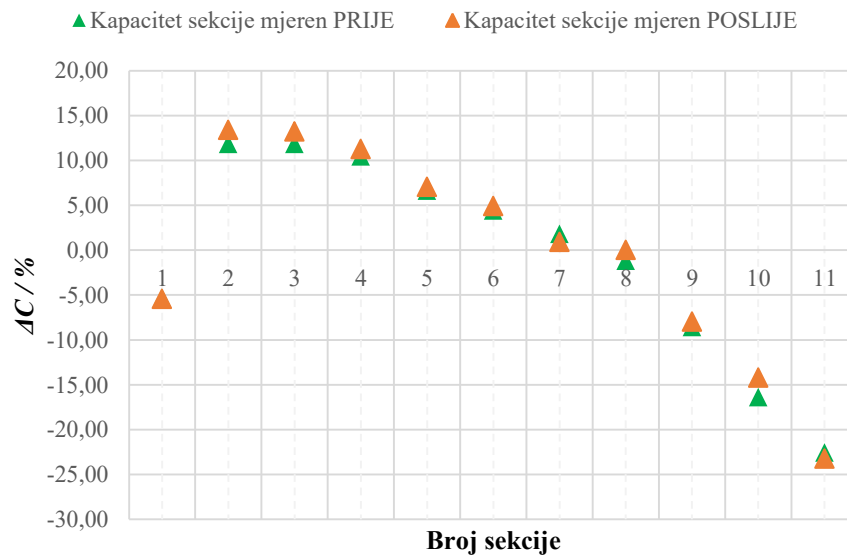


Slika 32. Porast tlaka tijekom ispitivanja

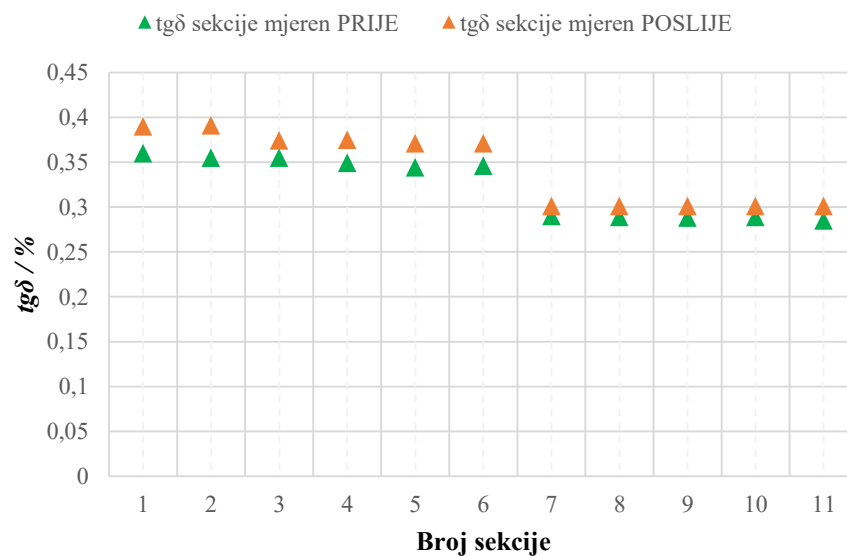
7.4. Defektaža transformatora

Kako bi se uspješno završilo ispitivanje, potrebno je evaluirati posljedice unutarnjeg kvara kako bi se procijenilo je li kvar ugrozio funkcionalnost bilo koje sekcije aktivnog dijela osim one u kojoj je iniciran. Analiza posljedica ispitivanja sastoji se od dva koraka: dijagnostičkih ispitivanja i post-mortem analize.

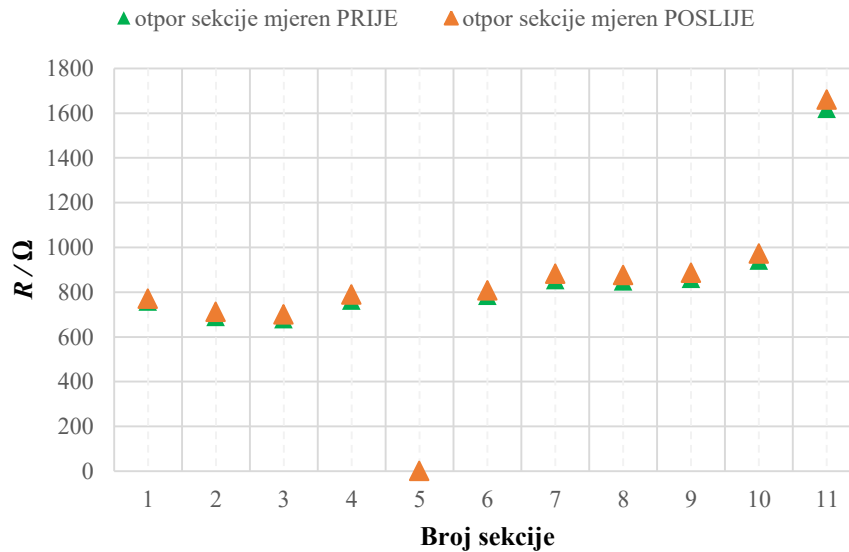
Dijagnostička ispitivanja odgovaraju ispitivanjima navedenim u tablici 9 u poglavlju 6.1. Rezultati tih ispitivanja prikazani su na slici 33 i u tablici 11.



(a)



(b)



(c)

Slika 33. Usporedba mjerenih vrijednosti prije i poslije ispitivanja na unutarnji kvar: (a) kapaciteta sekcija glavne izolacije, (b) faktora dielektričnih gubitaka sekcija glavne izolacije, (c) otpora pojedine sekcije

Tablica 11. Usporedba točnosti mjernog transformatora i mjerene struje kvara prije i poslije ispitivanja na unutarnji kvar

Izmjerena vrijednost	Prije	Poslije
Naponska pogreška [%] @ 0 VA	-6,27	-6,32
Kutna pogreška [min] @ 0 VA	124,3	125,6
I_{FP} / I_{RP}	3,27	3,43

Iz dijagrama usporedbe mjerenih vrijednosti parametara glavne izolacije, kapaciteta i faktora dielektričnih gubitaka pojedine sekcije, vidljivo je da su vrijednosti gotovo nepromijenjene u odnosu na vrijednosti prije ispitivanja. Kapacitet pojedine sekcije promijenio se u prosjeku za manje od 1 % (slika 33 (a)), a faktor gubitaka za 6 % (slika 33 (b)). To znači da je sustav glavne izolacije ostao neoštećen i nije izgubio svoju funkcionalnost. Slično vrijedi i za izmjerene vrijednosti otpora pojedinog svitka primarnog namota, gdje prosječno odstupanje ne prelazi 3 % (slika 33 (c)), što je indikator da je i primarni namot (izuzevši svitak broj 5) ostao neoštećen. Kod provjere točnosti mjernog transformatora, odnosno

naponske i fazne pogreške, nisu zabilježena gotovo nikakva odstupanja u odnosu na mjerenja prije samog ispitivanja. Naravno, kod oba rezultata postoji odstupanje u odnosu na vrijednosti mjerene na „zdravom“, ali ta odstupanja nastala su zbog promjene broja zavoja primarnog namota do koje je došlo kratkim spajanjem kritične sekcije. Osim toga, svaka sekcija ispitana je izmjeničnim naponom od 2,5 kV tijekom jedne minute kako bi se detektiralo moguće grubo oštećenje koje bi uspostavilo vodljivi put između susjednih sekcija. Međutim, nisu utvrđena oštećenja ili nepravilnosti ni tijekom ovog ispitivanja. Zaključak je da nema dielektričnih dokaza o oštećenju bilo koje od sekcija aktivnog dijela.

Post-mortem analiza transformatora započinje vizualnim pregledom njegovog aktivnog dijela, prikazanog na slici 34.



Slika 34. Aktivni dio transformatora nakon ispitivanja

Na slici je vidljivo da je došlo do toplinskog oštećenja na svitku broj 5, kako je i očekivano. Vodič korišten za kratko spajanje svitka ima tragove pregrijavanja na vanjskoj izolaciji, ali sam vodič nije oštećen ni deformiran što znači da je adekvatno odabran za tu ulogu. Ostatak aktivnog dijela nema vidljivih oštećenja, svi spojevi i vodiči su pregledani, kao i učvršćivači, stezaljke i spojnice. Na dnu transformatora pronađeni su crni ostaci, koji su identificirani kao talog iz ulja nastao zbog iniciranog kvara. Na sekundarnom namotu i jezgri nisu pronađena nikakva oštećenja.

Nakon što je primarni namot uklonjen s aktivnog dijela, na izolacijskom cilindru uočena su manja onečišćenja nastala zaostalom toplinom generiranom od strane kratko spojenog svitka, slika 35 (a). Kako bi se potvrdilo da zaista nema nikakvog drugog oštećenja cilindra, detaljno su pregledani svi slojevi papira i kapacitivne obloge glavne izolacije, slika 35 (b). Time je utvrđeno da su pronađeni tragovi gorenja isključivo limitirani na završnu bandažu koja nema funkciju glavne izolacije te nisu ugrozili funkcionalnost izolacijskog cilindra.



(a)



(b)

Slika 35. Detaljan pregled izolacijskog cilindra

Sljedeći korak post-mortem analize transformatora bila je detaljna provjera svih svitaka primarnog namota u potrazi za mogućim vidljivim oštećenjima. Pregledom je potvrđeno da je jedini oštećeni svitak onaj koji je bio kratko spojen, svitak broj 5. Preostali svitci nisu imali nikakvih oštećenja, što je vidljivo na slici 36, gdje su prikazani oštećeni peti svitak i njemu susjedni, četvrti i šesti svitci.

**Slika 36. Usporedba oštećenja na petom svitku sa zdravim četvrtim i šestim svitkom**

Peti svitak ozbiljno je toplinski oštećen prilikom ispitivanja. Međuslojna izolacija potpuno je pocrnjela, a lak vodiča vidljivo oštećen, što potvrđuje i mjerenje otpora pri kojem je ustanovljeno da je otpor svitka praktički nemjerljiv. Okvir svitka vidljivo je nagorio od posljedica toplinskog oštećenja, ali samo s unutarnje strane, što znači da generirana toplinska energija nije bila dovoljna da ga uništi i ugrozi dielektričku izolaciju susjednih sekcija. Spojno mjesto svitka i odgovarajuće kapacitivne obloge ostalo je neoštećeno. Također, galvanska veza između obloge i svitka je ostala neoštećena. Preostali svitci ostali su potpuno zdravi, nije bilo oštećenja na bakru kao ni tragova na unutarnjoj i vanjskoj izolaciji.

Na kraju su provjerene sve strukturne komponente: izolator, kućište, sekundarni priključci, izvodi, itd. Osim zaštitnika i membrane, koji su planirano korišteni za otpuštanje tlaka, sve ostale komponente nisu imale znakove termičkog oštećenja ili tragove unutarnjeg luka. Dakle, osim otpuštanja tlaka, kvar se zaista zadržao samo na kratko spojenoj sekciji aktivnog dijela.

8. Načini minimiziranja pojavnosti eksplozije u pogonu

U uvodnim poglavljima bilo je govora o sigurnosti mjernih transformatora i njezinoj važnosti tijekom životnog vijeka transformatora u pogonu. Postoji više načina kako smanjiti mogućnost pojave unutarnjih kvarova koji mogu dovesti do eksplozije u pogonu.

8.1. Dizajn aktivnog dijela i kućišta

Prvi način svakako je dizajn aktivnog dijela transformatora, koji je okosnica ovog rada i o kojemu je bilo govora u prethodnim poglavljima.

Uz dizajn aktivnog dijela, sigurnost transformatora povećava i adekvatan dizajn njegovih konstrukcijskih komponenti prvenstveno izolatora i kućišta. S obzirom na to da je dizajn transformatora zadaća proizvođača mjernih transformatora, na njemu je i odgovornost odabira kvalitetnih komponenti koje odgovaraju sigurnosnim zahtjevima. Ovdje je važno napomenuti da su sigurnosni zahtjevi pojedinih projekata često vrlo različiti, i ovise o mnogim faktorima kao što su ekstremni klimatski uvjeti, seizmičko područje u kojem se nalazi trafostanica, sklopne operacije koje se odvijaju u trafostanici u neposrednoj blizini ili, ponekad, na samom mjernom transformatoru. Sa svim tim uvjetima proizvođač mora biti pravovremeno upoznat i uzeti ih u obzir prilikom dizajna jer oštećenja koja zbog njih mogu nastati mogu uzrokovati ili ubrzati nastanak kvara koji može dovesti do rasprsnuća (eksplozije) i požara.

Međutim, čak i prije bilo kakvih vanjskih faktora koji mogu dovesti do oštećenja konstrukcijskih komponenti, potrebno je poznavati načine i dosege unutarnjih kvarova koji ih mogu značajno oštetiti. Kao što je spomenuto ranije, svaki unutarnji kvar na papirno-uljnoj izvedbi mjernih transformatora dovodi do generacije topline i plinova koji zagađuju izolaciju time ubrzavajući kvar i povećavaju volumen ulja i posljedično tlak u transformatoru. Kada transformator ne bi imao nikakvu mogućnost otpuštanja tlaka, najprije bi nastradala ona komponenta koja ima najmanju vrijednost tlaka za koji je dimenzionirana i koja se nalazi najbliže mjestu kvara u transformatoru.

Kako bi se spriječio takav scenarij i izbjeglo nekontrolirano otpuštanje tlaka rasprsnućem neke od strukturnih komponenti, transformatori se često dimenzioniraju tako da imaju oslabljeno mjesto na kojem se očekuje otpuštanje tlaka u slučaju kvara. Takvo mjesto uobičajeno ima i do nekoliko puta niži tlak loma od ostalih komponenti. Jedan od primjera je dimenzioniranje zaštitnika za odvajanje od transformatora i automatsko odspajanje s izvora napona, čije je djelovanje opisano i kroz ovaj rad. Različiti proizvođači imaju različita rješenja pa tako postoje tlačni odušnici koji se obično smještaju na kotao transformatora čiji čep u slučaju prekomjernog porasta tlaka izleti sa svog mjesta i omogućava ventilu otpuštanje tlaka. Također, primjenjuju se i tzv. rasprskavajući diskovi koji se smještaju na kućište u blizinu najvjerojatnijeg mjesta kvara.

Naravno, osnovna pretpostavka kod svih ovih rješenja je da proizvođač ima mogućnost točnog lociranja mjesta kvara (koji je izgledan i ima veliku stopu porasta energije kvara) i adekvatnog pozicioniranja komponente za otpuštanje tlaka. Kao što je adresirano u drugom poglavlju ovog rada, to najčešće nije slučaj.

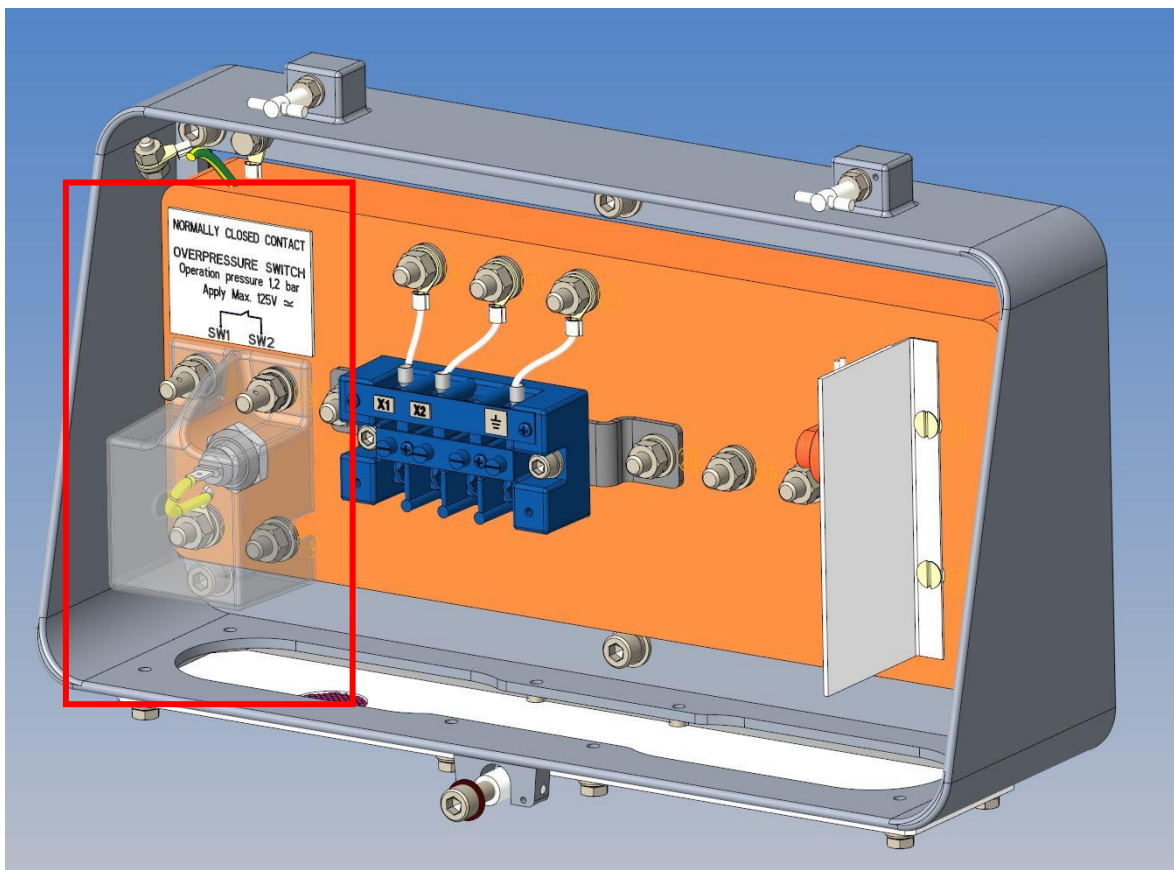
8.2. Monitoring transformatora i tlačna sklopka

Komponente opisane u prethodnom potpoglavlju zapravo bi trebale biti rješenja u slučajevima kada nema drugih opcija, odnosno njihova uloga nije spriječiti ili usporiti kvar nego ublažiti posljedice kvara tako da se minimizira nastala šteta. Iako još uvijek poprilično nestandardan kod mjernih transformatora, sve više svoje mjesto i primjenu pronalazi nadzor transformatora (eng. *monitoring*). Dakako, tu nema govora o kompleksnijim sustavima monitoringa kao što je to slučaj s energetske transformatorima, već se radi o zasebnim kontinuiranim mjerenjima koja daju informaciju o stanju transformatora.

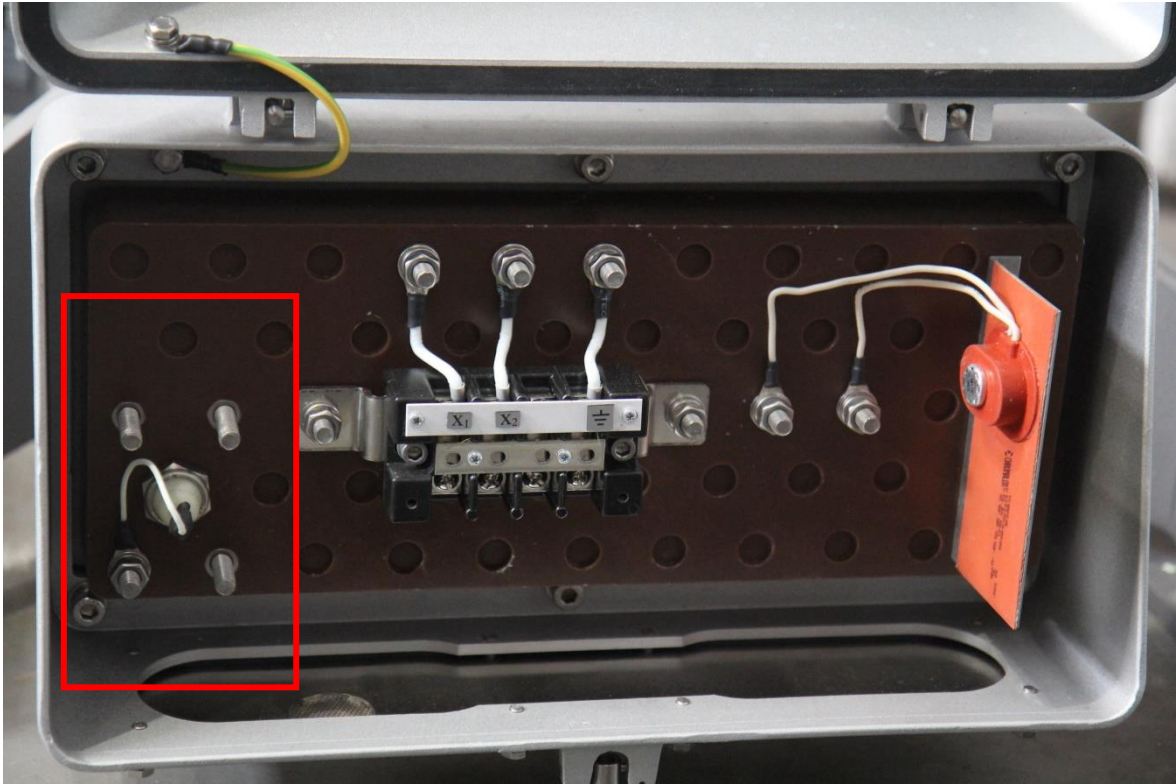
Monitoring mjernih transformatora uključuje kontinuirano mjerenje kapaciteta i faktora dielektričkih gubitaka, snimanje tranzijentnih pojava na transformatoru (eng. *transient recording*) i monitoring tlaka ulja u transformatoru. Monitoring tlaka ulja u transformatoru može imati jednu od dvije uloge: detekciju curenja ulja (pad tlaka) i detekciju kvara (porast tlaka). S obzirom na to da je curenje ulja dugotrajan proces koji se obično otkrije tijekom redovitih pregleda transformatora tijekom remonta i teško može dovesti do eksplozije, monitoring tlaka ulja u transformatoru prvenstveno se koristi za detekciju kvara.

Ispitivanje na unutarnji kvar pokazalo je da je vrijeme koje protekne od trenutka narinuća napona do kulminacije kvara vrlo kratko, svega nekoliko minuta. Međutim, treba uzeti u obzir da je prikazano ispitivanje demonstracija najgoreg slučaja kvara – onog u kojem je oštećeni svitak otpočetak kratko spojen. U pogonskim uvjetima situacija će najčešće biti povoljnija pa će za napredovanje kvara do kulminacije trebati od nekoliko sati do nekoliko dana ili čak mjeseci. Ovaj period ukazuje na to da je monitoring tlaka vrlo opravdan izbor kako bi se spriječilo da do kulminacije kvara uopće dođe.

Kada se radi o kontinuiranom praćenju tlaka, postavlja se pitanje je li potrebno pratiti i snimati apsolutni iznos tlaka u transformatoru ili je dovoljna informacija samo o trenutku u kojem tlak počinje rasti. Ako je poznato da je uređaj koji daje signal o porastu tlaka znatno jednostavniji, a time i jeftiniji, nema dvojbe da je on zapravo bolji izbor. Upravo takav jedan uređaj je tlačna sklopka, prikazana na slici 37.



(a)



(b)

Slika 37. Tlačna sklopka (a) model (b) fotografija

Tlačna sklopka jednostavan je i robustan uređaj koji dojavljuje prekomjerni tlak u transformatoru. Može imati jedan od dva načina prorade sklopke: NOC – normalno otvoreni kontakti (eng. *normally open contacts*) i NCC – normalno zatvoreni kontakti (eng. *normally closed contacts*). U oba načina rada princip je jednak, kad nadtlak u transformatoru naraste iznad proradne vrijednosti za koju je dimenzionirana sklopka, sklopka se ili zatvara (NOC sklopka) ili otvara (NCC sklopka) i tako daje signal o prekomjernom tlaku u transformatoru. Proradni nadtlak tlačne sklopke odabire se posebno za svaki pojedini tip mjernog transformatora. Razlog tome je hidrostatski tlak u samom transformatoru koji nastaje zbog njegovih dimenzija, prvenstveno visine jer su mjerni transformatori vitki. Što je transformator viši, njegov hidrostatski tlak je veći te je u njega potrebno ugraditi sklopku s višim proradnim nadtlakom. Upravo zbog toga, postoji više nivoa prorade tlačne sklopke.

Kada govorimo o signalu koji tlačna sklopka šalje u trenutku porasta nadtlaka iznad proradne vrijednosti, on može biti jednostavan u obliku lampice ili alarma, a može biti i povezan sa složenijim sustavom nadzora u trafostanici, gdje operater

ima mogućnost automatskog ili ručnog isključenja transformatora u kvaru iz pogona.

Ranije je spomenuto da je većina unutarnjih kvarova koji nastaju kod naponskih transformatora s otvorenom jezgrom (induktivnih i transformatora velike snage) spora u progresiji, tako da pravovremena signalizacija o prekomjernom porastu tlaka u transformatoru može biti indikacija da je došlo do kvara znatno prije nego što dođe do njegove kulminacije. To omogućava pravovremenu reakciju i isključenje transformatora u kvaru čak i prije nego što nastanu trajna oštećenja. Također, to ostavlja mogućnost popravka ili zamjene oštećene jedinice, te brz i efikasan nastavak normalnog pogona trafostanice.

9. Zaključak

U ovom radu prikazani su i pojašnjeni benefiti sekcioniranog aktivnog dijela u vidu povećane pogonske sigurnosti transformatora s takvim dizajnom i njihove otpornosti na pojavu unutarnjih kvarova. Kao što je spomenuto u uvodnim poglavljima, službena literatura i važeći standardi još uvijek ne definiraju jasno zahtjeve za ispitivanje na unutarnji kvar transformatora koji svojim dizajnom ograničavaju razvoj takvih kvarova. Upravo je zbog toga predložena sekvenca i kriteriji ispitivanja transformatora pomoću kojih bi njihov dizajn bio verificiran kao siguran od pojave unutarnjih kvarova velike snage.

Predložena sekvenca uključuje sve potrebne korake: odabir mjesta kvara s najvećom stopom porasta energije, pripremu ispitnog objekta, izvođenje ispitivanja te analizu posljedica ispitivanja. Glavna prednost predložene metode je u tome što daje najnepovoljnije mjesto kvara, koje se može točno utvrditi proračunom te se ne prepušta interpretaciji proizvođača. Priprema i ispitivanje transformatora ovom metodom vrlo su jednostavni i uključuju otprije poznata ispitivanja i mjerenja na naponskim transformatorima, što ga čini dostupnijim za provedbu od klasičnog ispitivanja na unutarnji kvar koje je vrlo komplicirano i skupo. Također, veća dostupnost i jednostavnost ispitivanja otvaraju mogućnost daljnjih istraživanja dizajna koji ograničava nastanak i propagaciju unutarnjih kvarova, te proširenje lepeze ispitanih transformatora po tipu i naponskom nivou.

Jednostavan numerički model pokazan u ovom radu verificiran je mjerenjima kao vrlo točan i pouzdan alat za određivanje najnepovoljnijeg mjesta kvara i proračun stope porasta energije kvara. Također, pokazano je kako upravo numerički proračun omogućuje provjeru i drugih parametara koji mogu biti važni kod unutarnjih kvarova, primjerice za analizu utjecaja iznosa i karaktera tereta kod kvarova naponskih transformatora velike snage. Vrlo bitan zaključak je da priključeni teret, bez obzira na iznos i faktor snage, ne utječe drastično na snagu kvara, što znači da će se transformator u slučaju unutarnjeg kvara ponašati dovoljno slično bez obzira na to što je priključeno na stezaljke njegovog sekundarnog namota. Ova informacija je izrazito bitna i iz pogonskog aspekta, ali i za planiranje i provedbu ispitivanja na unutarnji kvar jer je evidentno da nije potrebno uključiti teret, čime se ispitni krug drastično pojednostavljuje.

Svi navedeni koraci predloženog slijeda ispitivanja detaljno su opisani na primjeru naponskog transformatora od 145 kV, koji je posebno odabran zbog najveće stope porasta energije u cijelom asortimanu proizvoda. Ispitni objekt bio je podvrgnut najgorem slučaju kvara i uspješno je ispunio predložene kriterije za verifikaciju dizajna. Uspješan završetak slijeda ispitivanja opisanog u poglavlju 4 potvrđuje da je transformator dizajniran na način koji ograničava razvoj i propagaciju unutarnjeg kvara, odnosno smanjuje njegovu snagu. Točnije, ispitivanje i naknadna defektaža ispitanog transformatora potvrdili su da je dizajn transformatora spriječio da se nastali kvar proširi na više od jedne sekcije aktivnog dijela. Posljedično, time se eliminirala mogućnost kulminacije kvara zbog povećanog oslobađanja energije i tlaka, čime je spriječen nasilni završetak ispitivanja.

Zaključno vrijedi reći da koncept sekcioniranog primarnog namota doprinosi smanjenju stope porasta energije kvara i općenito pogonskoj sigurnosti transformatora, što je potvrđeno i u okviru ovog rada, te je u skladu s vodećim trendovima u transformatorskoj industriji koji stavljaju izražen naglasak na sigurnost pogona, sprječavanje katastrofalnih kvarova i ograničavanje njihovih učinaka i posljedica.

10. Literatura

- [1] Working Group A3.06 CIGRE, *Final report of the 2004-2007 international enquiry on reliability of high voltage equipment. Part 4 – Instrument transformers*, Cigre Brochure 512, 2012.
- [2] IEC 61869-1:2007, MOD; EN 61869-1:2009, *Instrument Transformers - Part 1: General Requirements*, 2009.
- [3] IEEE C57.13, *IEEE Standard for performance and test requirements for instrument transformers of a nominal system voltage of 115 kV*, IEEE Std C57.13.5-2019, 2020.
- [4] IEC/IEEE 63253-5713-8 ED1, *Station Service Voltage Transformers (SSVT)*, Draft, 2020.
- [5] M. Poljak, B. Bojanić, *Method for the reduction of in-service instrument transformer explosions*, European Transactions on Electrical Power, 2010., stranice od 927. do 937.
- [6] V. Bego, *Mjerni transformatori*, Zagreb, 1977.
- [7] M. Poljak, B. Bojanić, *Kako spriječiti eksplozije mjernih transformatora*, HRO Cigre, Cavtat, Hrvatska, studeni 2007.
- [8] I. Žiger, D. Krajtner, B. Bojanić, *Internal fault performance of instrument transformers with sectioned active part*, International Colloquium Transformer Research and Asset Management, Opatija, Hrvatska, listopad 2019.
- [9] D. Krajtner, B. Bojanić, I. Žiger, Z. Ubrekić, *Pogonska verifikacija sigurnosti od eksplozije visokonaponskih mjernih transformatora*, HRO Cigre, Šibenik, Hrvatska, studeni 2015.
- [10] I. Žiger, D. Krajtner, Z. Ubrekić, *Pushing the boundaries of inductive voltage transformer design*, International Colloquium Transformer Research and Asset Management, Split, Hrvatska, listopad 2014.
- [11] J.M. Nogueiras, *Safety in the operation of oil-paper instrument transformers*, 47th Session of CIGRE, Pariz, Francuska, kolovoz 2018.
- [12] N.Y. Abed, O.A. Mohammed, *Modeling and characterization of transformers internal faults using finite element and discrete wavelet transforms*, IEEE

-
- Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 4, travanj 2007., stranice od 1425. do 1428.
- [13] X. Yang, J. Guan, C. Lin, D. Zhou, C. Ke, W. Chen, Z. Hao, *Dynamic Pressure Analysis and Protection of Transformer in Internal Arcing Fault by FEM*, International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Changsha, Kina, studeni 2015.
- [14] C. Yan, Z. Hao, B. Zhang, T. Zheng, S. Zheng, G. Chao, X. Yang, D. Zhou, *Simulation and Analysis of Power Transformer Internal Arc in Faults Overpressure Characteristics*, International Conference on Power System Technology (POWERCON 2014), Chengdu, Kina, listopad 2014.
- [15] D. Krajtner, I. Žiger, Z. Ubrekić, B. Bojanić, *Energetski naponski transformator i njegova primjena*, HRO CIGRE, Cavtat, Hrvatska, studeni 2013.
- [16] I. Žiger, B. Bojanić, D. Krajtner, *Power Voltage Transformers – Expanding Beyond Station Service*, 2015 IEEE PES General Meeting, 2015., Denver, SAD, stranice od 1. do 5.
- [17] S. Brodeur, H. Dinh, *A Station Service Voltage Transformer Designed and Tested to Withstand a Severe Internal Arc Fault*, Proc. 2019 CIGRE Canada Conference, Montreal, Quebec, rujan 2019.
- [18] CAN/CSA C60044-2:2007, *Instrument Transformers – Part 2: Inductive Voltage Transformers*, 2007.
- [19] MagNet and MotorSolve BLDC: Electromagnetic field simulation software, svibanj 2017., dostupno na poveznici: <http://www.infologicdesign.co.uk>

Sažetak

Rad prikazuje i pojašnjava benefite transformatora sa sekcioniranim aktivnim dijelom u vidu povećanja pogonske sigurnosti. Službena literatura i važeći standardi još uvijek ne definiraju jasno zahtjeve za ispitivanje na unutarnji kvar transformatora koji svojim dizajnom ograničavaju razvoj takvih kvarova, zbog čega je predložena sekvenca i kriteriji ispitivanja transformatora pomoću kojih bi njihov dizajn bio verificiran kao siguran od pojave unutarnjih kvarova velike snage.

Svaki korak predloženog slijeda ispitivanja detaljno je razmotren i prikazan na dva tipa transformatora sa sekcioniranim aktivnim dijelom, induktivnom naponskom transformatoru i transformatoru velike snage. Rad je rezultat opsežnog istraživanja s ciljem razvoja i specifikacije adekvatnih rutinskih, tipskih i specijalnih ispitivanja za verifikaciju dizajna mjernih transformatora s papirno-uljnom izolacijom, koji ograničava energiju unutarnjeg kvara.

Ključne riječi: induktivni naponski transformator, transformator velike snage, ispitivanje na unutarnji kvar, analiza kvarova, koncept otvorene jezgre, sekcionirani aktivni dio, metoda konačnih elemenata

Summary

The thesis presents and explains the benefits of transformers with sectioned active part in the form of increased operational safety. The official literature and current standards still do not clearly define the requirements for internal failure testing of transformers with energy-limiting designs. That is why the sequence and criteria for testing transformers to verify their design as safe from high energy internal failures is proposed.

Every step of the proposed test sequence is discussed in detail and presented on two types of transformers with sectioned active part, inductive voltage transformer and power voltage transformer. The paper is the result of extensive research with the aim of developing and specifying adequate routine, type and special testing sequences for qualifying paper-oil insulation systems that limit internal arc energy.

Keywords: inductive voltage transformer, power voltage transformer, internal arc testing, failure analysis, open-core concept, sectioned active part, finite element method

Životopis

Dora Gazivoda rođena je u Zagrebu, 16.12.1992., gdje je stekla osnovnoškolsko i srednjoškolsko obrazovanje. Preddiplomski studij završila je 2015. godine, a diplomski 2017. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu.

Od studenog 2017. godine zaposlena je u firmi Končar – Mjerni transformatori d.d. u Projektnom odjelu. Kao projektantica bavi se projektiranjem gotovo svih vrsta mjernih transformatora, uz naglasak na kapacitivne naponske transformatore, naponske transformatore velike snage i mjerne transformatore specijalne namjene.

Od upisa poslijediplomskog specijalističkog studija Transformatori 2019. godine, kroz neke od predmeta na studiju, počela se značajnije baviti tematikom unutarnjih kvarova naponskih transformatora. Autorica je dvaju članaka iz navedenog područja; jedan je stručni rad objavljen na savjetovanju nacionalnog ogranka Cigre, a drugi je objavljen na međunarodnoj platformi IEEE Access.

Hobiji su joj trčanje, filmovi i kuhanje.

Curriculum vitae

Dora Gazivoda was born in Zagreb on December 16, 1992, where she completed her elementary school and high school education. She completed her undergraduate studies in 2015, and her graduate studies in 2017 at the Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb.

Since November 2017, she has been employed at the company Končar – Instrument transformers Inc. in the Project Department. As an electrical design engineer, she designs almost all types of instrument transformers, with an emphasis on capacitor voltage transformers, power voltage transformers and special-purpose instrument transformers.

Since enrolling in the Postgraduate specialist study in transformers in 2019, through some of the subjects in the study, she has started to focus more significantly on the topic of internal failures of voltage transformers. She is the author of two articles in this field; one is a paper published at a conference of the national branch of Cigre, and the other is published on the international platform IEEE Access.

Her hobbies are running, movies and cooking.