



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17
2000 Maribor, Slovenija



Mitja Strmšek

UPORABA NAPETOSTNEGA MERILNEGA TRANSFORMATORJA KOT VIRA VISOKE NAPETOSTI

Diplomsko delo

Maribor, junij 2015



Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17
2000 Maribor, Slovenija



Diplomsko delo visokošolskega študijskega programa

UPORABA NAPETOSTNEGA MERILNEGA TRANSFORMATORJA KOT VIRA VISOKE NAPETOSTI

Študent: Mitja Strmšek
Študijski program: Visokošolski strokovni, Elektrotehnika
Smer: Močnostna elektrotehnika
Mentor: red. prof. dr. Jože Pihler
Somentor: mag. Darko Koritnik

Maribor, junij 2015



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17
2000 Maribor, Slovenija



Številka: E1011380

Datum in kraj: 22. 06. 2015, Maribor

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 46/2012)
izdajam

SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

1. **Mitji Strmšku**, študentu visokošolskega strokovnega študijskega programa **ELEKTROTEHNIKA**, smer **Močnostna elektrotehnika**, se dovoljuje izdelati diplomsko delo.
2. **MENTOR:** red. prof. dr. Jože Pihler
SOMENTOR: mag. Darko Koritnik, ICM TC
3. **Naslov diplomskega dela:**
UPORABA NAPETOSTNEGA MERILNEGA TRANSFORMATORJA KOT VIRA VISOKE NAPETOSTI
4. **Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:**
USAGE OF VOLTAGE MEASURING TRANSFORMER AS A HIGH VOLTAGE SOURCE
5. Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z "Navodili za izdelavo diplomskega dela" in ga oddati v treh izvodih (dva trdo vezana izvoda in en v spiralo vezan izvod) ter en izvod elektronske verzije do 30. 09. 2015 v referatu za študentske zadeve.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.

Dekan:

prof. dr. Borut Žalik



Obvestiti:

- kandidata,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti v arhiv.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju red. prof. dr. Jožetu Pihlerju za pomoč in nasvete pri izdelavi diplomskega dela.

Zahvaljujem se vsem zaposlenim v laboratoriju ICEM-TC za pomoč pri izvedbi praktičnega diplomskega dela. Prav tako se zahvaljujem somentorju mag. Darku Koritniku.

Posebna zahvala gre mojim staršem, ki so mi omogočili študij, me ob študiju podpirali in mi pomagali.

UPORABA NAPETOSTNEGA MERILNEGA TRANSFORMATORJA KOT VIRA VISOKE NAPETOSTI

Ključne besede: elektroenergetika, laboratorijski preskusi, visokonapetostni merilni transformator, vir visoke napetosti

UDK: 621.314.21(043.2)

Povzetek:

V diplomski nalogi je predstavljena uporaba napetostnega merilnega transformatorja kot vira visoke napetosti, ki je uporabljen v laboratoriju ICEM-TC. Sestavljena je bila ustrezna merilna proga, na kateri je mogoča izvedba meritev visokonapetostnih preskusov in preskusov delnih praznitev. Opisana je njegova zgradba, namen uporabe in delovanje. Podrobneje so predstavljeni rezultati meritev napetosti transformatorja in napetosti transformatorja z dodanimi kondenzatorji.

USAGE VOLTAGE MEASURING TRANSFORMER AS A SOURCE OF HIGH VOLTAGE

Key words: power engineering, laboratory testing, high voltage measuring transformer, source of high voltage

UDK: 621.314.21(043.2)

Abstract:

In diploma work is presented usage voltage measuring transformer as a source of high voltage, which is used in laboratory ICEM-TC. There was composed appropriate measuring conveyor, where is possible to perform measurement high voltage tests and partial discharges tests. There is described its structure, the purpose of use and operation. Precisely are presented the results of measurement voltage transformer and measurement transformer with added capacitors.

KAZALO

1. UVOD	1
2. ICEM – TC.....	3
2.1 MP1 – merilna proga za visokonapetostne meritve.....	4
3. INSTRUMENTNI TRANSFORMATORJI.....	14
3.1 Instrumentni merilni transformatorji	15
3.2 Instrumenti tokovni merilni transformator	16
3.3 Instrumentni napetostni merilni transformatorji.....	17
3.4 Izvedbe instrumentnih napetostnih merilnih transformatorjev.....	19
3.4.1 Epoksidni instrumentni napetostni merilni transformatorji.....	19
3.4.2 Oljni instrumentni merilni transformatorji	20
4. VISOKONAPETOSNI MERILNI TRANSFORMATOR VPU-123.....	22
4.1 Uporaba VPU-123 kot vira visoke napetosti.....	23
4.2 Delovanje v prostem teku.....	23
4.3 Zgradba visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU.....	25
4.4 Visokonapetostni kondenzatorji.....	29
4.5 Zahteve in omejitve visokonapetostnega vira	31
4.6 Preskus delovanja visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU-123.....	32
4.6.1 Rezultati meritev karakteristik visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU-123	33
4.6.2 Rezultati meritev karakteristik visokonapetostnega merilnega transformatorja z enim kondenzatorjem	36
4.6.3 Rezultati meritev karakteristik visokonapetostnega merilnega transformatorja z dvema kondenzatorjema.....	39
4.6.4 Rezultati meritev karakteristik visokonapetostnega merilnega transformatorja z tremi kondenzatorji	41
4.6.5 Rezultati meritev karakteristik visokonapetostnega merilnega transformatorja s štirimi kondenzatorji	43
4.7 Ugotovitve	47
5. SKLEP	52

Kazalo slik

Slika 1: Shema merilne proge za visoko napetost (MP1)	4
Slika 2: Nizkonapetostna stikalna celica	5
Slika 3: Regulacijski transformator	6
Slika 4: Enofazni visokonapetostni transformator	7
Slika 5: Iztekanje olja iz transformatorja	7
Slika 6: Marksov generator	8
Slika 7: Kapacitivni delilnik	9
Slika 8: Shema umerjanja kapacitivnega delilnika	10
Slika 9: Princip delovanja transformatorja	14
Slika 10: Osnovna shema merilnega transformatorja	16
Slika 11: Enopolno izoliran (a) in dvopolno izoliran (b) napetostni transformator [8]	20
Slika 12: Napetostni oljni transformator z zaprtim jedrom, odprtim jedrom in kaskadni	21
Slika 13: Visokonapetostni merilni transformator VPU - 123	22
Slika 14: Shema delovanja merilnega visokonapetostnega transformatorja v prostem teku	23
Slika 15: Presek visokonapetostnega merilnega transformatorja	26
Slika 16: Priključna omarica visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU-123	28
Slika 17: Visokonapetostni kondenzator	30
Slika 18: Shema merilnega visokonapetostnega transformatorja VPU-123	32
Slika 19: Visokonapetostni merilni transformator VPU-123	33
Slika 20: Kazalčni diagram visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU-123	35
Slika 21: Shema merilnega visokonapetostnega transformatorja s kondenzatorjem	36
Slika 22: VNMT z enim kondenzatorjem	36
Slika 23: Kazalčni diagram transformatorja z enim kondenzatorjem	37
Slika 24: VNMT z dvema kondenzatorjema	39
Slika 25: Kazalčni diagram transformatorja z dvema kondenzatorjema	40
Slika 26: VNMT s tremi kondenzatorji	41
Slika 27: Kazalčni diagram transformatorja s tremi kondenzatorji	42
Slika 28: VNMT s štirimi kondenzatorji	43
Slika 29: Shema visoko napetostnega vira VPU-123-4	45
Slika 30: Kazalčni diagram transformatorja s štirimi kondenzatorji	45
Slika 31: Kazalčni diagram s kotom 0°	46
Slika 32: Tok na nizkonapetostni strani v odvisnosti od napetosti na visokonapetostni strani vira	47

Slika 33: Nadomestno vezje merilnega transformatorja obremenjenega s kompenzacijskimi kondenzatorji	48
Slika 34: Končni zgled visokonapetostnega vira VPU-123-4	49

Kazalo tabel

Tabela 1: Podatki regulacijskega transformatorja	6
Tabela 2: Podatki Marksovega generatorja	8
Tabela 3: Podatki kapacitivnega delilnika	9
Tabela 4: Želen napetostni nivo na visokonapetostni strani in izmerjena napetost na nizkonapetostni strani	10
Tabela 5: Napetost na nizkonapetostni strani, napetost na izhodu kapacitivnega delilnika in razdalje med kroglama za vsak nivo po tri meritve	11
Tabela 6: Povprečne vrednosti napetosti nizkonapetostne strani in napetosti kapacitivnega delilnika	11
Tabela 7: Delilno razmerje kapacitivnega delilnika in izmerjena visoka napetost s kapacitivnim delilnikom	12
Tabela 8: Podatki visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU-123	22
Tabela 9: Podatki visokonapetostnih kondenzatorjev	30
Tabela 10: Visokonapetostni merilni transformator VPU-123	34
Tabela 11: VNMT z enim kondenzatorjem	37
Tabela 12: VNMT z dvema kondenzatorjema	39
Tabela 13: VNMT s tremi kondenzatorji	41
Tabela 14: VNMT s štirimi kondenzatorji	43
Tabela 15: Tehnični podatki visokonapetostnega vira VPU-123-4	50

UPORABLJENI SIMBOLI

d	– razdalja med kroglama [mm]
d_r	– delilno razmerje kapacitivnega delilnika [kV/V]
d_{rs}	– srednja vrednost delilnega razmerja kapacitivnega delilnika [kV/V]
d_s	– srednja vrednost razdalje med kroglama [mm]
E_{NN}	– inducirana napetost na nizkonapetostni strani
E_{VN}	– inducirana napetost na visokonapetostni strani
f	– frekvenca [Hz]
I_R	– delovna komponenta toka [A]
I_L	– induktivna komponenta toka [A]
I_{NN}	– tok nizkonapetostnega navitja [A]
I_P	– primarni tok [A]
I_S	– sekundarni tok [A]
k_{KD}	– konstanta kapacitivnega delilnika [3,75 kV]
k_n	– nazivno prestavno razmerje
N_{NN}	– ovoji nizkonapetostnega navitja
N_P	– številni ovojev na primarni strani
N_S	– število ovojev na sekundarni strani
N_{VN}	– ovoji visokonapetostnega navitja
P	– moč [W]
p_{prest}	– prestava visokonapetostnega transformatorja [325 V]
$p_{prestave}$	– povprečna vrednost prestavnega razmerja [V]
$p'_{prestave}$	– izračunano prestavno razmerje [V]
R_{Fe}	– ohmska upornost železnega jedra [Ω]
R_{NN}	– ohmska upornost nizkonapetostnega navitja [Ω]
R'_{VN}	– ohmska upornost visokonapetostnega navitja [Ω]
U_{kd}	– napetost kapacitivnega delilnika [V]
$U_{kd,d}$	– visoka napetost izmerjena s kapacitivnim delilnikom [kV]
$U_{kd,s}$	– srednja vrednost napetosti kapacitivnega delilnika [V]
U_{krog}	– vrednost visoke napetosti za krogelno iskriko [kV]
U_{IZVN}	– izračunana napetost na visokonapetostni strani [kV]
U_{NN}	– napetost nizkonapetostnega navitja [V]
$U_{NN,d}$	– visoka napetost dobljena s meritvijo nizke napetosti [kV]

$U_{NN,s}$	– srednja vrednost napetosti nizkonapetosten strani [V]
U_P	– primarna napetost [A]
U_s	– sekundarna napetost [V]
U_{VN}	– napetost visokonapetostnega navitja [V]
$U_{VN,\text{želen}}$	– podan želen nivo napetostni na visokonapetostni strani [kV]
U_{VNKD}	– izmerjena napetost na visokonapetostni strani s kapacitivnim delilnikom
X_{L2}	– induktivna upornost visokonapetostnega navitja z jedrom [Ω]
X_m	– induktivna upornost visokonapetostnega navitja [Ω]
X_m	– impedanca jedra [Ω]
$X_{\sigma 2}$	– induktivna upornost jedra [Ω]
$X_{\sigma NN}$	– impedanca nizkonapetostnega navitja [Ω]
$X'_{\sigma VN}$	– impedanca visokonapetostnega navitja [Ω]
Z	– impedanca [Ω]
Φ_g	– magnetni pretok [mVs]
φ	– kot med tokom in napetostjo na nizkonapetostni strani [$^\circ$]

UPORABLJENE KRATICE

ELES	– Sistemski operater prenosnega električnega omrežja
HEMO	– Hidroelektrarna mariborski otok
ICEM-TC	– Infrastrukturni center za energetske meritve, tehnološki center
MP1	– merilna proga za visoke napetosti
MP2	– merilna proga za dolgotrajne velike tokove in male moči
MP3	– merilna proga za visoke napetosti
NN	– nizka napetost
PZ	– prenapetostna zaščita
RT	– regulacijski transformator
VN	– visoka napetost
VNT	– visokonapetostni transformator

1. UVOD

V visokonapetostni merilni tehniki ter tehniki preskušanja visokonapetostne opreme predstavlja visokonapetostni transformator najpomembnejši izvor visoke napetosti za preskušanje in izvedbo meritev. V te namene se najpogosteje uporabljajo namenski visokonapetostni transformatorji. V našem primeru smo uporabili merilni visokonapetostni transformator, ki ga je bilo potrebno preurediti.

V laboratoriju ICEM-TC je uporabljena merilna proga MP1, ki je namenjena izvajanju izmeničnih ter enosmernih preskusov z visokimi napetostmi. Naprogi je bil uporabljen visokonapetostni transformator s katerim so se začele pojavljati težave (iztekanje olja iz transformatorja ter težave pri meritvah). Visokonapetostni transformator je v laboratoriju zelo pomemben za izvajanje preskusov, zato je bilo potrebno težave odpraviti. Ker popravilo ni bilo možno, smo iskali druge možnosti. V pravem trenutku smo iz podjetja ELES dobili rabljen visokonapetostni merilni transformator in visokonapetostne kondenzatorje, katere je bilo potrebno usposobiti.

Namen diplomske naloge je ugotovitev delovanja merilnega visokonapetostnega transformatorja VPU-123, kateri bo uporabljen za meritve visokih napetosti in preskušanje delnih praznitev. Sprva je bilo potrebno ugotoviti ali je transformator sploh primeren za vir visokih napetosti in kako ga je potrebno predelati.

Cilj diplomske naloge je preureditev merilnega visokonapetostnega transformatorja VPU-123, saj gre za rabljen merilni transformator. Namestitev na primerno mesto, kjer se bo uporabljal za meritve in preskuse. Priključitev na napajanje in v merilno progo MP1 ter določitev U/I karakteristike transformatorja.

Merilni transformator je bil uporabljen na 110 kV daljnovodu in je transformiral visoko napetost v nizko. V visokonapetostnem laboratoriju je za meritve potrebna visoka napetost, zato smo transformatorju spremenili namembnost in ga uporabili kot vir visoke napetosti. Tako smo niskonapetostno stran priključili na fazno napetost 230 V, visokonapetostno stran pa uporabili za meritve in preskuse.

V drugem poglavju je predstavljen zavod infrastrukturni center za energetske meritve – tehnološki center (ICEM-TC) in merilna proga za visokonapetostne meritve.

V tretjem poglavju so opisani instrumentni merilni transformatorji in njihova uporaba.

Četrto poglavje je osrednje poglavje diplomske naloge. V njem je predstavljen visokonapetostni merilni transformator VPU-123, njegova uporaba, zgradba in delovanje v prostem teku. Opisani so visokonapetostni kondenzatorji, ter njihov namen uporabe. Predstavljeni so tudi rezultati meritev visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU-123, samega in s kondenzatorji. V četrtem poglavju je predstavljen tudi nov visokonapetostni vir VPU-123-4, ki je sestavljen iz visokonapetostnega merilnega transformatorja in štirih visokonapetostnih kondenzatorjev. Zapisani so tehnični podatki in navodila za uporabo visokonapetostnega vira VPU-123-4.

2. ICEM – TC

Zavod infrastrukturni center za energetske meritve – tehnološki center (ICEM–TC) je bil ustanovljen leta 2001 predvsem z namenom, da bi zagotovil infrastrukturne pogoje na branžnem nivoju za ustvarjanje in prenos znanja, razvojnih rezultatov in tehnologij v gospodarsko prakso. Njihov cilj je spodbuditi racionalizacijo izrabe raziskovalno razvojne infrastrukture, trajnejša medsebojna povezovanja raziskovalne in razvojne sfere ter gospodarstva in delo v mešanih timih in razvojno povezovanje gospodarskih organizacij znotraj gospodarske panoge[10].

V zavodu ICEM – TC so usposobljene tri merilne proge:

- za visoke napetosti MP1,
- za segrevanje MP2,
- za velike moči MP3.

ICEM - TC opravlja naloge meritev s področja močnostne elektrotehnike za nizke, srednje in visoke napetosti, vodenje in izvajanje raziskovalnih ter razvojnih projektov na novih proizvodih in tehnologijah, ter ugotavljanje skladnosti izdelkov z zahtevami domačih in mednarodnih predpisov in standardov.

V ICEM – TC se izvajajo meritve:

- kakovosti električne energije (višje harmonske komponente, obratovalni parametri omrežja),
- delnih praznitev na izolacijskih elementih elektroenergetskega sistema nižjih, višjih in visokih napetosti,
- ozemljitvenih naprav.

Glavne aktivnosti ICEM – TC:

- redno izvajanje meritev in preskusov,
- izvedba in vodenje raziskovalno – razvojnih projektov,
- priprava laboratorija na akreditacijo,
- sodelovanje s šolskimi zavodi pri izvedbi laboratorijskih vaj, obveznih praks in diplomskih nalog[10].

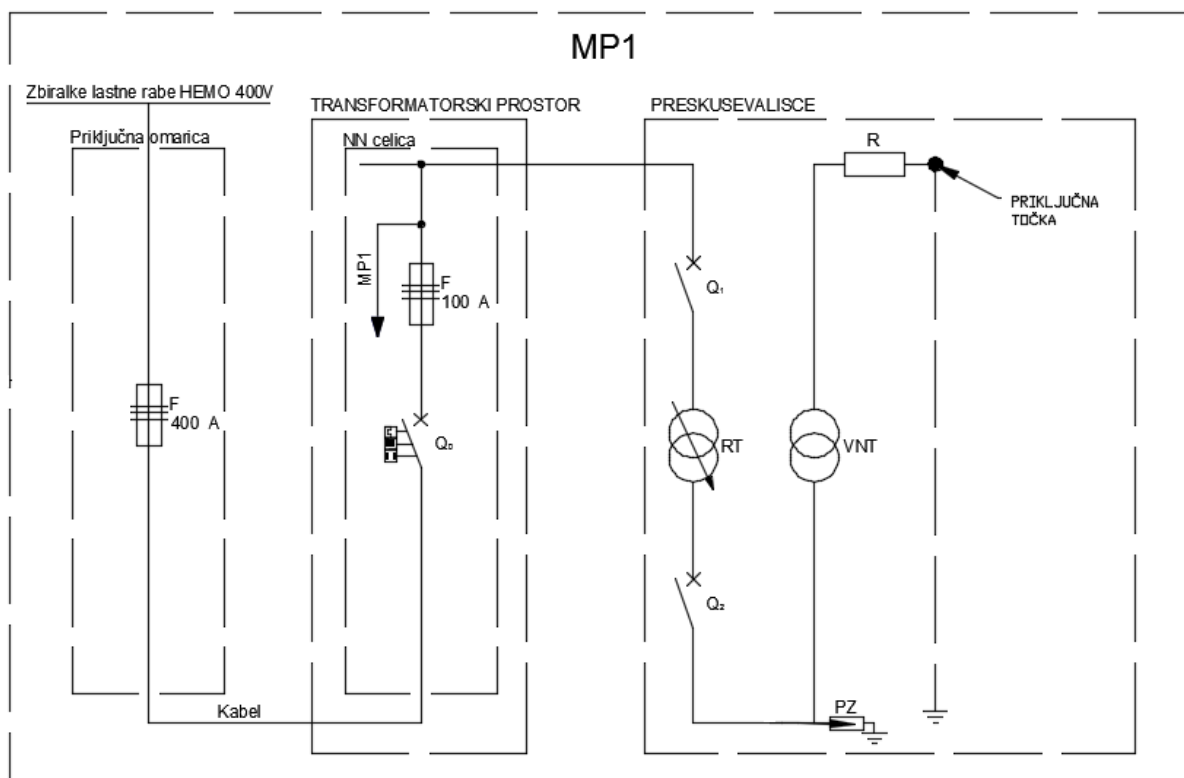
2.1 MP1 – merilna proga za visokonapetostne meritve

Merilna proga za meritve z visokimi napetostmi se nahaja v elektroenergetskem laboratoriju ICEM-TC in je namenjena izvajanju izmeničnih in enosmernih visokonapetostnih preskusov do 110kV. Pri preskušanju je poskrbljeno za ustrezne pogoje za delo, opremo ter usposobljeno osebje.

Merilno progo MP1 (slika 1) sestavljajo naslednji ključni elementi:

- dovod in priključna omarica,
- niskonapetostna celica NN celica,
- regulacijski transformator RT,
- visokonapetostni transformator VNT,
- vodni upor R,
- prenapetostni odvodnik PZ.

Na priključno točko se po potrebi lahko priključi krogelno iskriilo, kapacitivni delilnik, preskušane ali usmernik. Usmernik lahko uporabimo za napajanje Marksovega generatorja [7].



Slika 1: Shema merilne proge za visoko napetost (MP1)

Dovod in priključna omarica

Niskonapetostni dovod je izveden z dvema trižilnima kabloma $3 \times 120 \text{ mm}^2$ iz transformatorja lastne rabe na HEMO. Na zunanji strani laboratorija je električna omarica kjer so tri varovalke NV3, gG, 400 A, preko katerih je speljan dovod do niskonapetostne celice[7].

Niskonapetostna stikalna celica

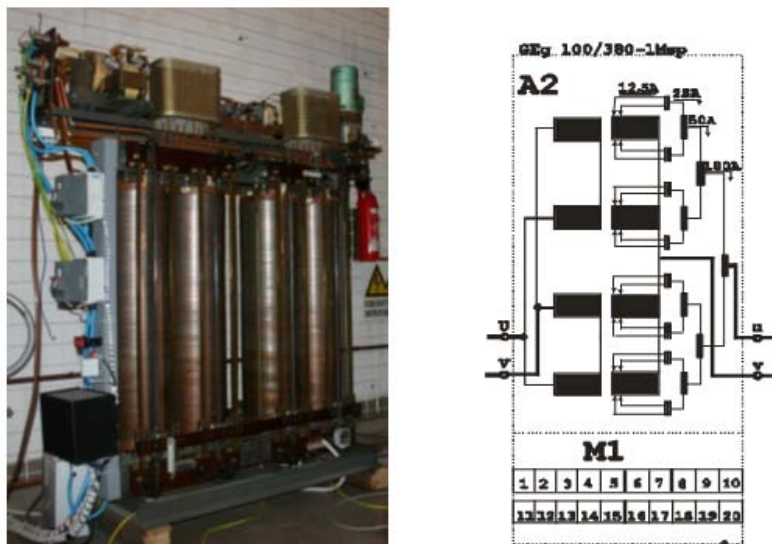
Niskonapetostna celica (slika 2) je namenjena za napajanje preskusne proge, katera je nameščena v transformatorskem prostoru. Napajanje v celico je izvedeno iz niskonapetostnih zbiralk iz Hidroelektrarne Mariborski otok. V spodnjem delu omarice je niskonapetostni odklopnik (Q_0), s katerim vklopimo napajanje merilne proge MP1. Odklopnik je varovan z taljivimi varovalkami, katere so nameščene za odklopnikom in varujejo merilno progo MP1[7].



Slika 2: Niskonapetostna stikalna celica

Regulacijski transformator RT

Regulacijski transformator (slika 3) je dvofazni suhi transformator, kije namenjen za nastavitev primarne napetosti preskusnega transformatorja in s tem preskusne napetosti. Izveden je kot ovojni regulacijski transformator in ima za odzemnike toka kovinske drsne kontakte[7].



Slika 3: Regulacijski transformator

Tabela 1: Podatki regulacijskega transformatorja

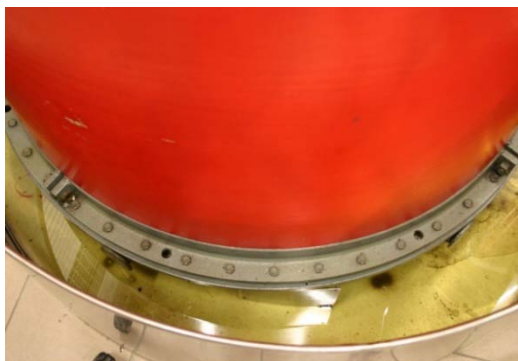
Tip	GEg 100/380-1 Msp
Primarna napetost	380 V
Sekundarna napetost	0-525 V
Primarni tok	276 A
Sekundarni tok	200 A
Krmilna napetost	230 V, 50 Hz
Št. nap. ploščice	883385
Masa	850 kg

Predhodni visokonapetostni transformator

Enofazni visokonapetostni transformator (slika 4) je bil namenjen transformaciji napetosti na visokonapetostni nivo. Njegovo prestavno razmerje je bilo 325 in največja napetost je bila 130 kV. S transformatorjem so se začele pojavljati težave pri preskušanju delnih praznitev in začelo je iztekati olje (slika 5)[7].



Slika 4: Enofazni visokonapetostni transformator



Slika 5: Iztekanje olja iz transformatorja

Marksov generator

Marksov generator (slika 6) je namenjen generiranju visoke atmosfere udarne napetosti[7].



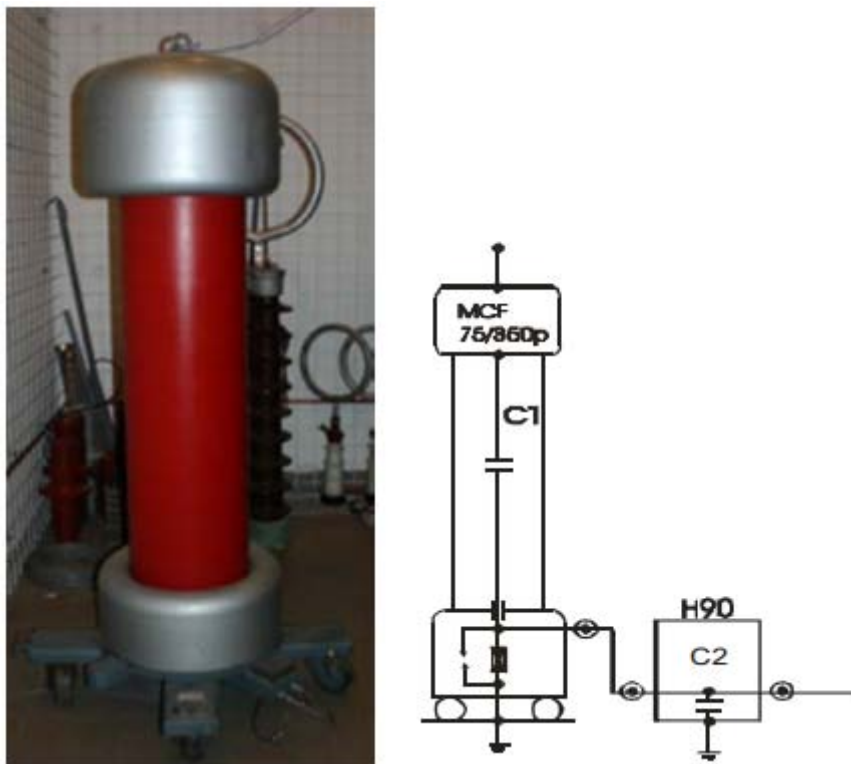
Slika 6: Marksov generator

Tabela 2: Podatki Marksovega generatorja

Tip:	SP 8,8/1000
Vsota polnilnih napetosti:	1000 kV
Nazivna energija:	8,8 kJ
Nadomestna kapacitivnost:	17,5 nF
Oblika vala:	1,2/50 μ s
Število generatorskih stopenj:	8
Polnilna napetost:	125 kV
Razmik impulza	10 s
Številka tablice:	883413
Masa:	2200 kg

Kapacitivni delilnik

Kapacitivni delilnik (slika 7) se uporablja za merjenje visoke napetosti (kV), glede na razmerje C_1/C_2 . Delilnik zniža merjeno napetost na primeren nivo za osciloskope in druge merilne instrumente. Sestavljen je iz zaporedno vezanih kondenzatorjev C_1 in C_2 [7].



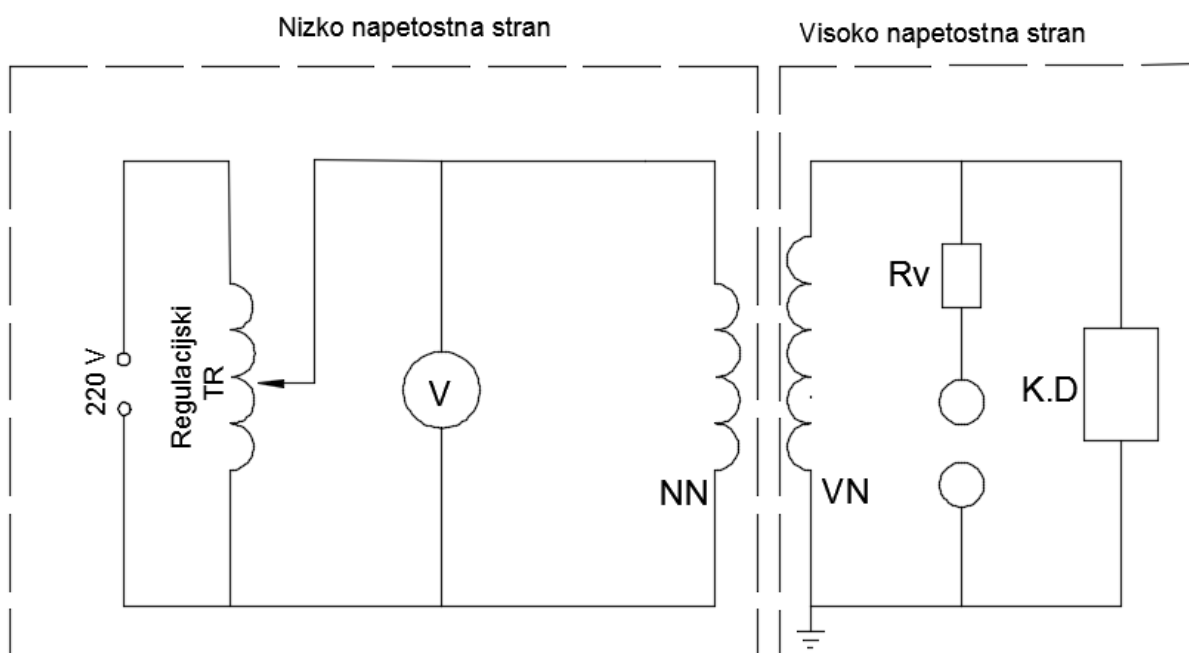
Slika 7: Kapacitivni delilnik

Tabela 3: Podatki kapacitivnega delilnika

Tip	MCF 75/350 P	H90
Nazivna napetost	350 kV	100 V
Kapacitivnost	$C_1 = 75\text{pF}$	$C_2 = 270\text{nF}$
Izgubni faktor $\tan\delta$	$<10^{-4}$	/
Višina	1930 mm	/
Masa	420 kg	3kg
Številka nap. tablice	881920	887392

Umerjanje kapacitivnega delilnika z predhodnim visokonapetostnim transformatorjem

Napetost industrijske frekvence 50 Hz smo s predhodnim visokonapetostnim merilnim transformatorjem generirali na želeni nivo in kontrolirali napetost na nizkonapetostni strani. Sočasno smo s krogelnim iskrilom nastavili višino visoke napetosti in s kapacitivnim delilnikom kontrolirali napetost na visokonapetostni strani[5].



Slika 8: Shema umerjanja kapacitivnega delilnika

Nastavili smo si preglednico (tabela 4) z želenimi nivoji na visokonapetostni strani ($U_{VN, \text{želen}}$) in tako pomerili vrednosti napetosti na nizkonapetostni strani (U_{NN}).

Tabela 4: Želen napetostni nivo na visokonapetostni strani in izmerjena napetost na nizkonapetostni strani

$U_{VN, \text{želen}} [\text{kV}]$	28	50	75	100
$U_{NN} [\text{V}]$	86,2	153,9	230,8	307,8

Nato smo čim natančneje nastavljali želeno napetost (tabela 5) na nizkonapetostni strani (U_{NN}), odčitavali napetost na izhodu iz kapacitivnega delilnika (U_{kd}) in izmerili razdaljo med krogama. Za vsak nivo smo naredili po tri meritve in izračunali povprečne vrednosti (tabela 6) [5].

Tabela 5: Napetost na nizkonapetostni strani, napetost na izhodu kapacitivnega delilnika in razdalje med krogama za vsak nivo po tri meritve

Ponovitev 1

$U_{NN}[\text{V}]$	86,40	153,80	230,10	307,20
$U_{kd}[\text{V}]$	7,90	14,40	21,70	29,10
$d [\text{mm}]$	14,40	28,90	44,10	68,80

Ponovitev 2

$U_{NN}[\text{V}]$	86,00	154,80	230,80	309,10
$U_{kd}[\text{V}]$	7,80	14,50	21,80	29,30
$d [\text{mm}]$	15,20	28,60	47,20	69,80

Ponovitev 3

$U_{NN}[\text{V}]$	86,90	153,50	230,80	307,40
$U_{kd}[\text{V}]$	7,90	14,30	21,80	29,10
$d [\text{mm}]$	15,00	28,00	43,90	69,10

Tabela 6: Povprečne vrednosti napetosti nizkonapetostne strani in napetosti kapacitivnega delilnika

$U_{NN,s}[\text{V}]$	86,43	154,00	230,57	307,90
$U_{kd,s}[\text{V}]$	7,86	14,40	21,76	29,17
$d_s[\text{mm}]$	14,86	28,50	45,00	69,20

Tabela 7: Delilno razmerje kapacitivnega delilnika in izmerjena visoka napetost s kapacitivnim delilnikom

$U_{NN,d}[\text{kV}]$	28,09	50,05	74,93	100,07
$d_s[\text{mm}]$	14,86	28,50	45,00	69,20
$U_{krog}[\text{kV}]$	30,98	55,02	78,44	102,35
$U_{kd,s}[\text{V}]$	7,86	14,40	21,76	29,17
$d_r[\text{kV/V}]$	3,94	3,82	3,61	3,51
$U_{kd,d}[\text{kV}]$	29,20	53,50	80,80	108,42
$d_{rs}[\text{kV/V}]$	3,75			

Iz povprečjanapetosti (tabela 6) na nizkonapetostni strani in produkta prestave visokonapetostnega transformatorjadobimo napetost, ki je na visokonapetostni strani (2.1).

$$U_{NN,d} = U_{NN,s} \times p_{prest}, \quad (2.1)$$

kjer je:

- $U_{NN,d}$ - visoka napetost dobljena z meritvijo nizke napetosti [kV],
- $U_{NN,s}$ - povprečna vrednost napetosti na nizkonapetostni strani [V],
- p_{prest} - prestava visokonapetostnega transformatorja [325 V].

Delilno razmerje d_r je razmerje napetosti na krogelnem iskrilu in povprečne vrednosti napetosti kapacitivnega delilnika (2.2).

$$d_r = \frac{U_{krog}}{U_{kd,s}}, \quad (2.2)$$

kjer je:

- d_r - delilno razmerje kapacitivnega delilnika [kV/V],
- U_{krog} - napetost krognega iskrila [V],
- $U_{kd,s}$ - povprečna vrednost napetosti kapacitivnega delilnika [V].

Visoko napetost, izmerjena s kapacitivnim delilnikom je produkt povprečnih vrednosti napetosti kapacitivnega delilnika in njegovega delilnega razmerja (2.3).

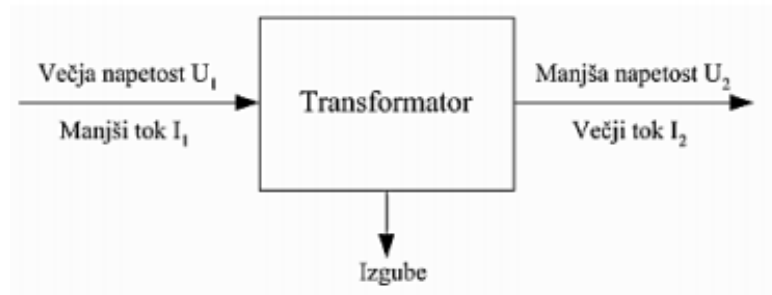
$$U_{kd,d} = U_{kd,s} \times d_{rs}, \quad (2.3)$$

kjer je:

- $U_{kd,d}$ - visoka napetost izmerjena s kapacitivnim delilnikom [kV],
- $U_{kd,s}$ - povprečna vrednost napetosti kapacitivnega delilnika [V],
- d_{rs} - povprečna vrednost delilnega razmerja kapacitivnega delilnika [kV/V],

3. INSTRUMENTNI TRANSFORMATORJI

Transformator je električni stroj, ki s pomočjo elektromagnetne indukcije en sistem izmeničnih tokov pretvarja v drugega ali obratno. Transformator je torej naprava, ki lahko transformira izmenične električne veličine. Električno moč, ki jo na vходу v transformator vložimo, jo dobimo tudi na izstopu transformatorja, če njegove izgube zanemarimo. Moč je na obeh straneh enaka, razlikujeta se lahko samo napetost in tok. Višja vhodna napetost pomeni manjši vhodni tok, na izhodu pa je potem manjša napetost in večji tok. Možno je seveda tudi obratno[9].



Slika 9: Princip delovanja transformatorja

Merilni zaščitni tokovni in napetostni transformatorji so najpomembnejši faktor v sistemu merjenja in zaščite v napetostnih področjih. Transformatorji transformirajo visoko napetost v nizko, ki je primerna za merilne instrumente in zaščitne naprave.

Instrumentne transformatorje delimo:

- instrumentne merilne transformatorje,
- instrumentne zaščitne transformatorje.

Instrumenti zaščitni transformatorji imajo delovno točko v linearnem spodnjem delu magnetilne krivulje, saj s tem zanesljivo delujejo znotraj svojega razreda točnosti v širokem tokovnem razredu[9].

Instrumentni merilni transformatorji pa delujejo pod kolenom magnetilne krivulje, saj tako ščitijo merilne instrumente pred večjimi tokovi[9].

V diplomski nalogi se bom posvetil instrumentnim merilnim transformatorjem, saj je v laboratoriju za energetske meritve ICEM-TC bilo potrebno usposobiti nov visokonapetostni merilni transformator.

3.1 Instrumentni merilni transformatorji

Neposredna povezava naprav za vodenje in zaščito elektroenergetskih sistemov na daljnovode visokih napetosti, bi zahtevala zelo drage merilne instrumente, releje za visoke napetosti (merilni instrumenti za izolacijo) in velike tokove (presek vodnika, sile med vodniki). Zaradi tega se uporabljajo instrumentni merilni transformatorji, ki izmerjene napetosti in tokove znižajo do velikosti, ki omogoča uporabo instrumentov, zgrajenih za nazivne napetosti 100 V ali nazivni tok 5A ali 1 A. [8].

Instrumentne merilne transformatorje lahko razdelimo v več kategorij:

- veličine, ki se transformirajo:
 - tokovni,
 - napetostni,
- mesto montaže:
 - za notranjo,
 - za zunanjo montažo,
- vrsta glavne izolacije:
 - izolacijski papirimpregniranega olja,
 - epoksidna smola,
 - plin SF₆,
- princip delovanja:
 - **tokovni:**
 - induktivni tokovni transformatorji,
 - **napetostni:**
 - induktivni napetostni transformatorji,
 - kapacitivni napetosti transformatorji,
 - kombinirani merilni transformatorji.

Nazivne vrednosti instrumentnih merilnih transformatorjev so določene z njegovim obratovalnim položajem, napetostnim nivojem, vrednostjo kratkega stika, prestavnim razmerjem in njegovim namenom (za zaščito ali meritve) [8].

3.2 Instrumenti tokovni merilni transformator

Pri normalnem delovanju instrumentnih tokovnih merilnih transformatorjev je sekundarni tok sorazmeren primarnemu in je z njim v fazi. Njihove najpomembnejše značilnosti so:

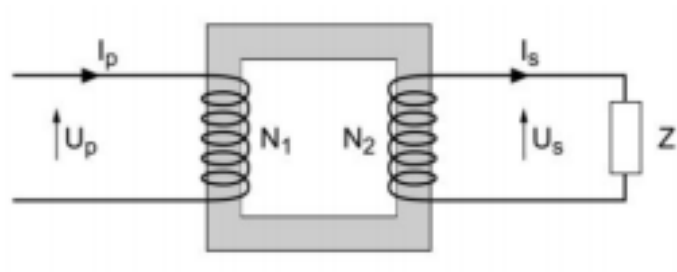
- primarni in sekundarni tok,
- nazivna moč,
- nazivno prestavno razmerje,
- razred točnosti.

Razmerje primarnega in sekundarnega toka pri instrumentnih tokovnih merilnih transformatorjih je konstantno:

$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{N_S}{N_P}, \quad (3.1)$$

kjer je:

- I_P - primarni tok [A],
- I_S - sekundarni tok [A],
- N_P - številni ovojev na primarju,
- N_S - število ovojev na sekundarju.



Slika 10: Osnovna shema merilnega transformatorja

Moč, ki je na sekundarnem navitju, je odvisna od impedanace ter toka sekundarnega navitja (3.2). Zato je potrebno sekundarna navitja kratko skleniti, sicer pride do poškodbe tokovnika[8].

$$P = Z \times I_s^2, \quad (3.2)$$

kjer je:

- P - moč [W],
- Z - impedanca [Ω],
- I_s - sekundarni tok [A].

$$U_s = Z \times I_s, \quad (3.3)$$

kjer je:

- U_s - sekundarna napetost [V],
- Z - impedanca [Ω],
- I_s - sekundarni tok [A].

3.3 Instrumentni napetostni merilni transformatorji

Instrumentne napetostne merilne transformatorje delimo v induktivne transformatorje, pri katerih je sekundarna napetost sorazmerna s primarno in je z njo v fazi. Značilnosti instrumentnih napetostnih merilnih transformatorjev so:

- primarna in sekundarna nazivna napetost,
- napetostni pogrešek,
- fazni pogrešek,
- nazivna moč,
- razred točnosti.

Za instrumentne napetostne merilne transformatorje lahko ugotovimo, koliko znaša primarna napetost, če poznamo sekundarno napetost. Razmerje med primarno in sekundarno napetostjo je konstantna in znaša (3.4):

$$\frac{U_P}{U_S} = \frac{N_P}{N_S}, \quad (3.4)$$

kjer je:

- U_P - primarna napetost [V],
- U_S - sekundarna napetost [V],
- N_P - število ovojev na primarju,
- N_S - število ovojev na sekundarju.

Instrumentni napetostni merilni transformator ima zelo veliko notranjo impedanco. Tako lahko rečemo, da instrumentni napetostni merilni transformator deluje kot transformator v praznem teku. Iz (3.5) je razvidno, da mora biti impedanca tokokroga velika, sicer pride do prevelikih tokov na sekundarni strani in tako do okvare instrumentnega napetostnega merilnega transformatorja. Zato morajo biti sponke neuporabljenih sekundarnih navitij razklenjene. Ena točka sekundarnega navitja instrumentnega napetostnega merilnega transformatorja mora biti ozemljena[8].

$$I_S = \frac{U_S}{Z}, \quad (3.5)$$

kjer je:

- I_S - sekundarni tok [A],
- U_S - sekundarna napetost [V],
- Z - impedanca [Ω].

$$P = \frac{U_S^2}{Z}, \quad (3.6)$$

kjer je:

- P - moč [W],
- U_S - sekundarna napetost [V],
- Z - impedanca [Ω].

Od instrumentnega napetostnega merilnega transformatorja se zahteva, da transformira merjeno napetost v stalnem razmerju in brez faznega zamika. Nazivno razmerje transformacije definiramo (3.7):

$$k_n = \frac{U_P}{U_S}, \quad (3.7)$$

kjer je:

- k_n - nazivno prestavno razmerje,
- U_P - primarna napetost [V],
- U_S - sekundarna napetost [V].

Instrumentni napetostni merilni transformatorji se uporabljajo za merjenje fazne in medfazne napetosti. Imamo dve vrsti instrumentnih napetostnih merilnih transformatorjev in sicer enopolno in dvopolno izolirane. Enopolno izoliran instrumentni napetostni merilni transformator ima en visokonapetostni priključek, medtem ko je drugi konec primarnega navitja povezan z ohišjem transformatorja ali ozemljitvijo. Njegova nazivna primarna napetost je enaka nazivni omrežni fazni napetosti. Dvopolno izoliran instrumentni napetostni merilni transformator ima dva visokonapetostna priključka in nazivno primarno napetost, ki je enaka linijski nazivni omrežni napetosti[8].

3.4 Izvedbe instrumentnih napetostnih merilnih transformatorjev

Delitev in izvedba instrumentnih napetostnih merilnih transformatorjev.

3.4.1 Epoksidni instrumentni napetostni merilni transformatorji

Epoksidni instrumentni merilni transformatorji (slika 11) so izolirani z epoksi smolo. So enopolno in dvopolno izolirani. Pri izdelavi takšnega merilnega transformatorja se najprej pripravi in sestavi celoten aktiven del in se nato zaliva z epoksi smolo [8].

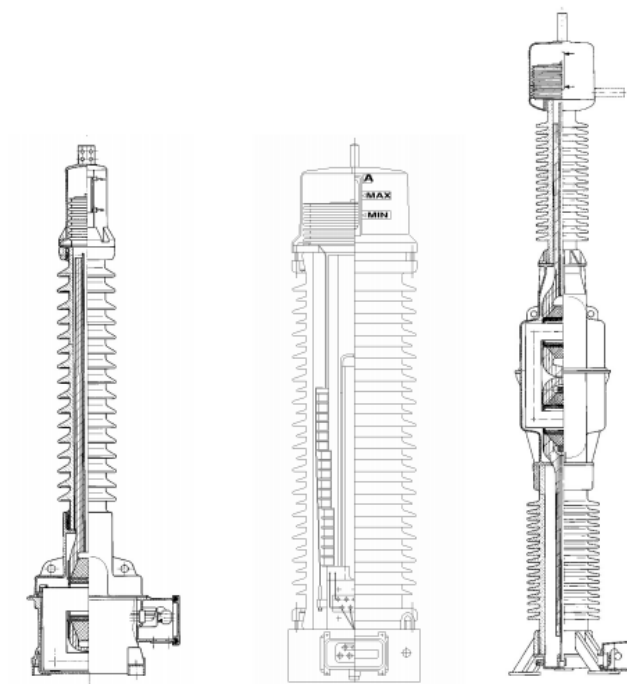


Slika 11: Enopolno izoliran (a) in dvopolno izoliran (b) napetostni transformator [8]

3.4.2 Oljni instrumentni merilni transformatorji

Oljni instrumentni merilni transformatorji se uporabljajo za napetosti, ki sovišje od 35kV, primerni pa so predvsem za zunanjo montažo. Sestavljeni so iz jedra in primarnega ter sekundarnega navitja, ki so v koltu olja in so medsebojno izolirani z visokonapetostnim papirjem. Na kotel je nameščen porcelanasti izolator, skupaj pa sta pritrjena na aktivni del transformatorja. S tem zmanjšujeta njegovo težo in velikost. Transformatorji so hermetično zaprti, da se prepreči vdor vlage v olje, ki bi zmanjšalo dielektrično moč. S segrevanjem navitja se spreminjata temperatura in volumen olja. Zaradi povečanja volumna imamo nad transformatorjem pritrjeno elastično membrano (kovinska, gumijasta), ki omogoča zadrževanje tlaka v transformatorju. Oljne merilne napetostne transformatorje (slika 12) lahko razdelimo v tri skupine[8]:

- napetostni transformator z zaprtim jedrom,
- napetostni transformator z odprtim jedrom,
- kaskadni napetostni transformator.



Slika 12: Napetostni oljni transformator z zaprtim jedrom, odprtim jedrom in kaskadni

4. VISOKONAPETOSNI MERILNI TRANSFORMATOR VPU-123

Visokonapetostni merilni transformator VPU-123 (slika 13) je enofazni merilni transformator za napetosti do 123 kV. Uporabljal se je za meritve fazne napetosti na 110 kV daljnovodu. Za meritve medfaznih napetosti ni primeren, ker je enopolno izoliran.



Slika 13: Visokonapetostni merilni transformator VPU - 123

Tabela 8: Podatki visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU-123

Tip transformatorja	VPU-123
Najvišja napetost na visokonapetostni strani [kV]	123
Preskusna izmenična napetost [kV]	230
Preskusna udarna napetost [kV]	500
Niskonapetostna napetost [V]	$100\sqrt{3}$
Krmilna napetost	230 V, 50 Hz
Št. nap. ploščice	783421/79
Masa [kg]	Skupna 500
	Olja 90

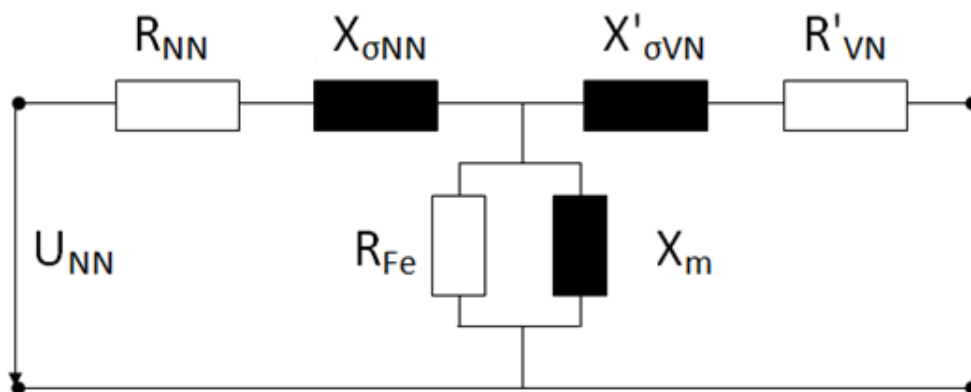
4.1 Uporaba VPU-123 kot vira visoke napetosti

VPU-123 je induktivni visokonapetostni merilni transformator, ki se v svoji konstrukciji (priloga 1) razlikuje od navadnega transformatorja. Razlika med navadnim in napetostnim merilnim transformatorjem je v magnetni poti, po kateri se zaključuje glavni del magnetnih silnic. Pri navadnem transformatorju je magnetna pot v celoti speljana po magnetnem jedru, saj železno jedro v celoti oklepa navitje (zaprti tip jedra). Pri napetostnem merilnem transformatorju se magnetne silnice zaključujejo po zraku zaradi odprtega tipa železnega jedra. Takšna konstrukcija z odprtim jedrom linearizira magnetilno karakteristiko, ki je zelo pomemben dejavnik pri zagotavljanju točnosti merilnega transformatorja. Posledično takšna konstrukcija potrebuje več jalove moči za magnetenje [1].

Če želimo merilnemu napetostnemu transformatorju spremeniti namembnost in ga uporabiti kot vir visoke napetosti, je z dodatnimi kondenzatorji potrebno kompenzirati induktivno jalovo moč.

4.2 Delovanje v prostem teku

Niskonapetostna stran navitja (U_{NN}) (slika 14) je priključena na regulacijski transformator (tabela 1), s katerim poljubno nastavljamo vhodno napetost, visokonapetostna stran (U_{vN}) pa ni obremenjena. Vhodna sinusna izmenična napetost v niskonapetostno navitje požene električni tok (I_m), ki povzroči magnetni pretok. Magnetni pretok zajema obe navitji ter feromagnetno jedro in se zaključuje po zraku, zaradi česar je magnetna karakteristika transformatorja linearna. Zaradi zračne poti po katerih se zaključujejo magnetne silnice je faktor povezave navitja $\sim 0,7 - 0,8$ in je bistveno slabši kot pri navadnih transformatorjih, kjer je $\sim 0,99$ [1].



Slika 14: Shema delovanja merilnega visokonapetostnega transformatorja v prostem teku

Na sliki 14 pomeni:

U_{NN} - napetost nizkonapetostnega navitja [V],

I_{NN} - tok nizkonapetostnega navitja [A],

R_{NN} - ohmska upornost nizkonapetostnega navitja [Ω],

$X_{\sigma NN}$ - impedanca nizkonapetostnega navitja [Ω],

R_{Fe} - ohmska upornost železnega jedra [Ω],

X_m - impedanca jedra [Ω],

$X'_{\sigma VN}$ - impedanca visokonapetostnega navitja [Ω],

R'_{VN} - ohmska upornost visokonapetostnega navitja [Ω].

Magnetni pretok ki zajema visokonapetostno navitje povzroči inducirano napetost (4.1), katera je odvisna od magnetnega pretoka, število ovojev in frekvence.

$$E_{NN} = 4,44 \times f \times N_{NN} \times \Phi_g, \quad (4.1)$$

kjer je:

E_{NN} - inducirana napetost na nizkonapetostni strani,

f - frekvenca [Hz],

N_{NN} - ovoji nizkonapetostnega navitja,

Φ_g - magnetni pretok [mVs].

Magnetni pretok v prostem teku je ravno tolikšen, da je inducirana napetost (E_{NN}) enaka priključeni napetosti nizkonapetostnega navitja (U_{NN}). Napetost se inducira na visokonapetostni strani (4.2), saj magnetni pretok zajema visokonapetostno navitje [2].

$$E_{VN} = 4,44 \times f \times N_{VN} \times \Phi_g \rightarrow U_{VN} \cong E_{VN}, \quad (4.2)$$

kjer je:

E_{VN} - inducirana napetost na visokonapetostni strani,

f - frekvenca [Hz],

N_{VN} - ovoji visokonapetostnega navitja,

Φ_g - magnetni pretok [mVs],

U_{VN} - napetost na visokonapetostni strani [kV].

Prestavno razmerje transformatorja (4.3) dobimo iz napetosti[2]:

$$p_{prestave} = \frac{U_{NN}}{U_{VN}} = \frac{N_{NN}}{N_{VN}}, \quad (4.3)$$

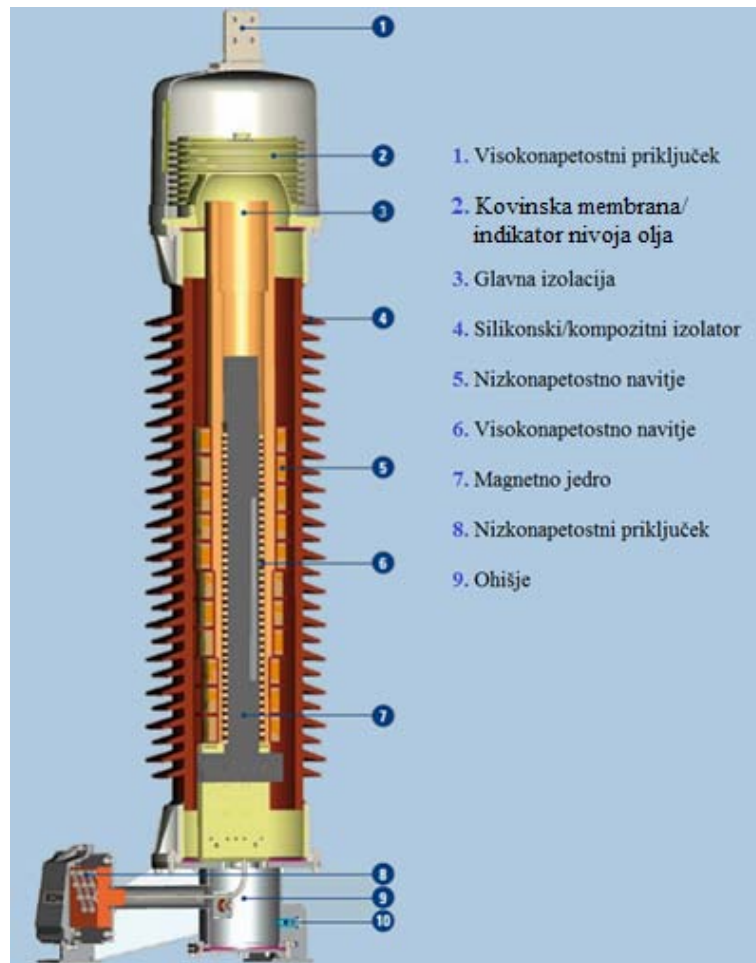
kjer je:

- $p_{prestave}$ - prestava visokonapetostnega transformatorja VPU-123 [V],
- U_{NN} - napetost na nizkonapetostni strani [V],
- U_{VN} - napetost na visokonapetostni strani [kV],
- N_{VN} - ovoji visokonapetostnega navitja,
- N_{NN} - ovoji nizkonapetostnega navitja.

Iz izraza za prestavno razmerje transformatorja je razvidno, da so ovoji in napetost na njih v premo sorazmerju.

4.3 Zgradbavisokonapetostnega merilnega transformatorja VPU

Visokonapetostni merilni transformator VPU je zgrajen za enofazno napajanje. Po grobi delitvi so sestavni deli razdeljeni v dve skupini. Aktivni deli so tisti, ki delujejo v procesu transformacije električne energije. To je železno jedro in primarno ter sekundarno navitje. Pasivni deli pa so tisti, ki ne delujejo v delu transformacije, ampak so nujni sestavni deli transformatorja. Pasivni deli so hladilna rebra, olje, ostala oprema za hlajenje, zaščita, izolacija...



Slika 15: Presek visokonapetostnega merilne transformatorja

Visokonapetostni priključek (1)

Visokonapetostni priključek je narejen iz aluminijeve zlitine ali elektrolitskega bakra zaščitene proti koroziji. Oblika in tip priključka sta izbrana v skladu z veljavnim standardom, zahtevami in prakso[6].

Kovinska membrana / indikator nivoja olja (2)

Membrana kompenzira toplotno raztezanje olja in hkrati služi kot indikator nivoja olja. Olje služi kot hladilno in izolacijsko sredstvo transformatorja. Je del električne izolacije med notranjimi aktivnimi deli, zato mora biti stabilno pri visokih temperaturah[6].

Glavna izolacija (3)

Visokonapetostna stran transformatorja je od nizkonapetostne strani izolirana z izolacijskim oljem ter impregniranim papirjem, kateri ima visoko dielektrično trdnost. Olje v transformatorjih VPU ne vsebujejo polikloriranih bifenilov (to so umetne organske spojine iz skupine kloniranih cikličnih ogljikovodikov) in polikloriranih terfenilov (PCB in PCT). Papirno-oljna izolacija je vakumsko zaprta in ločena od vpliva zraka, ki se nahaja okrog membrane[6].

Zunanja izolacija (4)

Zunanja izolacija visokonapetostnega merilnega transformatorja je iz silikonskega izolatorja in je sestavljena iz nosilnega jedra, ki zagotavlja mehansko trdnost. Jedro je izvedeno iz epoksidnih in poliestrskih smol ter je ojačeno s steklenimi vlakni. Epoksidne smole nudijo boljše električne lastnosti kot poliestrske in se zaradi tega uporabljajo pri visokonapetostnih transformatorjih[6].

Nizkonapetostno navitje(5)

Prednost odprtega jedra je, da je nizkonapetostno navitje sestavljeno iz množice odsekov, kateri so enakomerno porazdeljeni po višini transformatorja. To zagotavlja enakomerno porazdelitev dielektrične obremenitve notranje in zunanje izolacije. Sestavljeno je iz neodvisnih in ločenih odsekov, saj je tako varno pred preboji znotraj ovojev. V primeru preboja med ovoji in slojinizkonapetostnega navitja, okvara ostane lokalizirana in se ne more razširiti na celotno navitje. Nizkonapetostno navitje ima odlične lastnosti hlajenja, zaradi česar transformator zagotavlja visoko zmogljivost toplotne obremenitve[6].

Visokonapetostno navitje (6)

Visokonapetostno navitje je izdelano iz kakovostne lakirane bakrene žice, ki je neposredno navita na jedro in je v stiku z oljem. To zagotavlja enakomerno gostoto magnetnega pretoka po dolžini jedra in kompenzacijo kotnega pogreška. Na visokonapetostni strani je večji presek ovojev navitja, saj ta kratkemu stiku preprečuje, da bi onemogočil delovanje transformatorja[6].

Magnetno jedro (7)

Magnetno jedro je paličaste oblike iz hladno valjanega električnega jekla. Zgradba odprtega jedra zagotavlja linearno magnetilno lastnost transformatorja, ki odpravlja možnost feroresonance (nihanja napetosti in toka) v energetskega sistemu[6].

Niskonapetostni priključek (8)

Niskonapetostni priključek se nahaja na spodnji strani transformatorja in je nameščen v priključni omarici skupaj z ozemljitvenim priključkom [6].

Ohišje (9)

Ohišje transformatorja je izdelano iz aluminijeve zlitine ali iz visoko kakovostnega pocinkanega jekla in je zaradi dolgotrajne odpornosti proti koroziji obarvano. Na ohišju se nahaja omarica z niskonapetostnimi priključki (slika 16), napisana ploščica s podatki transformatorja, ventil za dodajanje olja, držala za dvig transformatorja, priključki za ozemljitev in indikator olja[6].



Slika 16: Priključna omarica visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU-123

Zagotovitev kakovosti

Merilni napetostni transformatorji so zasnovani in izdelani v skladu s standardi: SIST EN 61869-1, SIST EN 61869-2, SIST EN 61869-3. Kakovost izdelka je zagotovljena s certificiranim sistemom kakovosti, ISO 9001, ki pokriva vsa področja oblikovanja, proizvodnje in testiranja. Zagotavljati je potrebno certificiran sistem ISO 14001 in OHSAS 18001, ki dokazuje, da je okolju prijazen in deluje na varen način [6].

4.4 Visokonapetostni kondenzatorji

Z visokonapetostnim merilnim transformatorjem VPU-123 (slika 13) ne moremo doseči želene napetosti (110 kV) na visokonapetostni strani, saj bi tok, večji od 20 A, lahko poškodoval navitje oziroma transformator. Zato smo uporabili visokonapetostne kondenzatorje (slika 17), ki imajo kapacitivnost 482 pF.

Slika 17 prikazuje rabljen visokonapetostni kondenzator, ki je bil vgrajen vzporedno komoram visokonapetostnih 400 kV odklopnikov in uporabljen v zunanjih stikališčih. Kondenzator ima zelo dobre zunanje in notranje izolacijske lastnosti. Zunanja izolacija je sestavljena iz keramičnega izolatorja, ki zagotavlja mehansko trdnost, notranja pa sestavlja izolacijsko olje, ki služi za hlajenje kondenzatorja. Spodnja in zgornja stran kondenzatorja sta namenjeni za priklop oziroma vezavo v tokokrog. Sestavljeni sta iz aluminijeve zlitine, ki preprečuje korozijo. Konstrukcija visokonapetostnega kondenzatorja je z dimenzijami prikazana v prilogi 1.

Visokonapetostne kondenzatorje smo vzporedno priključili v tokokrog na visokonapetostno stran merilnega transformatorja in s tem omejili tok, ki teče po nizkonapetostnem navitju in povečali napetost na visokonapetostni strani.



Slika 17: Visokonapetostni kondenzator

Tabela 9: Podatki visokonapetostnih kondenzatorjev

Proizvajalec	Felten & Guillaume
Najvišja napetostna oprema [kV]	140
Številka nap. tablice	7901916
Kapacitivnost [pF]	482

4.5 Zahteve in omejitve visokonapetostnega vira

Zahteve:

Potrebna je bila postavitve merilnega visokonapetostnega transformatorja na primerno mesto, kjer ozemljeni deli drugih komponent (regulacijskega transformatorja, Marksovega generatorja, kapacitivnega delilnika, uporov,..) ne bodo vplivali na delovanje merilnega visokonapetostnega transformatorja.

Naslednja zahteva je bila priključitev visokonapetostnega merilnega transformatorja na napetosti vir. Transformator ima iz visokonapetostnega navitja po izoliranih ceveh speljane vodnike do vezalne omarice (slika 16). V omarici je izolirana plošča, kjer so pritrjeni vijaki, na katere smo pritrdili vodnike. Te vodnike smo povezali z regulacijskim transformatorjem, katerega smo uporabili kot napetostni vir merilnega visokonapetostnega transformatorja. Z regulacijskim transformatorjem lahko postopoma nastavljam napetost 0 – 525 V (slika 3).

Zahtevali smo tudi zanesljivo delovanje merilnega visokonapetostnega transformatorja pri napetosti 100 kV na visokonapetostni strani transformatorja.

Napetost na visokonapetostni strani merilnega transformatorja mora biti takšne velikosti, da se lahko izvajajo napetostni preskusi in meritve delnih praznitev za opremo nazivne napetosti do 35 kV.

Omejitve:

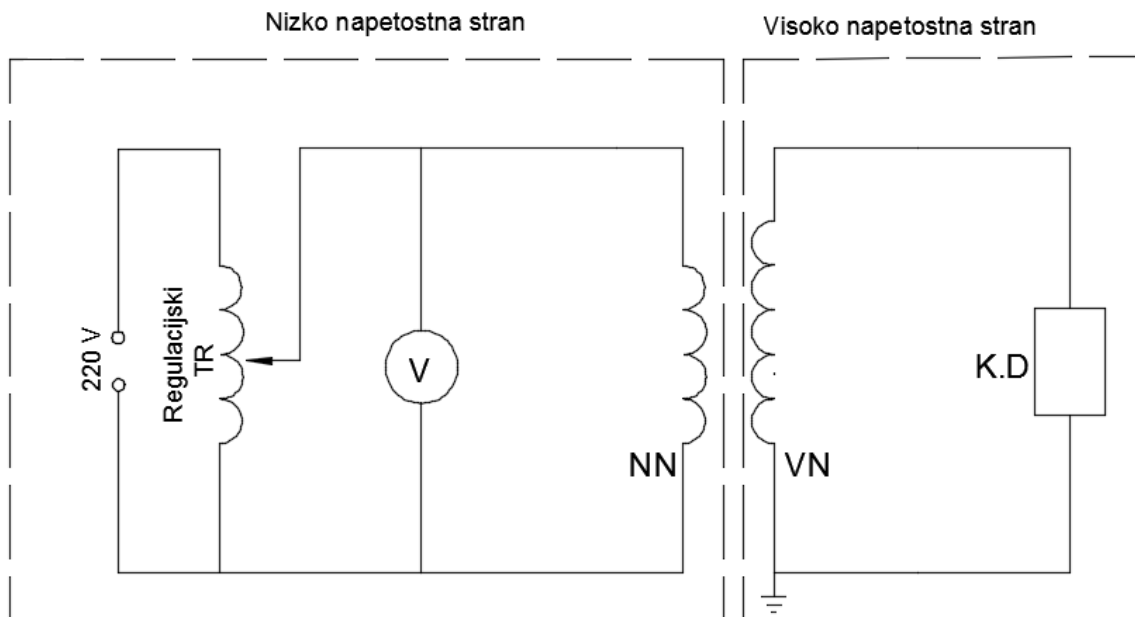
Regulacijski transformator, s katerim napajamo nizkonapetostno stran visokonapetostnega merilnega transformatorja, je omejen z močjo in napetostjo. V primeru večjih obremenitev z močjo ali napetostjo, lahko pride do poškodbe regulacijskega transformatorja.

Ker nam proizvajalec visokonapetostnega merilnega transformatorja ni posredoval podatkov o zmogljivosti transformatorja, smo maksimalni tok, ki lahko steče skozi transformatorsko navitje določili sami. Tako smo s pomočjo nazivnih podatkov transformatorja določili približno maksimalno vrednost toka, ki je 20 A. Če tok, ki teče po navitju transformatorja presega tok 20 A, lahko pride do pregrevanja navitja in do okvare samega transformatorja.

4.6 Preskus delovanja visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU-123

Uporaba napetostnega merilnega transformatorja kot vira visoke napetosti pomeni, da bom visokonapetostni merilni transformator napajali na nizkonapetostni strani. S tem bo merilni transformator transformiral nizko napetost na visoko napetost in napetost z visokonapetostne strani transformatorja se bo lahko uporabljala za meritve in preskuse.

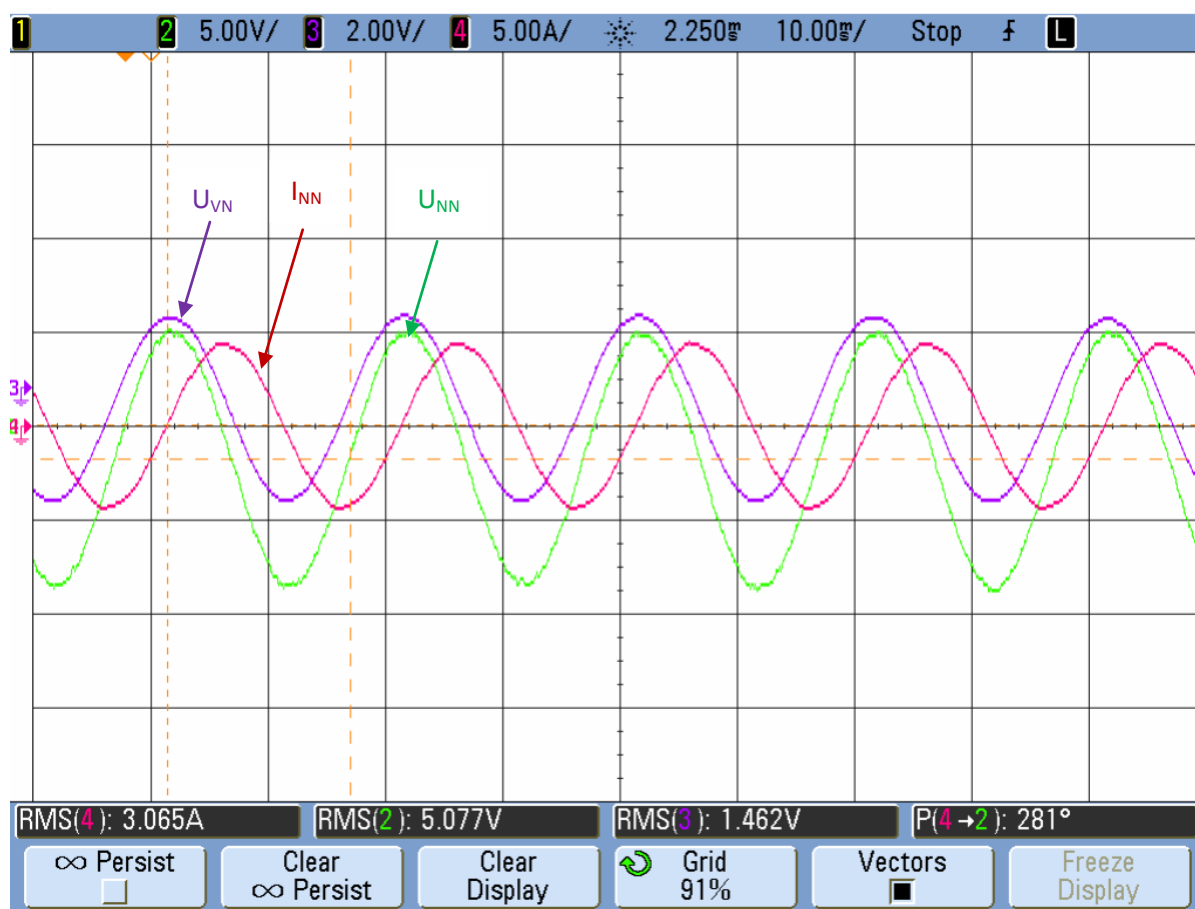
Govorimo o enofaznem visokonapetostnem merilnem transformatorju tipa VPU-123. Napajamo ga prekoregulacijskega avto-transformatorja (slika 3), na katerem lahko napetost poljubno nastavljam v območju 0 - 525 V. Regulacijski avto-transformator je na eni strani priključen na fazno napetost 230V, druga stran pa je priključena na sponke nizkonapetostne strani transformatorja. Delovanje visokonapetostnega merilnega transformatorja (slika 18) na nizko napetostni strani smo preverjali s tokovnimi kleščami in napetostno sondo, katere smo priključili na osciloskop. Transformator pretvarja nizko napetost (V) v visoko (kV), katero merimo s kapacitivnim delilnikom (slika 7). Delilno razmerje kapacitivnega delilnika smo izračunali (2.2) in je 3,75 kV.



Slika 18: Shema merilnega visokonapetostnega transformatorja VPU-123

4.6.1 Rezultati meritev karakteristik visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU-123

Slika 19 nam prikazuje sinusne karakteristike toka in napetosti, katere smo merili s pomočjo osciloskopa. Merili smo tok (rdeča), ki teče po nizkonapetostnem navitju transformatorja. Napetost na nizkonapetostni strani transformatorja (zeleno), katero smo merili s pomočjo napetostne sonde, smo postopoma zviševali po želenem nivoju. Napetost na visokonapetostni strani (vijolična) pa smo merili s pomočjo kapacitivnega delilnika. Izmerjen je bil tudi kot med tokom in napetostjo na nizkonapetostnem navitju. Iz slike 19 je razvidno, da tok za napetostjo na nizkonapetostni strani zaostaja za 80° .



Slika 19: Visokonapetostni merilni transformator VPU-123

Pred meritvami smo si pripravili tabelo z določenimi napetostmi na nizkonapetostni strani, s katerimi smo merili. Napetost smo postopoma višali približno po 5 V, saj natančneje ni bilo izvedljivo zaradi regulacijskega transformatorja. Odčitavali smo tok na nizkonapetostni strani in napetost na visokonapetostni strani transformatorja.

Tabela 10: Visokonapetostni merilni transformator VPU-123

U_{NN} [V]	I_{NN0} [A]	U_{VNKD0} [V]	φ_0 [°]	U_{IZVN0} [kV]
0,00	0,00	0,00	0	0,00
5,08	3,07	1,46	-79	5,48
10,26	6,27	2,90	-81	10,88
15,01	9,05	4,29	-81	16,09
20,01	12,01	5,59	-79	20,96
25,07	15,13	7,06	-81	26,48
30,51	18,35	8,59	-79	32,21
35,25	21,18	9,92	-79	37,20

Izmerjenim podatkom smo dodali izračunane napetosti na visokonapetostni strani. Računali smo po enačbi 4.4:

$$U_{IZVN0} = U_{VNKD0} \times k_{KD}, \quad (4.4)$$

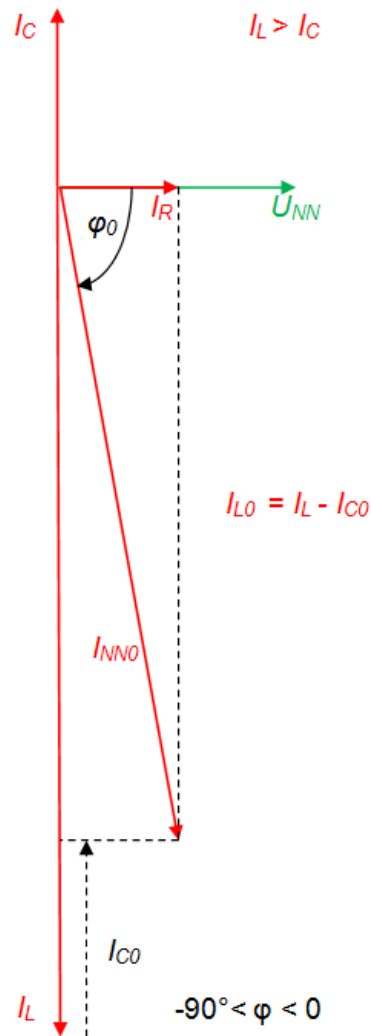
kjer je:

U_{IZVN0} - izračunana napetost na visokonapetostni strani [kV],

U_{VNKD0} - izmerjena napetost na visokonapetostni strani s kapacitivnim delilnikom [V],

k_{KD} - konstanta kapacitivnega delilnika [3,75 kV].

Izračunana napetost na visokonapetostni strani (U_{IZVN0}) je produkt izmerjene napetosti s kapacitivnim delilnikom na visokonapetostni strani (U_{VNKD0}) ter konstante vrednosti kapacitivnega delilnika (3,75 kV). Izračunana napetost nam pove kolikšna je napetost na visokonapetostni strani visokonapetostnega merilnega transformatorja.

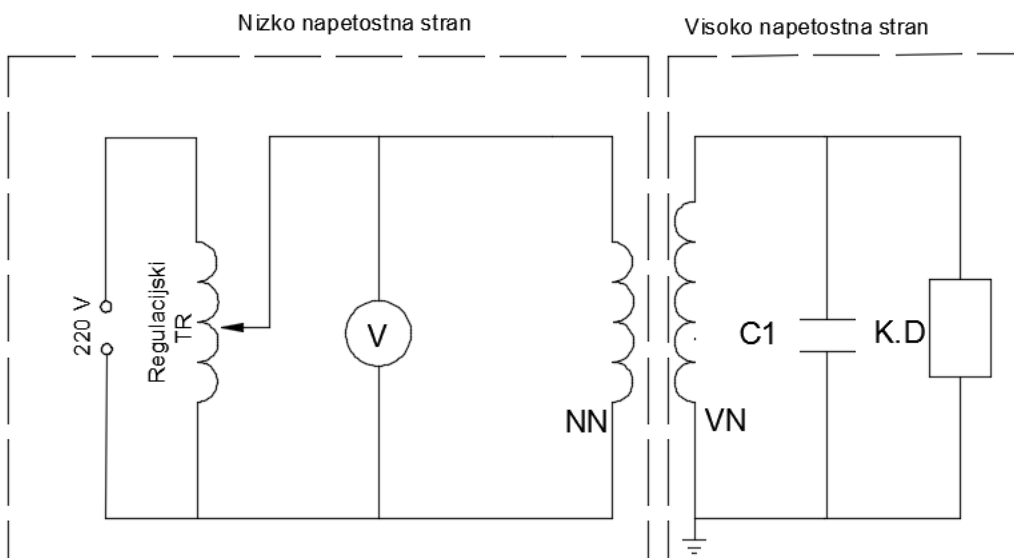


Slika 20: Kazalčni diagram visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU-123

Na sliki 20 je prikazan kazalčni diagram induktivno obremenjenega visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU-123. Razvidno je, da na nizkonapetostni strani induktivna komponenta toka (I_{L0}) zaostaja za napetostjo (U_{NN}).

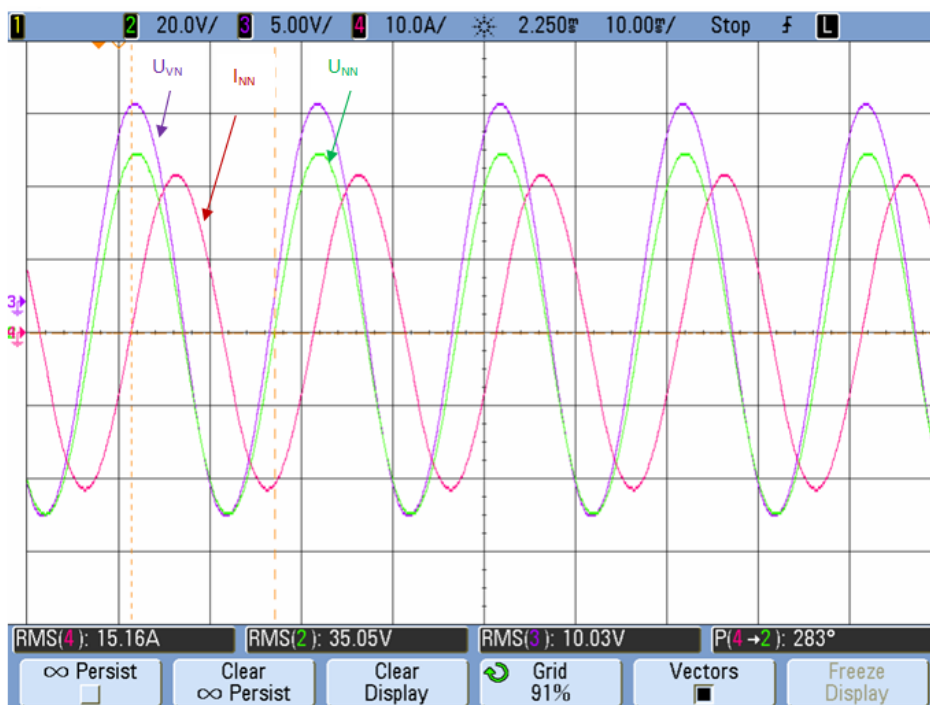
Pri meritvah s samim visokonapetostnim merilnim transformatorjem nismo dobili zelenih vrednosti. Tok skozi nizkonapetostno navitje je presegel dopustnih 20 A že pri 37 kV. Problem je velika stresena induktivnost in s tem velike jalove izgube. Jalovo moč lahko kompenziramo s kondenzatorji, zato smo na visokonapetostno stran transformatorja paralelno dodali visokonapetostni kondenzator (tabela 9).

4.6.2 Rezultati meritev karakteristik visokonapetostnega merilnega transformatorja z enim kondenzatorjem



Slika 21: Shema merilnega visokonapetostnega transformatorja s kondenzatorjem

Na sliki 21 je prikazana shema vezave visokonapetostnega transformatorja z vzporedno dodanim kondenzatorjem.

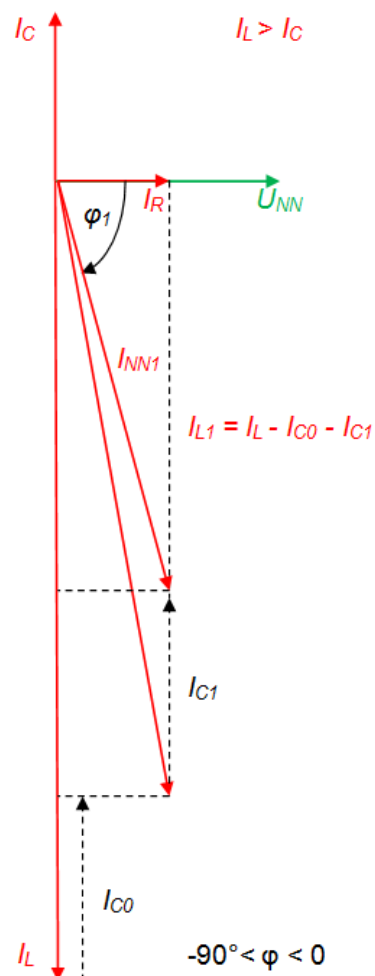


Slika 22: VNMT z enim kondenzatorjem

Tabela 11: VNMT z enim kondenzatorjem

$U_{NN}[\text{V}]$	$I_{NNI}[\text{A}]$	$U_{VNKDI}[\text{V}]$	$\varphi_1[^\circ]$	$U_{IZVNI}[\text{kV}]$
0,00	0,00	0,00	0	0,00
5,07	2,26	1,50	-77	5,63
10,00	4,40	2,88	-77	10,80
15,04	6,57	4,26	-77	15,98
20,31	8,81	5,78	-77	21,68
25,06	10,89	7,19	-77	26,96
30,13	13,06	8,65	-77	32,44
35,05	15,16	10,03	-77	37,61
40,50	17,20	11,50	-77	43,13
50,12	20,81	13,90	-77	52,13

Iz tabele 11 je razvidno, da rezultati gredo v pravo smer. Z dodanim kondenzatorjem smo dobili višjo napetost na visokonapetostni strani pri primarnem toku 20 A.



Slika 23: Kazalčni diagram transformatorja z enim kondenzatorjem

Slika 23 nam prikazuje kazalčni diagram transformatorja z enim kondenzatorjem. Vidimo, da sta se z dodanim kondenzatorjem zmanjšala induktivna komponenta toka (I_{LI}) in kot (φ_1), kar predstavlja boljše rezultate kot v prejšnjem primeru (slika 20).

Iz kazalčnega diagrama (slika 23) je razvidno, da je induktivna komponenta (I_{LO}) pri meritvah samega transformatorja večja od induktivne komponente (I_{LI}) pri meritvah z dodanim kondenzatorjem. V vseh primerih meritev je delovna komponenta toka (I_R) enaka. Z dodajanjem kondenzatorjev se zmanjšuje induktivna komponenta toka (I_L) in kot (φ) med tokom in napetostjo na nizkonapetostni strani.

Matematično smo izračunali induktivno komponento toka (4.5), delovno komponento toka (4.6) in preverili rezultat nizkonapetostnega toka (4.7).

$$I_{LI} = \sin(\varphi_1) \times I_{NN1} = \sin(80) \times 21 A = 20,68 A, \quad (4.5)$$

kjer je:

- I_{LI} - induktivna komponenta toka [A],
- I_{NN1} - tok nizkonapetostnega navitja [A],
- φ_1 - kot med tokom in napetostjo na nizkonapetostni strani [°].

$$I_R = \cos(\varphi_1) \times I_{NN1} = \cos(80) \times 21 A = 3,65 A, \quad (4.6)$$

kjer je:

- I_R - delovna komponenta toka [A],
- I_{NN1} - tok nizkonapetostnega navitja [A].
- φ_1 - kot med tokom in napetostjo na nizkonapetostni strani [°].

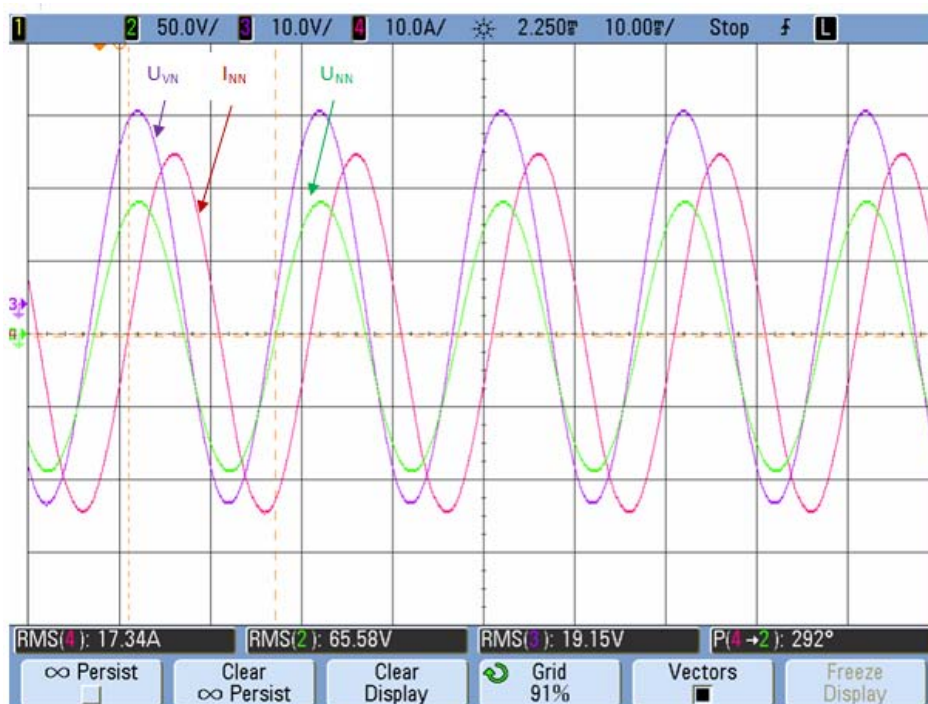
$$I_{NN1} = \sqrt{I_{LI}^2 + I_R^2} = \sqrt{20,68 A^2 + 3,65 A^2} = 21 A, \quad (4.7)$$

kjer je:

- I_{LI} - induktivna komponenta toka [A],
- I_{NN1} - tok nizkonapetostnega navitja [A],
- I_R - delovna komponenta toka [A].

Ampak ker rezultati še vedno niso dosegli naših ciljev, smo dodali še en kondenzator.

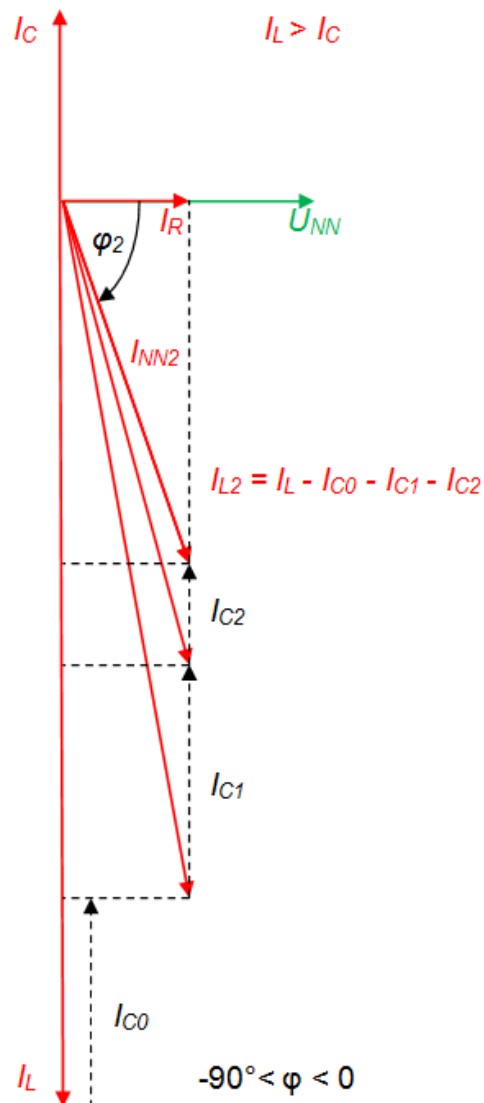
4.6.3 Rezultati meritev karakteristik visokonapetostnega merilnega transformatorja z dvema kondenzatorjema



Slika 24: VNMT z dvema kondenzatorjema

Tabela 12: VNMT z dvema kondenzatorjema

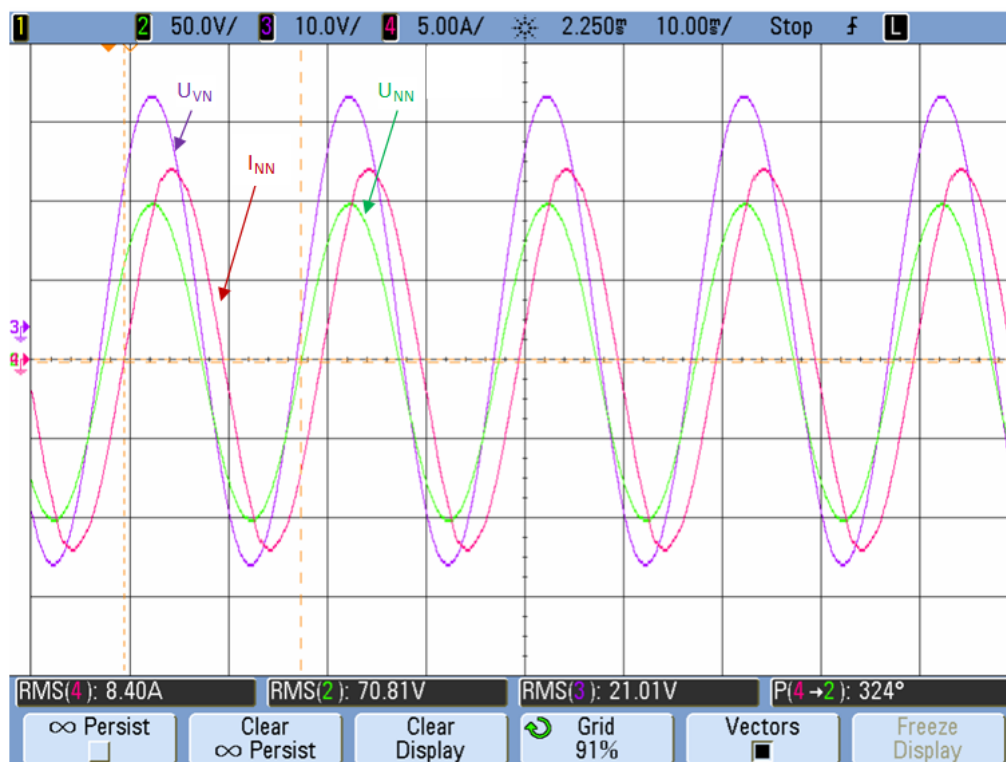
$U_{NN}[\text{V}]$	$I_{NN2}[\text{A}]$	$U_{VNKD2}[\text{V}]$	$\phi_2[^\circ]$	$U_{IZVN2}[\text{kV}]$
0,00	0,00	0,00	0	0,00
5,03	1,41	1,57	-74	5,89
10,09	2,75	2,95	-74	11,06
15,07	4,02	4,34	-72	16,28
20,28	5,39	5,86	-72	21,98
25,27	6,68	7,31	-70	27,41
30,85	8,18	8,99	-72	33,71
35,34	9,35	10,28	-70	38,55
40,07	10,61	11,66	-70	43,73
45,03	11,89	13,14	-70	49,28
50,28	13,28	14,67	-70	55,01
55,32	14,60	16,14	-70	60,53
60,25	15,94	17,60	-68	66,00
65,58	17,34	19,15	-68	71,81
70,21	18,80	20,69	-68	77,59
75,11	20,21	22,13	-68	82,99



Slika 25: Kazalčni diagram transformatorja z dvema kondenzatorjema

Iz kazalčnega diagrama (slika 25) in iz tabele 12 je razvidno, da so se rezultati ponovno izboljšali in se približali našim ciljem. Induktivna komponenta (I_{L2}) se je ponovno zmanjšala, prav tako pa se je zmanjšal tudi kot (φ_2) med tokom in napetostjo. V želji po še boljših rezultatih smo vzporedno vezali še tretji kondenzator.

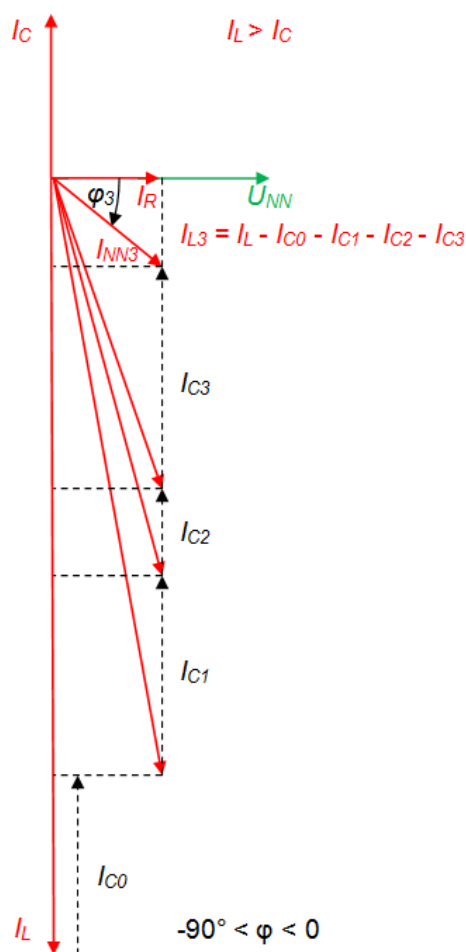
4.6.4 Rezultati meritev karakteristik visokonapetostnega merilnega transformatorja z tremi kondenzatorji



Slika 26: VNMT s tremi kondenzatorji

Tabela 13: VNMT s tremi kondenzatorji

U_{NN} [V]	I_{NN3} [A]	U_{VNKD3} [V]	φ_3 [°]	U_{IZVN3} [kV]
0,00	0,00	0,00	0	0,00
5,03	0,63	1,53	-49	5,74
10,27	1,23	3,04	-45	11,40
15,31	1,79	4,50	-41	16,88
20,28	2,32	5,96	-40	22,35
25,71	2,93	7,62	-40	28,58
30,22	3,43	8,94	-40	33,53
35,12	3,97	10,38	-38	38,93
40,64	4,65	12,06	-40	45,23
45,30	5,21	13,44	-38	50,40
50,48	5,88	14,97	-39	56,14
55,15	6,44	16,36	-38	61,35
60,82	7,12	18,05	-38	67,69
65,48	7,73	19,43	-38	72,86
70,81	8,40	21,01	-36	78,79
75,36	8,94	22,36	-36	83,85
80,48	9,55	23,88	-36	89,55
85,19	10,11	25,28	-36	94,79
90,64	10,75	26,89	-36	100,85

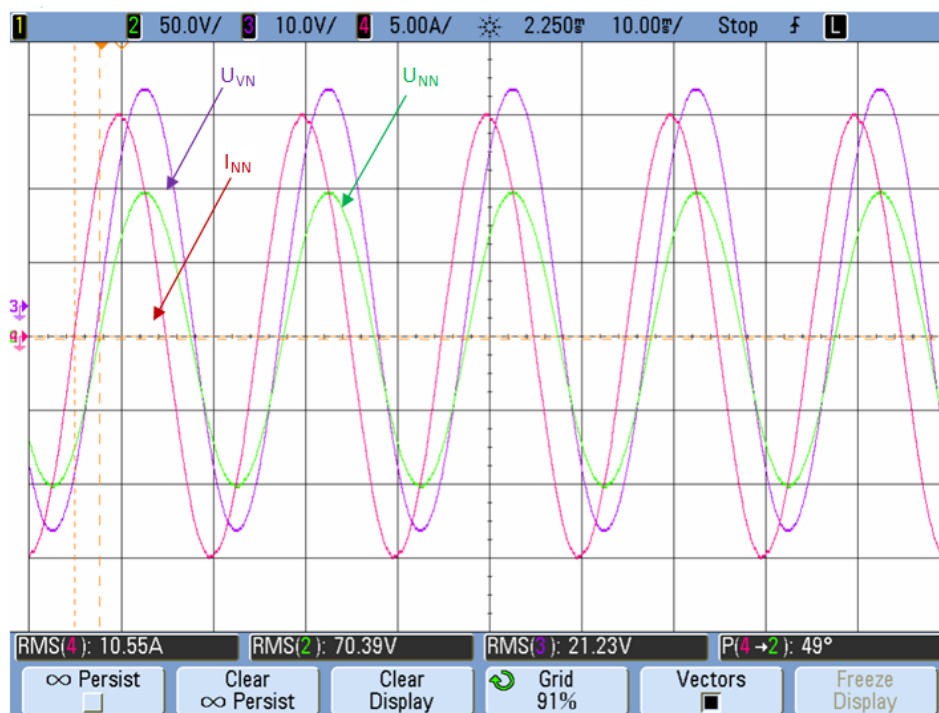


Slika 27: Kazalčni diagram transformatorja s tremi kondenzatorji

Iz kazalčnega diagrama (slika 27) in iz rezultatov iztabele 13je razvidno, da smo s tremi kondenzatorji dosegli želene rezultate. Induktivna komponenta (I_{L3}) se je precej zmanjšala in zelo približala napetosti na nizkonapetostni strani (U_{NN}). Zmanjšal se je tudi kot (φ_3) med tokom in napetostjo. To pomeni, da smo tok na nizkonapetostni strani zmanjšali, kar je zelo pomembno, saj večji kot je tok, bolj se navitje segreva. Tako lahko napetost na visokonapetostni strani transformatorja povečujemo do 100 kV, pri čemer bo tok na nizkonapetostni strani 10,67 A.

Na razpolago smo imeli še en kondenzator. Zanimali so nas še ti rezultati, zato smo dodali še četrti kondenzator.

4.6.5 Rezultati meritev karakteristik visokonapetostnega merilnega transformatorja s štirimi kondenzatorji



Slika 28: VNMT s štirimi kondenzatorji

Tabela 14: VNMT s štirimi kondenzatorji

$U_{NN}[\text{V}]$	$I_{NN4}[\text{A}]$	$U_{VNKD4}[\text{V}]$	$\varphi_4[^\circ]$	$U_{IZVN4}[\text{kV}]$	$p'_{\text{prestave}}[\text{V}]$
0	0	0	0	0	0,00
5,12	0,64	1,6	50	6	1171,88
10,11	1,34	3,04	50	11,4	1127,60
15,12	2,08	4,52	54	16,95	1121,03
20,36	2,87	6,09	52	22,84	1121,81
25,07	3,56	7,5	52	28,13	1122,06
30,29	4,38	9,11	52	34,16	1127,76
35,32	5,16	10,69	52	40,09	1135,05
40,49	5,93	12,23	50	45,86	1132,63
45,13	6,65	13,63	50	51,11	1132,51
50,38	7,45	15,18	50	56,93	1130,01
55,04	8,21	16,62	50	62,33	1132,45
60,77	9,08	18,35	50	68,81	1132,30
65,14	9,75	19,67	50	73,76	1132,33
70,39	10,55	21,23	49	79,61	1130,98
75,26	11,28	22,7	49	85,12	1131,01
80,64	12,09	24,32	49	91,21	1131,08
85,51	12,82	25,79	49	96,71	1130,98
90,12	13,51	27,18	49	101,93	1131,05

Prestavo novega visokonapetostnega vira, ki je sestavljen iz visokonapetostnega merilnega transformatorja in štirih visokonapetostnih kondenzatorjev smo izračunali (4.8) iz podatkov iztabele 14:

$$p'_{prestave} = \frac{U_{IZVN4}}{U_{NN4}}, \quad (4.8)$$

kjer je:

- $p'_{prestave}$ - izračunano prestavno razmerje [V],
- U_{IZVN4} - izračunana napetost na visokonapetostni strani [kV],
- U_{NN4} - napetost nizkonapetostnega navitja [V].

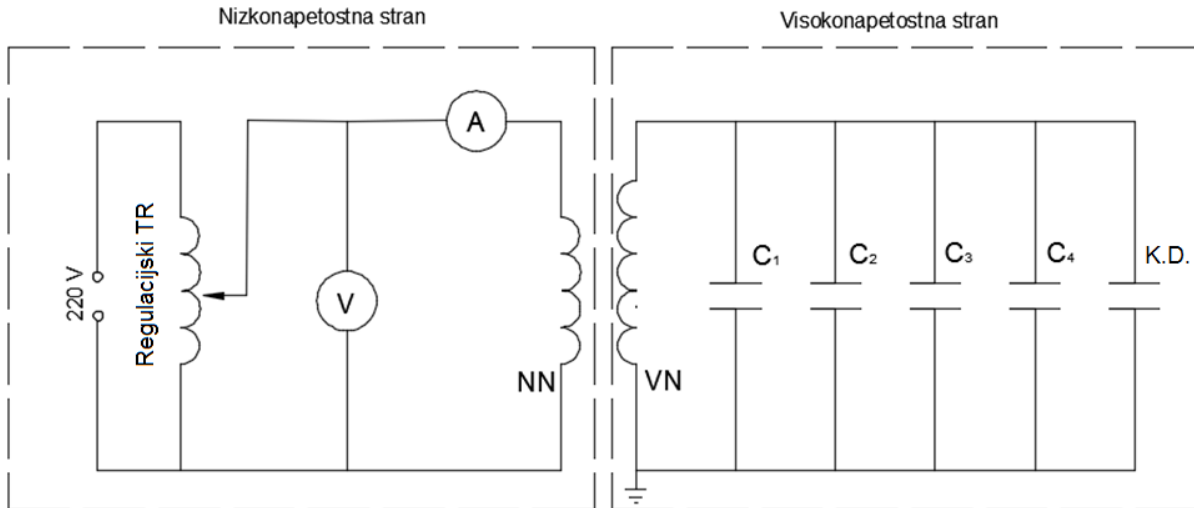
Prestavno razmerje ($p_{prestave}$) visokonapetostnega vira VPU-123-4 znaša 1132,15 V in je povprečje vseh izračunanih vrednosti prestav ($p'_{prestave}$).

$$p_{prestave} = \frac{p'_{prestave 1} + p'_{prestave 2} + \dots + p'_{prestave 19}}{19} = 1132,15 V, \quad (4.9)$$

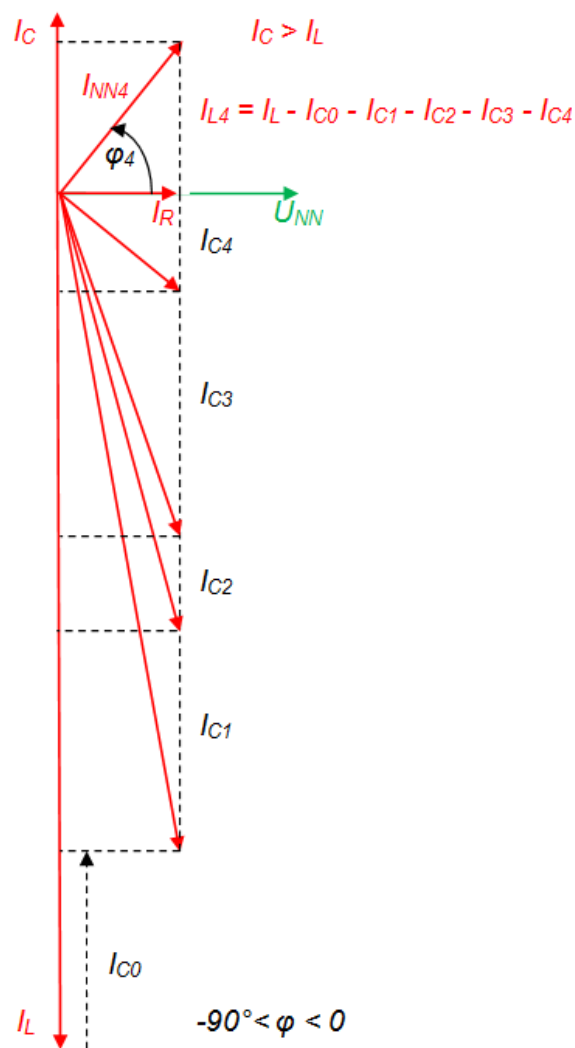
kjer je:

- $p_{prestave}$ - povprečna vrednost prestavnega razmerja [V].

Pri merjenju transformatorja s štirimi kondenzatorji smo ugotovili, da so rezultati nekoliko slabši, kot pri vezavi s tremi kondenzatorji. Ob vezavi transformatorja s štirimi kondenzatorji je pri napetosti 100 kV na visokonapetostni stranitok na nizkonapetostni strani 13,25 A, kar je 2,58 A več kot pri vezavi s tremi kondenzatorji. Da so meritve s štirimi kondenzatorji slabše kot s tremi je prišlo zaradi kompenzacije. To pomeni, da je kapacitivna upornost kondenzatorjev, ki smo jih dodali na visokonapetostni strani transformatorja večja od induktivne upornosti merilnega visokonapetostnega transformatorja. Kljub temu smo zaradi lažje mehanske sestave uporabili štiri kondenzatorje. Izdelava podnožja s štirimi kondenzatorji je namreč veliko lažja in izdelava obroča za povezavo le-teh je prav tako enostavnejša.



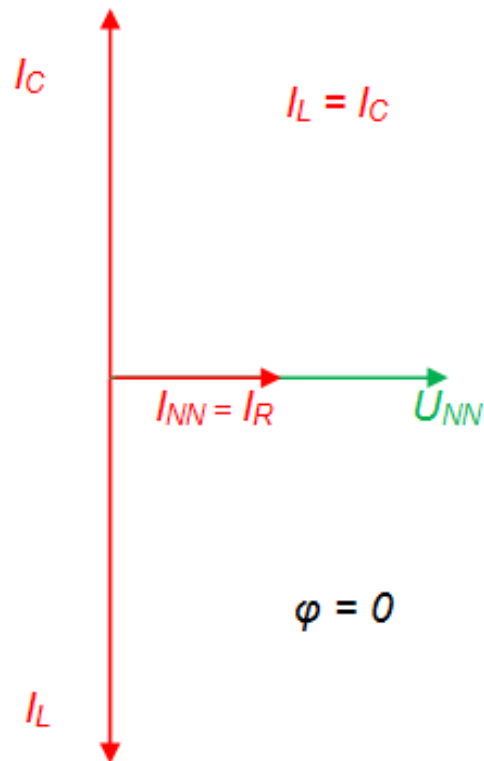
Slika 29: Shema visoko napetostnega vira VPU-123-4



Slika 30: Kazalčni diagram transformatorja s štirimi kondenzatorji

Iz kazalčnega diagrama (slika 30) je razvidna sprememba, ki se zgodi ob četrtem dodanem kondenzatorju. Vidimo, da induktivna komponenta (I_{LA}) prehiteva napetost na nizkonapetostni strani (U_{NN}), kar se zgodi zaradi kompenzacije. Do prevelike kompenzacije pride zaradi kapacitivne upornosti kondenzatorjev (X_C), ki je večja od upornosti na visokonapetostni strani transformatorja (X_2).

Za nas bi bilo najboljšo, če bi bil kot (φ) med tokom (I_{NN}) in napetostjo (U_{NN}) na nizkonapetostni strani 0° (slika 31). Zato nas zanima koliko kondenzatorjev (4.10) bi bilo potrebnih, da bi to dosegli in kakšna bi bila njihova kapacitivnost (4.11). To smo izračunali s pomočjo podane delovne komponente ($I_R = 3.65$).



Slika 31: Kazalčni diagram s kotom 0°

$$\text{št. kondenzatorjev} = \frac{I_R}{\cos(\varphi)} = 3,65, \quad (4.10)$$

kjer je:

- $\text{št. kondenzatorjev}$ - število kondenzatorjev,
- I_R - delovna komponenta toka [A].

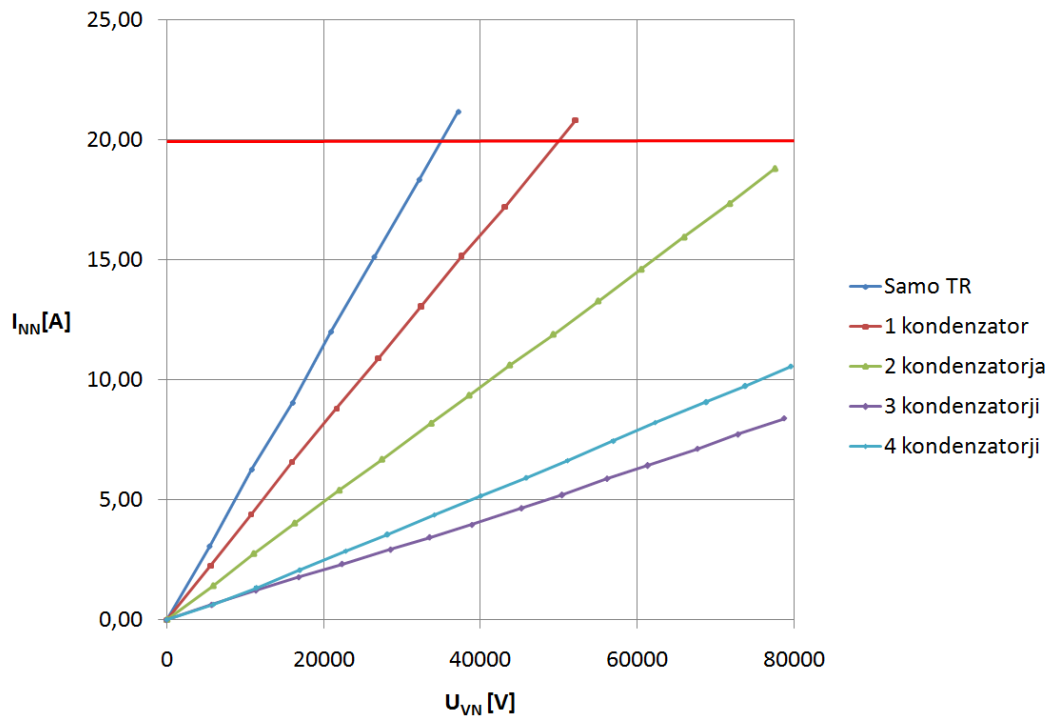
$$C_{3,65} = \text{št. kondenzatorjev} \times C = 1759,3 \text{ pF}, \quad (4.11)$$

kjer je:

- $C_{3,65}$ - kapacitivnost pri 3.65 kondenzatorjih [pF].
- C - kapacitivnost kondenzatorja [482 pF].

Tako bi za optimalno obratovanje visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU-123 potrebovali 3,65 visokonapetostne kondenzatorje in njihova kapacitivnost bi znašala 1759,3 pF.

4.7 Ugotovitve



Slika 32: Tok na nizkonapetostni strani v odvisnosti od napetosti na visokonapetostni strani vira

Slika 32 nam prikazuje tok skozi nizkonapetostno navitje v odvisnosti od izmerjene napetosti na visokonapetostni strani transformatorja. Razvidno je, da napetost linearno narašča, ter se s povečanjem števila paralelno vezanih kondenzatorjev tok zmanjšuje, napetost na visokonapetostni strani pa povečuje. Vidimo, da je vezava s tremi kondenzatorji boljša kot s štirimi, razlika se pojavi zaradi prevelike kompenzacije na visokonapetostni strani.

Do prevelike kompenzacije pride zaradi kapacitivne upornosti kondenzatorjev (X_C), ki je večja od sekundarne induktivne upornosti transformatorja (X_2). Za optimalno obratovanje je potrebno, da sta impedanci približno enaki $X_{L2} \approx X_C$.

$$X_{L2} = X_m + X_{\sigma 2}, \quad (4.11)$$

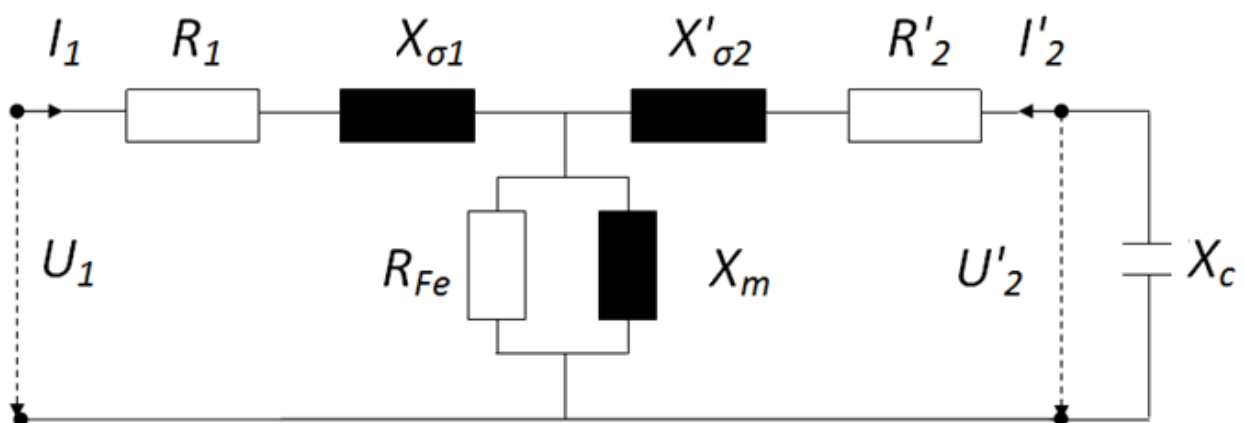
kjer je:

X_{L2} - induktivna upornost visokonapetostnega navitja z jedrom [Ω],

X_m - induktivna upornost jedra [Ω],

$X_{\sigma 2}$ - induktivna upornost visokonapetostnega navitja [Ω].

Popolno kompenzacijo dosežemo, če je kapacitivna upornost kondenzatorjev, ki jih dodamo na visokonapetostni strani napetostnega transformatorja enaka induktivni upornosti visokonapetostne strani transformatorja.



Slika 33: Nadomestno vezje merilnega transformatorja obremenjenega s kompenzacijskimi kondenzatorji

S popolno kompenzacijo povzročimo napetostno resonanco na visokonapetostni strani napetostnega merilnega transformatorja, kar pomeni, da je vhodna impedanca in napetost na visokonapetostni strani U'_2 največja. V praksi popolne kompenzacije ne moremo doseči, saj smo praviloma omejeni s kapacitivnostmi kondenzatorjev in njihovim številom. Lahko pa izvedemo delno kompenzacijo in s tem razbremenimo vir dela magnetilnega toka in hkrati zvišamo napetost na visokonapetostni strani transformatorja.

Pri izbiri kompenzacijskih kondenzatorjev je pomembno opozoriti, da se z napačno izbiro kondenzatorjev lahko visokonapetostna stran merilnega transformatorja spremeni v tokovno resonanco, kar bi bilo enako kot če bi visokonapetostne sponke kratko sklenili. Takšno stanje nastopi, kadar je kapacitivna upornost kompenzacijskih kondenzatorjev enaka induktivni upornosti stresne induktivnosti visokonapetostne strani napetostnegatransformatorja. Stresna induktivnost pri transformatorjih z odprtim jedrom zaradi slabšega sklopnega faktorja med navitjema znaša približno $0.2 X_m$. Zato se je treba izogniti vrednostim kompenzacijskih kondenzatorjev, ki so pri omrežni frekvenci v resonanci s stresno induktivnostjo.



Slika 34: Končni zgled visokonapetostnega vira VPU-123-4

Na sliki 34 je prikazana končna konstrukcija visokonapetostnega vira VPU-123-4, ki zajema visokonapetostni transformator VPU-123 ter štiri visokonapetostne kondenzatorje. Visokonapetostni vir je postavljen na stojišče (priloga 2), ki je izdelano iz železne konstrukcije. Napetostni vir je z vijaki pritrjen na železno konstrukcijo, ki je kvadratne oblike. Vodniki iz napetostnega vira so povezani na regulacijski transformator, na katerem nastavljammo napetost. Napetostni vir je na zgornji strani električno povezan z železnim obročem.

Tabela 15: Tehnični podatki visokonapetostnega vira VPU-123-4

Tip visokonapetostnega vira	VPU-123-4
Najvišja napetost na visokonapetostni strani [kV]	123
Najvišja napetost na nizkonapetostni strani [V]	108,7
Preizkusna izmenična napetost [kV]	230
Preizkusna udarna napetost [kV]	500
Nizkonapetostna napetost [V]	$100\sqrt{3}$
Krmilna napetost [V]	230
Frekvenca [Hz]	50
Najvišji tok visokonapetostnega vira [A]	20
Prestavno razmerje [V]	1132,15
Višina [m]	2,25
Masa [kg]	1000

Navodila za uporabo visokonapetostnega vira VPU-123-4

Visokonapetostni vir VPU-123-4 je nova naprava, kateri je bilo potrebno določiti navodila za uporabo.

1. Nizkonapetostno stran visokonapetostnega vira VPU-123-4 priključimo na regulacijski transformator z enofazno napetostjo 230 V, ki je v omarici transformatorja označena s črko u.
2. Drugi vodnik povežemo iz regulacijskega transformatorja v omarico do ozemljitvenega dela.
3. Preverimo ali je ozemljitvena palica priključena na napetostni vir. Če je priključena jo odstranimo.
4. Zapustimo visokonapetostni prostor in zapremo vrata.
5. Vključimo stikalo Q1 in kontroliramo signalne žarnice za vklop tega stikala.
6. Vključimo stikalo Q2 in kontroliramo signalne žarnice za vklop tega stikala.
7. Napetost počasi zvišujemo na želeno vrednost, ki jo kaže voltmeter na merilnem pultu.
8. Izklopimo stikalo Q1 in počakamo, da se regulacijski transformator vrne v izhodiščni položaj.
9. Izklopimo stikalo Q2.
10. Odpremo vrata v visokonapetostni prostor in visokonapetostni vir VPU-123-4 ozemljimo z ozemljitveno palico.

5. SKLEP

Glavni namen diplomske naloge je načrtovanje in izvedba visokonapetostnega preskusnega transformatorja z uporabo visokonapetostnega merilnega instrumentnega transformatorja, kot vira visoke napetosti. Z virom visoke napetosti se bodo izvajale meritve visokih napetosti in preskusi delnih praznitev. Ker so se s predhodnim visokonapetostnim merilnim transformatorjem v laboratoriju ICEM-TC začele pojavljati težave, smo od podjetja ELES dobili rabljen visokonapetostni merilni transformator VPU-123 ter visokonapetostne kondenzatorje. Transformator je bilo potrebno preskusiti ali je primeren za vir visoke napetosti in ugotoviti kako ga je potrebno predelati.

Začeli smo s preskusi visokonapetostnega merilnega transformatorja VPU-123, a rezultati niso bili primerni, saj napetost na visokonapetostni strani ni zadovoljila naših ciljev, tok pa je prekoračil naše omejitve. Zato smo na visokonapetostni strani paralelno dodajali po en kondenzator. Iz meritev in izračunov (4.5) smo ugotovili, da so se rezultati izboljševali. Najboljše rezultate smo z meritvami in izračuni dosegli pri tretjem dodanem kondenzatorju, kjer smo ob majhnem toku 10,75 A na nizkonapetostni strani dosegli visoko napetost 100,85 kV na visokonapetostni strani transformatorja. Z dodanim četrtem kondenzatorjem smo ugotovili, da je prišlo do kompenzacije, kar pomeni, da se je na visokonapetostni strani induktivna upornost spremenila v kapacitivno. Zato so bili rezultati slabši (tok na nizkonapetostni strani je bil 13,51 A, napetost na visokonapetostni strani pa 101,93 kV). Kljub boljšim rezultatom s tremi kondenzatorji smo se odločili za konstrukcijo s štirimi kondenzatorji, saj nam je to omogočilo lažjo postavitev.

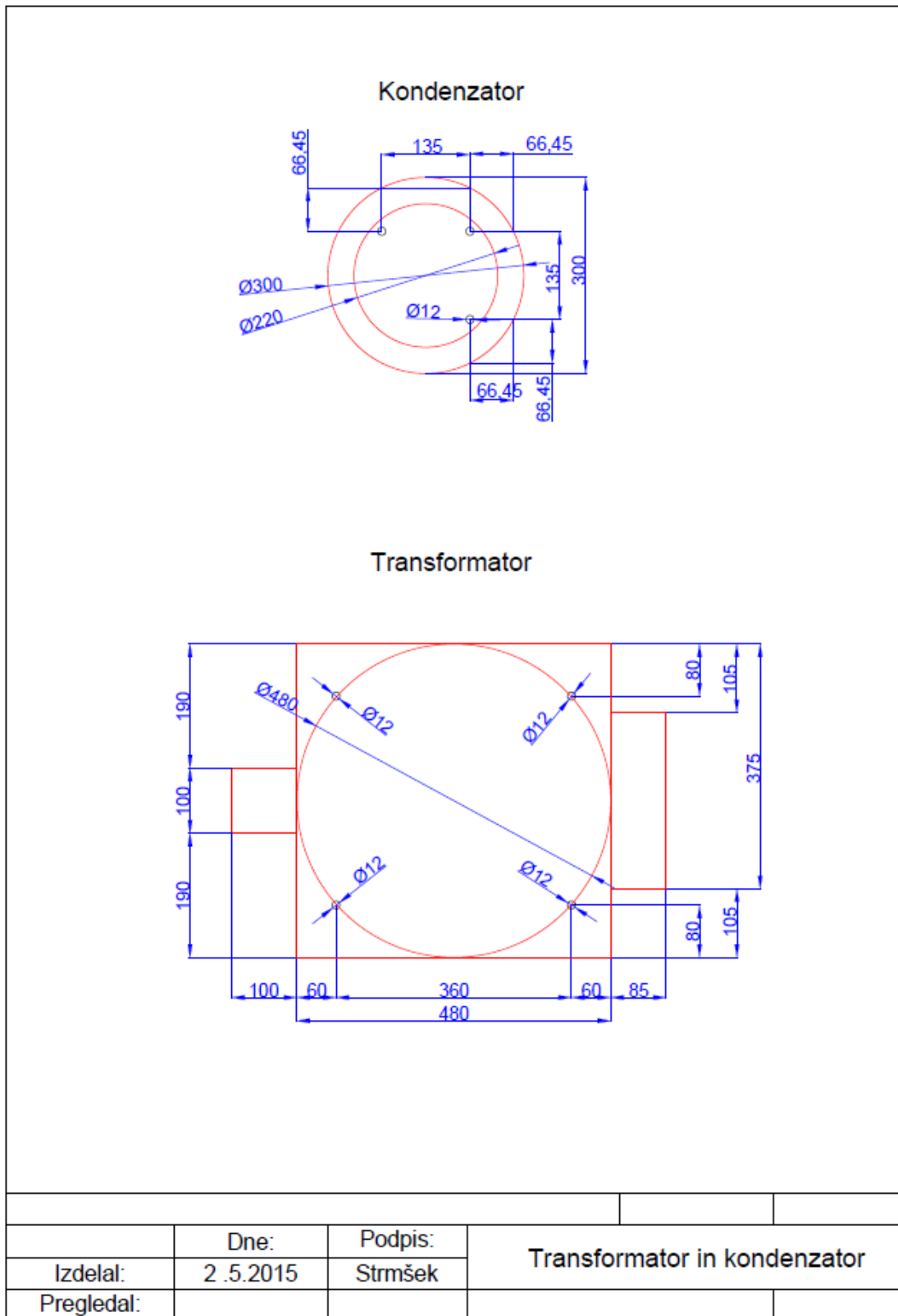
Ugotovili smo, da je visokonapetostni vir VPU-123-4 zaradi možnosti izvajanja meritev visoke napetosti in preskusov delnih praznitev, primeren za naš laboratorij, zato smo ga preuredili za naše potrebe. Izdelali smo stojišče pravokotne oblike za transformator in štiri kondenzatorje. Izdelali smo tudi obroč, ki na visokonapetostni strani povezuje transformator s kondenzatorji. V visokonapetostni merilni tehniki je predvidena okrogla oblika obroča, saj je tako elektrina električnega polja enakomerno porazdeljena po njem. V našem primeru zaradi težje izdelave in prostorne stiske v energetske laboratoriju ICEM-TC to ni bilo mogoče, zato je naš obroč dobil obliko pravokotnika z ovalnimi robovi. Ta oblika nima tako dobro porazdeljene elektrine električnega polja kot pri okrogli obliki, ampak kljub temu ustrežna meritvenim potrebam v energetske laboratoriju ICEM-TC.

Viri:

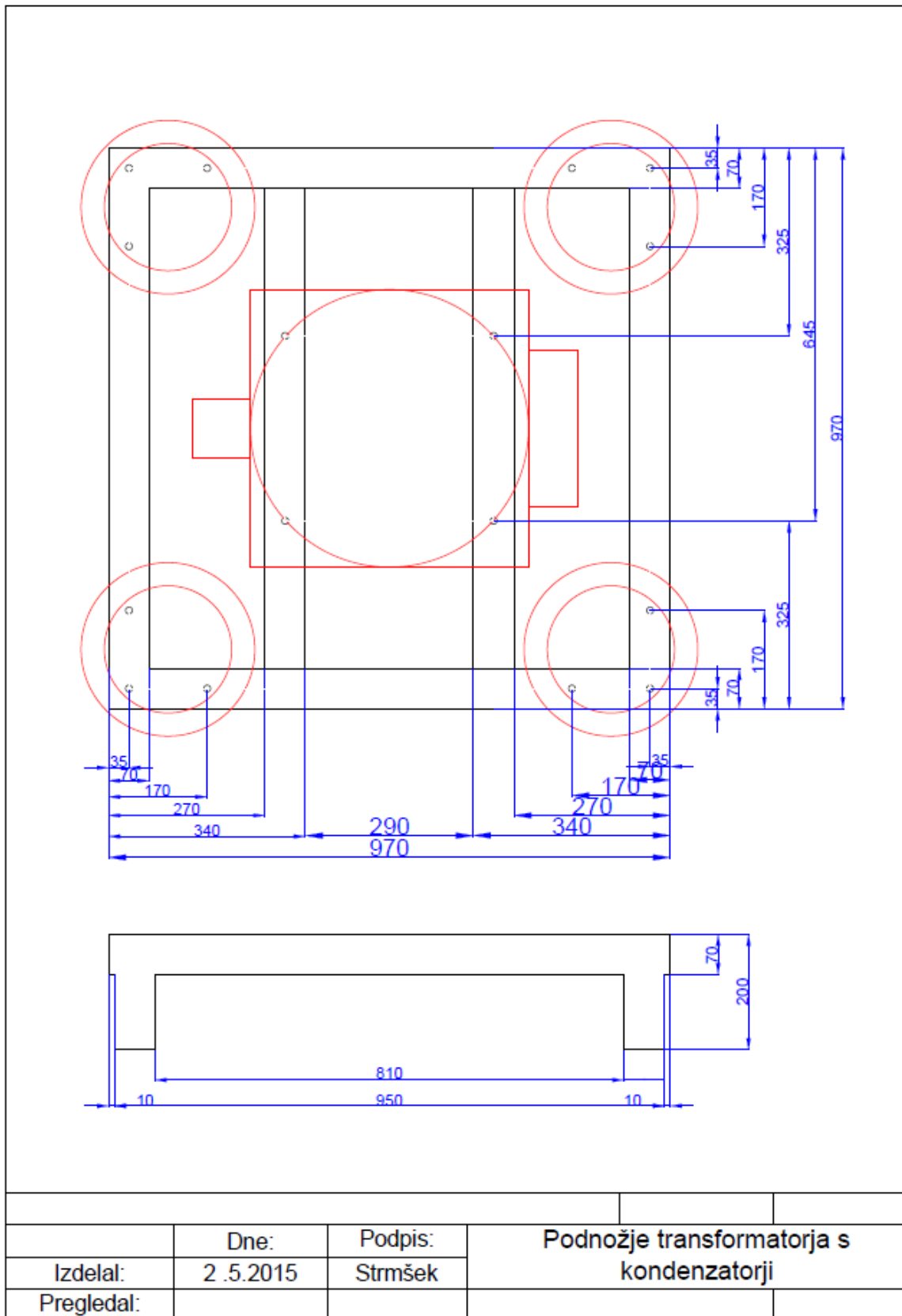
- [1] Ivan Zagradišnik, Električni in elektromehanski pretvorniki, zapiski predavanj, FERI Maribor, 2008
- [2] Bojan Slemnik, Miralem Hadžiselimovič, Električni in elektromehanski pretvorniki, zbirka rešenih nalog, FERI Maribor, 2008
- [3] Jože Pihler, Stikalne naprave elektroenergetskega sistema, FERI Maribor, 2003
- [4] Jože Voršič, Jože Pihler, Tehnika visokih napetosti in velikih tokov, FERI Maribor, 2008
- [5] Jože Pihler, Dimitrij Kos, Darko Koritnik, Marjan Stegne, Laboratorijske vaje iz visokonapetostne tehnike, FERI Maribor, 2003
- [6] Končar, merilni transformatorji VPU. Dostopno na: http://www.koncar-mjt.hr/docs/koncarmjtHR/documents/55/1_0/Original.pdf, [02.06.2015]
- [7] Danijel Glušič, Dušilka za velike kratkostične tokove, FERI Maribor, 2012
- [8] Napetostni merilni transformatorji. Dostopno na: <https://www.fer.unizg.hr/download/repository/Naponski-transformator%5B5%5D.pdf>, [02.06.2015]
- [9] Matej Kovač, Izvedba meritev in preskušanj v vn stikališčih, FERI Maribor, 2012
- [10] ICEM-TC. Dostopno na: <http://www.icem-tc.si/>, [02.06.2015]

PRILOGE

Priloga 1: Dimenzije kondenzatorja in transformatorja



Priloga 2: Dimenzije stojišča transformatorja s kondenzatorji





Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17
2000 Maribor, Slovenija



IZJAVA O USTREZNOSTI ZAKLJUČNEGA DELA

Podpisani mentor :

red. prof. dr. Jože Pihler
(ime in priimek mentorja)

in somentor (eden ali več, če obstajata):

mag. Darko Koritnik
(ime in priimek somentorja)

Izjavljam (-va), da je študent

Ime in priimek: Mitja Strmšek

Vpisna številka: E10M380

Na programu: Elektrotehnika VS

izdelal zaključno delo z naslovom:

Uporaba napetostnega merilnega transformatorja kot vira visoke napetosti
(naslov zaključnega dela v slovenskem in angleškem jeziku)

Usage voltage measuring transformer as a source of high voltage

v skladu z odobreno temo zaključnega dela, Navodilih o pripravi zaključnih del in mojimi (najinimi oziroma našimi) navodili.

Preveril (-a, -i) in pregledal (-a, -i) sem (sva, smo) poročilo o plagiatstvu.

Datum in kraj:
23.06.2015, Maribor

Podpis mentorja: Pihler

Datum in kraj:
23.06.2015, Maribor

Podpis somentorja (če obstaja):

Koritnik

Priloga:

- Poročilo o preverjanju podobnosti z drugimi deli.«



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17
2000 Maribor, Slovenija



IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani/-a

Strmšek Mitja

z vpisno številko

E1011380sem avtor/-ica diplomskega dela z naslovom: Uporaba napetostnegamerilnega transformatorja kot vira visoke napetosti*(naslov diplomskega dela)*

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal/-a samostojno pod mentorstvom (naziv, ime in priimek)

red. prof. dr. Jožeta Pihlerja

in somentorstvom (naziv, ime in priimek)

mag. Darka Koritnika

- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela.
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v DKUM.

V Mariboru, dne 23.06.2015

Podpis avtorja/-ice:



Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17
2000 Maribor, Slovenija



**IZJAVA O ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE VERZIJE ZAKLJUČNEGA
DELA IN OBJAVI OSEBNIH PODATKOV DIPLOMANTOV**


Ime in priimek avtorja-ice: Mitja Strmšek
 Vpisna številka: E1011380
 Študijski program: Elektrotehnika VS
 Naslov zaključnega dela: Uporaba napetostnega merilnega
transformatorja kot vira visoke napetosti
 Mentor: red. prof. dr. Jože Pihler
 Somentor: mag. Darko Kovčnik

Podpisani-a Mitja Strmšek izjavljam, da sem za potrebe arhiviranja oddal elektronsko verzijo zaključnega dela v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru. Zaključno delo sem izdelal-a sam-a ob pomoči mentorja. V skladu s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorskih in sorodnih pravicah dovoljujem, da se zgoraj navedeno zaključno delo objavi na portalu Digitalne knjižnice Univerze v Mariboru.

Tiskana verzija zaključnega dela je istovetna z elektronsko verzijo elektronski verziji, ki sem jo oddal za objavo v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru.

Zaključno delo zaradi zagotavljanja konkurenčne prednosti, varstva industrijske lastnine ali tajnosti podatkov naročnika: _____ ne sme biti javno dostopno do _____ (datum odloga javne objave ne sme biti daljši kot 3 leta od zagovora dela).

Podpisani izjavljam, da dovoljujem objavo osebnih podatkov, vezanih na zaključek študija (ime, priimek, leto in kraj rojstva, datum zaključka študija, naslov zaključnega dela), na spletnih straneh in v publikacijah UM.

Datum in kraj: 23.06.2015, Maribor Podpis avtorja-ice: 

Podpis mentorja: _____
(samo v primeru, če delo ne sme biti javno dostopno)

Podpis odgovorne osebe naročnika in žig: _____
(samo v primeru, če delo ne sme biti javno dostopno)