

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

NADOMJESNI MODELI REGULACIJSKOG TRANSFORMATORA

Rijeka, srpanj 2016.

Marin Erik

0069049053

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

NADOMJESNI MODELI REGULACIJSKOG TRANSFORMATORA

Mentor: Mr. sc. Marijana Živić Đurović, v. pred.

Rijeka, srpanj 2016.

Marin Erik

0069049053

TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike
Br.: 602-04/16-14/40
Rijeka, 14.03.2016.

Z A D A T A K
za završni rad

Pristupnik: Marin Erik

Matični broj: : 0069049053

Lokalni matični broj: 13800059

Naziv zadatka: **NADOMJESNI MODELI REGULACIJSKOG
TRANSFORMATORA**

Title (*English*): **EQUIVALENT MODELS OF TRANSFORMERS WITH ON-
LOAD TAP CHANGER**

Polje znanstvenog područja: 2.03. Elektrotehnika
Grana znanstvenog područja: 2.03.01 elektroenergetika

Energetski transformator kao element elektroenergetske mreže. Dvonamotni regulacijski energetski transformatori. Nadomjesni modeli regulacijskog energetskog transformatora. Tronamotni regulacijski transformator i njegovi nadomjesni modeli.

Mentor:



V. pred. mr. sc. Marijana Živić Đurović,
dipl.ing.

Predsjednica Povjerenstva:



Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik, dipl.ing.

Student:



Marin Erik

Završni radovi moraju biti u skladu s „Uputama za pisanje završnog / diplomskog rada“.

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

IZJAVA

Sukladno članku 10. "Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija" Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku za završni rad pod brojem 602-04//16-14/40

(Nadomjesni modeli regulacijskog transformatora) uz konzultiranje s mentorom.

Marin Erik

Rijeka, srpanj 2016.

0069049053

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ENERGETSKI TRANSFORMATOR	2
2.1 Dijelovi transformatora	4
2.1.1 Aktivni dijelovi transformatora	5
2.1.2 Pasivni dijelovi transformatora.....	6
2.2 Osnovne jednadžbe transformatora	10
2.3. Gubici transformatora.....	11
2.4. Prazni hod transformatora	12
2.5. Kratki spoj transformatora.....	14
2.6. Korisnost transformatora	15
2.7. Načini hlađenja.....	16
3. DVONAMOTNI REGULACIJSKI ENERGETSKI TRANSFORMATORI	18
3.1. Spojevi dvonamotnih transformatora	19
3.2. Nadomjesni modeli regulacijskog energetskog transformatora	21
3.3. Proračun parametara regulacijskog transformatora.....	24
3.3.1 Vrijednosti pojednostavljenog nadomjesnog modela.....	27
3.3.2. Izračun vrijednosti točnog nadomjesnog modela	29
3.4. Proračun strujno-naponskih prilika kod regulacijskog transformatora	31
4. TRONAMOTNI REGULACIJSKI TRANSFORMATOR I NJEGOVI NADOMJESNI MODELI.....	35
5. AUTOTRANSFORMATORI	38
5.1. Silazni autotransformator	39
5.2. Uzlazni autotransformator.....	40
5.3. Spojevi autotransformatora	42
5.4. Primjena autotransformatora	42
5.5 Nadomjesni model regulacijskog auto transformatora.....	43
6. ZAKLJUČAK	44
7. LITERATURA	45
8. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	48

1. UVOD

Trendovi u Hrvatskoj i Europi sve više teže ka sve većim udjelu obnovljivih izvora električne energije u distribucijskim mrežama za isporuku električne energije krajnjim korisnicima. U budućnosti se predviđa da će udio električne energije koja dolazi u mrežu iz obnovljivih izvora energije iznositi i do 30%. Ovakva relativno visoka zastupljenost obnovljivih izvora energije uzrokuje porast varijacija napona, jer oni ovise i o vremenskim prilikama. Zbog toga se u distribucijskim mrežama sve više koriste regulacijski transformatori za regulaciju pod teretom. Regulacijski transformator odabire se prema zahtjevima mreže, a kako bi se oni mogli točno isprojektirati potrebno je poznavati nadomjesne modele regulacijskih transformatora koji su opisani detaljnije u nastavku.

U drugom poglavlju promatramo energetske transformator kao element elektroenergetske mreže, koji su njegovi osnovni dijelovi te osnovne jednačbe koje su potrebne za poznavanje transformatora.

Treće poglavlje govori o dvonamotnim regulacijskim energetskim transformatorima, te koji su njihovi spojevi. Promatraju se nadomjesni modeli regulacijskih energetskih transformatora, te su opisani pripadajućim formulama. Nastavno na navedene nadomjesne modele opisan je proračun parametara regulacijskog transformatora, te je rađen proračun strujno-naponskih prilika kod regulacijskog transformatora.

U četvrtom poglavlju opisan je tronamotni regulacijski transformator, sa njegovim pripadajućim formulama, te su opisani autotransformatori kao posebna vrsta energetskih transformatora sa pripadajućim nadomjesnim modelom.

2. ENERGETSKI TRANSFORMATOR

Transformator je element elektroenergetske mreže odnosno električni uređaj koji pomoću elektromagnetske indukcije pretvara jedan iznos napona ili struje u drugi, dok pritom frekvencija ostaje ista. Priključenjem primarnog namota na nazivni izmjenični napon, kroz primarnu zavojnicu poteći će izmjenična struja, koja u zavojnici stvara promjenjivo magnetsko polje. Kao posljedica stvaranja promjenjivog magnetskog polja inducira se izmjenični napon na sekundarnoj strani ukoliko se on nalazi u blizini djelovanja magnetskog polja, [2].

Na primarni namot dovodi se električna energija iz generatora ili električne mreže, induktivno se prenosi na sekundarni namot i predaje se energija krajnjem priključenom trošilu ili mreži. Transformator je statičan element jer nema pokretnih dijelova. Osnovna podjela transformatora je na energetske i mjerne transformatore.

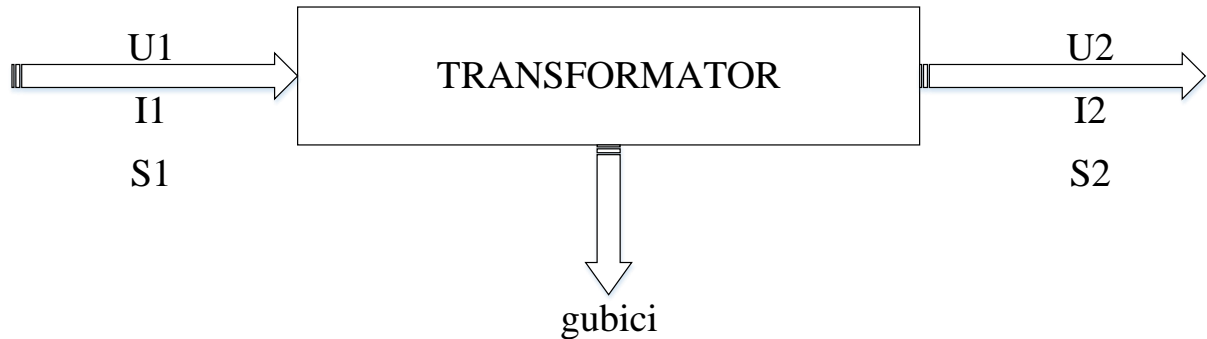
Korisnost današnjih velikih transformatora iznosi oko 99%. Upotrebljavaju se za povišenje ili sniženje napona.

Transformatori ne mogu istovremeno povećavati napon i struju, ako povećavamo napon, struja se mora proporcionalno smanjivati i obrnuto. Transformator ima male gubitke pošto nema pokretnih dijelova pa ne postoji ni mehaničko trenje. Rade samo na izmjeničnu električnu struju zato što istosmjerna struja ne može stvoriti elektromagnetsku indukciju. Primarna i sekundarna električna snaga transformatora je približno jednaka zbog toga što se dio snage izgubi na gubitke, [3].



Slika 2.1: Energetski transformator, TS Funtana

Na slici 3.2 vidi se pojednostavljena blok shema energetskog transformatora. U_1 i I_1 označavaju napon i struju primara, a U_2 i I_2 napon i struju sekundara. Imamo i snage S_1 i S_2 koje označavaju snagu primara i snagu sekundara, odnosno P_g koja označava gubitke transformatora.



Slika 2.2: Blok shema energetskog transformatora

Osnovna podjela transformatora je na zračne transformatore i transformatore sa željeznom jezgrom. Zračni transformatori se koriste u elektronici i njihov se magnetski tok zatvara u zraku, dok se transformatori sa željeznom jezgrom koriste u energetici i njihov se magnetski tok zatvara kroz željeznu jezgru.

S obzirom na namjenu razlikujemo energetske i mjerne transformatore. Energetski transformatori su namijenjeni prijenosu i pretvorbi električne energije. Mjerni se pak transformatori upotrebljavaju za električna mjerenja. U ovom radu će se promatrati energetski transformatori.

Energetski se transformatori dijele na: distribucijske koji su u pravilu manjih snaga, mrežne srednjih i velikih snaga, bloktransformatore i specijalne transformatore, [3], [4].

2.1 Dijelovi transformatora

Glavni dijelovi transformatora se dijele na aktivne i pasivne. Transformatori malih snaga imaju samo aktivne dijelove zato što su malih dimenzija i zaštićeni kućištem uređaja u koji su ugrađeni te im stoga nisu potrebni pasivni dijelovi. Energetski transformatori koji se nalaze u trafostanicama su velikih snaga te osim aktivnih dijelova imaju i pasivne dijelove, [4].

Aktivni dijelovi transformatora su željezna jezgra i namoti koji služe za transformaciju električne energije. Pasivni dijelovi transformatora ne služe za transformaciju energije ali omogućavaju njeno odvijanje. U njih se ubrajaju: kotao (7), transformatorsko ulje, konzervator (5), priključnice na primarnoj (1) i sekundarnoj (3) strani, termometar (9), hladnjak rashladne tekućine (8), ispust rashladne tekućine transformatora (6), visokonaponska sabirnica (4), priključak uzemljivača zvjezdišta primara (2). Rashladno sredstvo transformatora može biti ulje, zrak ili kruto sredstvo, [10], [13].



Slika 2.3: *Dijelovi transformatora*

2.1.1 Aktivni dijelovi transformatora

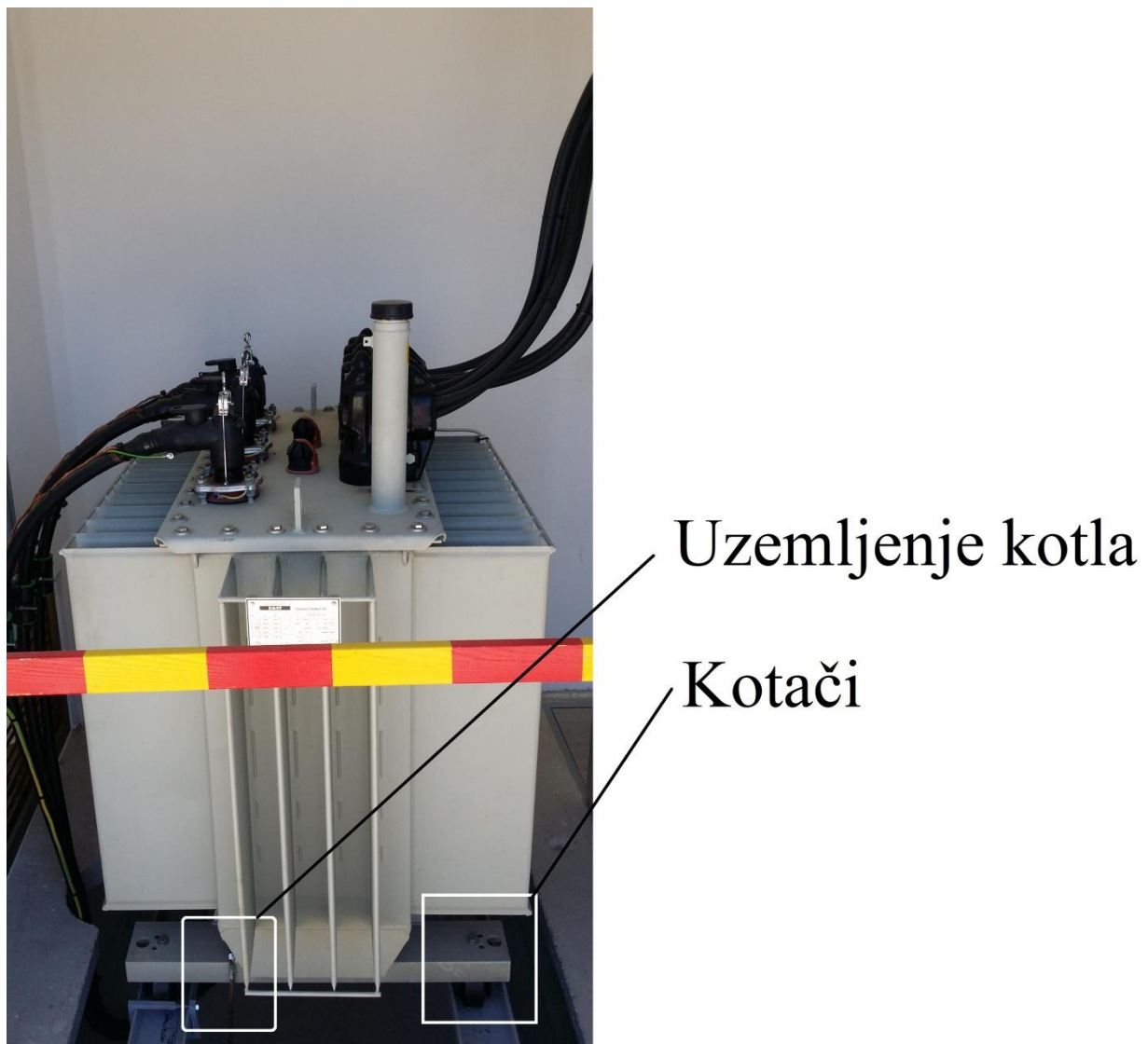
Željezna (magnetna) jezgra služi za vođenje silnica magnetskog polja. Izgrađena je od željeza jer je najbolji magnetski vodič. Izrađuje se od hladno valjanih magnetskih limova debljine 0.23 do 0.35mm što doprinosi smanjenju gubitaka u željezu. Ranije su se upotrebljavali toplo valjani limovi koji su imali veće gubitke u željezu te im je zbog toga korisnost bila manja. Magnetska jezgra mora biti u potpunosti zatvorena kako bi magnetske silnice ostale u željezu. Magnetski limovi se izoliraju s jedne strane kako ne bi bili u kontaktu sa susjednim limom, već od njega odvojeni. Pri završetku slaganja jezgre ona se lakira u potpunosti i vijcima se mehanički steže kako ne bi došlo do vibracija zbog magnetskih sila, [2], [3].

Sljedeći aktivni dio energetskih transformatora su namoti. Primarni namot prima električnu energiju iz generatora ili električne mreže, zatim je induktivno prenosi na sekundarni namot te predaje priključenom trošilu ili mreži. Transformator je statičan element jer nema pokretnih dijelova. Žice namotaja rade se isključivo od bakra i one se namataju na izolirane stupove željezne jezgre. Izolacija se postavlja na žice namota kako bi se postigla međusobna izolacija pojedinih vodiča. Žice se izoliraju posebnim izolacijskim lakovima koje osim izolacijskih svojstava imaju malu debljinu, mogu izdržati visoku temperaturu (preko 100°C) i elastični su što sprječava pucanje žica pri savijanju. Izolacijski materijali su najosjetljiviji na povišenu temperaturu pa su zbog toga to i najosjetljiviji dijelovi transformatora, [8].

2.1.2 Pasivni dijelovi transformatora

Kotao je jedan od pasivnih dijelova energetskih transformatora. To je kućište transformatora koje se izrađuje od debelog željeznog lima. U njemu se nalaze namoti i željezna jezgra, a kućište se puni transformatorskim uljem koje služi za hlađenje transformatora.

Kotao ima ugrađene razne cijevi, ventilatore, rebra ili radijatore kako bi se povećala površina za hlađenje, te potom kako bi se ugrijano ulje što prije ohladilo to jest da se toplina što prije preda u okolinu. Svaki kotao treba biti dobro uzemljen na mjestu na kojem se postavlja. Veliki transformatori imaju kotače zbog lakšeg transporta i manevriranja u prostoriji. Kotao se zatvara sa gornje strane sa brtvom i vijcima, [2], [3].



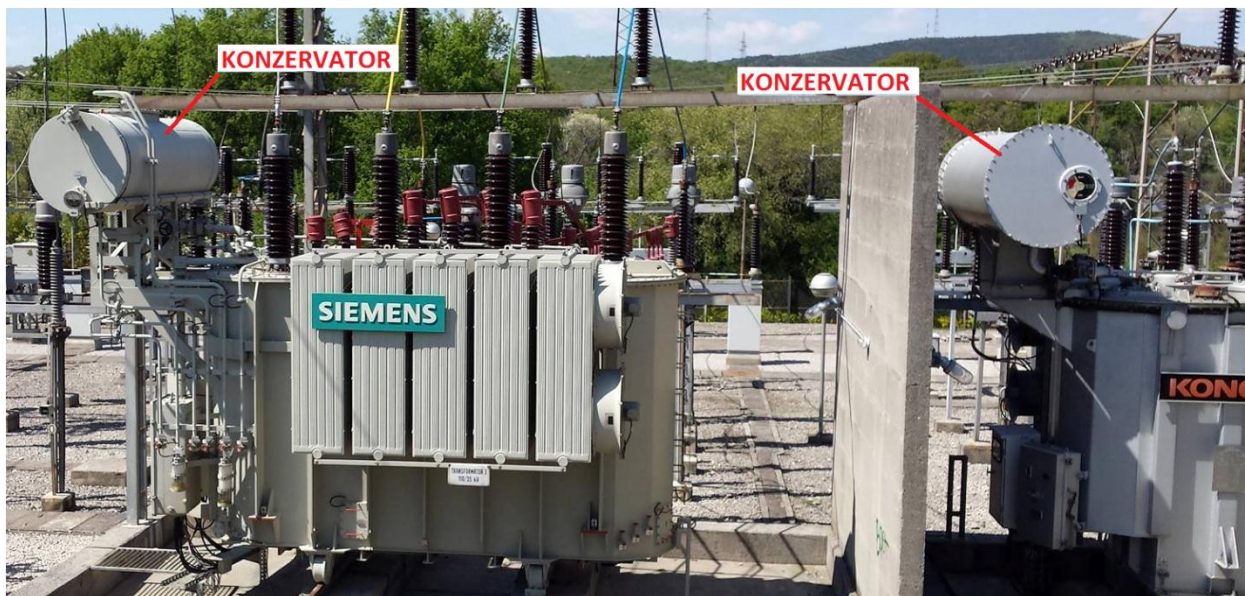
Slika 2.4. Prikaz uzemljivača i kotača energetskog transformatora

Kućište transformatora na sebi ima ugrađene i provodne izolatore, konzervator, termometar i kuke za vađenje jezgre sa namotima za slučaj potrebe remonta transformatora. Provodni izolatori imaju ulogu spajanja namota unutar transformatora sa odvodima vodiča sa vanjske strane. Provodni izolatori izrađuju se od porculana i oni u sredini imaju vodiče koji spajaju unutrašnje krajeve namota sa vanjskim odvodima vodiča.



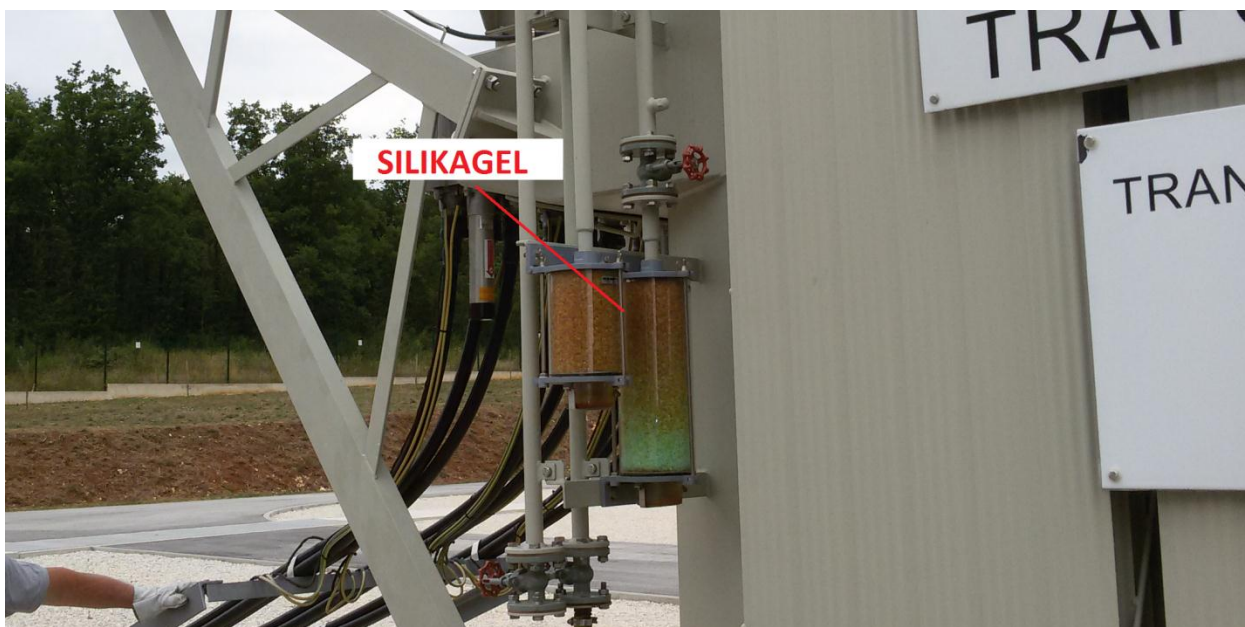
Slika 2.5: Kotao energetskeg transformatora, TS Meline

Konzervator je spremnik koji sadrži rezervu ulja i nalazi se na vrhu transformatora. Služi za prihvatanje svih promjena zapremine ulja i dozvoljava širenje ulja pri zagrijavanju. Širenjem ulja određeni dio zraka se izbacuje iz konzervatora, dok se pri hlađenju uzima dio zraka iz okoline, ali on prolazi kroz dehidrator (kristali silikagela) koji apsorbira vlagu iz zraka. Kristali silikagela na sebi zadržavaju vlagu. Oni su svijetle boje dok su u mogućnosti upiti vlagu. Kada kristali potamne ispunili su svoj kapacitet i više ne mogu upiti vlagu, [8].



Slika 2.6: Konzervatori, TS Krasica

Transformatorsko ulje nije u direktnom dodiru za zrakom, već se njihov kontakt ostvaruje preko silikagela. Pokazivač nivoa ulja se također nalazi na konzervatoru kako bi bilo lako dostupno za očitavanje i kontrolu.



Slika 2.7: Silikagel

U slučaju nedostatka ulja u transformatoru, on se treba isključiti iz pogona. Transformator se smije ponovno vratiti u pogon tek nakon što se utvrde uzroci gubitka ulja i otkloni kvar te se nadolije ulja do propisanog nivoa. Kao zaštita od gubitka ulja u transformatoru i pojave plinova unutar njega koristi se Buchholtzova (plinska) zaštita koja se sastoji od releja i dva plovka koji ovise o razini plinova u transformatoru. Kada se u transformatoru pojavi određena količina plinova otkloni se gornji plovak i relej djeluje na signalizaciju, a pri velikom strujanju plinova prema konzervatoru otkanjanjem donjeg plovka i zatvaranjem njegovih kontakata dolazi do isključenja prekidača i signalizacije kvara.

Termometar na transformatoru služi za mjerenje temperature ulja kako ne bi došlo do pregrijavanja. On osim pokazne uloge ima i zaštitnu ulogu, te ima kontakte koji signaliziraju pregrijavanje ulja. Ti kontakti djeluju na isključivanje napajanja ukoliko temperatura ulja prekorači zadanu vrijednost, [4].



Slika 2.8: Termometar, TS Funtana

2.2 Osnovne jednačbe transformatora

Naponi i struje transformatora najviše ovise o omjeru broja zavoja primarne i sekundarne strane. Oni su u stalnim omjerima, a ti omjeri vrijede zato što su gubitci zanemarivi.

Računanje napona za primarni namot:

$$U_1 = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot N_1 \quad (2.1)$$

Računanje napina za sekundarni namot:

$$U_2 = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot N_2 \cdot f \quad (2.2)$$

Omjer napona i broja zavoja primarne i sekundarne strane:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.3)$$

Omjer napona i struje primarne i sekundarne strane ako zanemarimo gubitke. Energija koja na primarnoj strani uđe u transformator jednaka je energiji koja izađe iz transformatora, naravno ako zanemarimo gubitke. Napon i struja su obrnuto proporcionalni pa će tako strana transformatora koja ima veći napon imati manju struju, [1].

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.4)$$

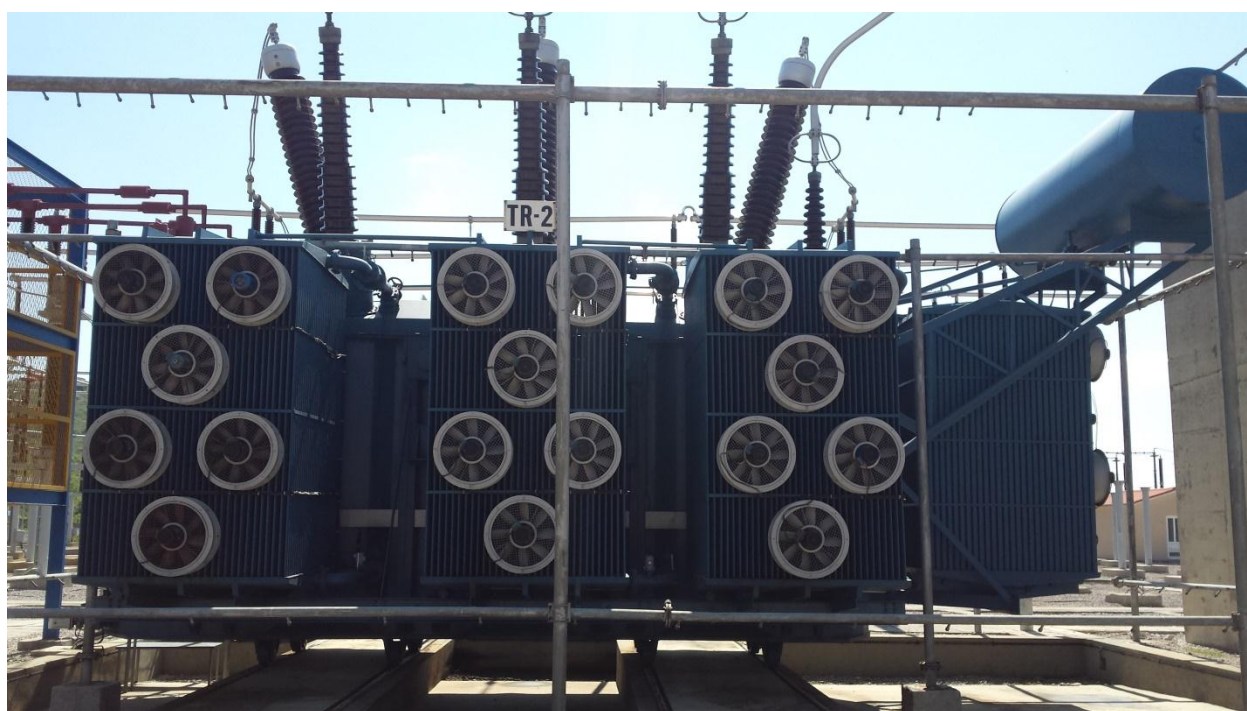
Omjer između struje i broja zavoja primarne i sekundarne strane:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.5)$$

Namot transformatora koji ima veći broj zavoja, a samim time i veći omski otpor, predviđen je za viši napon. Za takav namot koristit će se žica manjeg presjeka pa će samim time kroz njega teći manja struja. Namot transformatora sa manjim brojem zavoja je izveden sa žicom većeg presjeka i kroz njega će teći veća struja ali će na njemu biti niži napon, [5].

2.3. Gubici transformatora

Gubici transformatora su veoma mali jer on nema pokretnih dijelova, pa tako ne postoji ni trenje i ne obavlja nikakav mehanički rad već samo služi za transformaciju napona i struje. Gubici transformatora se dijele na magnetske gubitke i električne gubitke. Iako su gubici transformatora vrlo mali oni se ne mogu zanemariti jer se javljaju kao posljedica zagrijavanja transformatora. Zagrijavanje transformatora može izazvati različite probleme. Povećanje temperature može izazvati proboj izolacije te tako nastaje kvar. Kako bi se zaštitilo transformator od pregrijavanja upotrebljavaju se razna aktivna i pasivna hlađenja za regulaciju temperature transformatora, [11], [2].



Slika 2.9: Hlađenje transformatora, TS Meline

Magnetski gubici nastaju u željeznoj jezgri i za posljedicu imaju zagrijavanje jezgre. Postoje tri vrste magnetskih gubitaka: gubici vrtložnih struja, gubici histereze i gubici rasipnog toka. Magnetski gubici ovise samo o naponu, što je napon veći, veći su i gubici, dok jakost struje u namotajima ne ovisi o iznosu magnetskih gubitaka.

Gubici vrtložnih struja se javljaju u željeznoj jezgri zbog induciranja napona u limova. Promjenjivo magnetsko polje inducira male napone u željezu koji uzrokuju protjecanje struje i zagrijavaju jezgru. Da bi ti gubici bili što manji jezgra se izrađuje od tankih međusobno izoliranih limova.

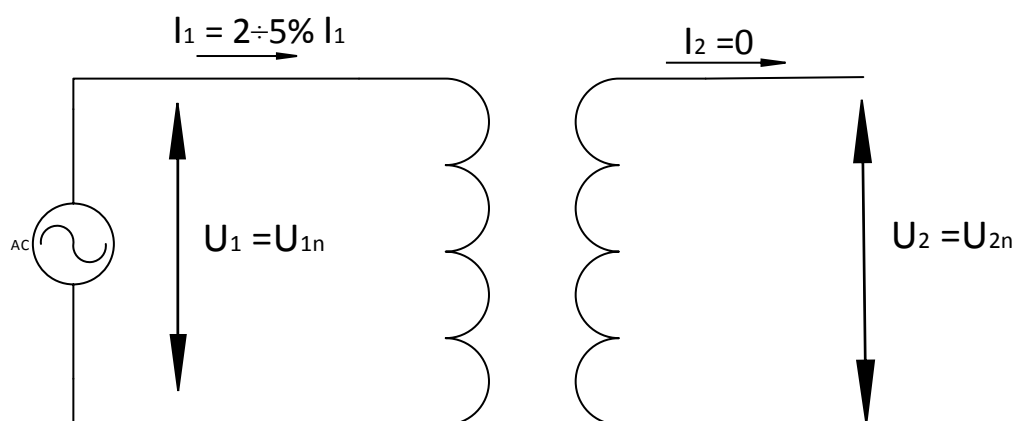
Gubici histereze nastaju zbog toga jer čestice željeza mijenjaju usmjerenje 50 puta u sekundi u smjeru polja zbog promjenjivog magnetskog polja i zbog takvog gibanja se javlja trenje među česticama i to izaziva zagrijavanje jezgre. Kako bi se ti gubici smanjili jezgra se izrađuje od posebnih magnetskih vrsta željeza kako bi se to magnetsko trenje što više eliminiralo.

Gubici rasipnog toka obuhvaćaju dio magnetskog polja koje se izgubi u zraku, ne sudjeluje u procesu transformacije jer ne obuhvaća oba svitka. Ti gubici se najčešće zanemaruju pošto su jako mali.

Električni gubici nastaju u primarnom i sekundarnom namotu u bakrenim vodičima zbog zagrijavanja vodiča uslijed prolaska struje. Što je presjek žice veći, zagrijavanje žice je manje. Zbog toga je potrebno hladiti namotaje što se postiže postavljanjem većeg razmaka između namotaja. Povećanjem razmaka između namotaja ulje može slobodnije strujati i tako brže odvoditi toplinu. Električni gubici direktno ovise o jakosti struje kroz namote, dok napon na njima nema nikakav utjecaj, [6].

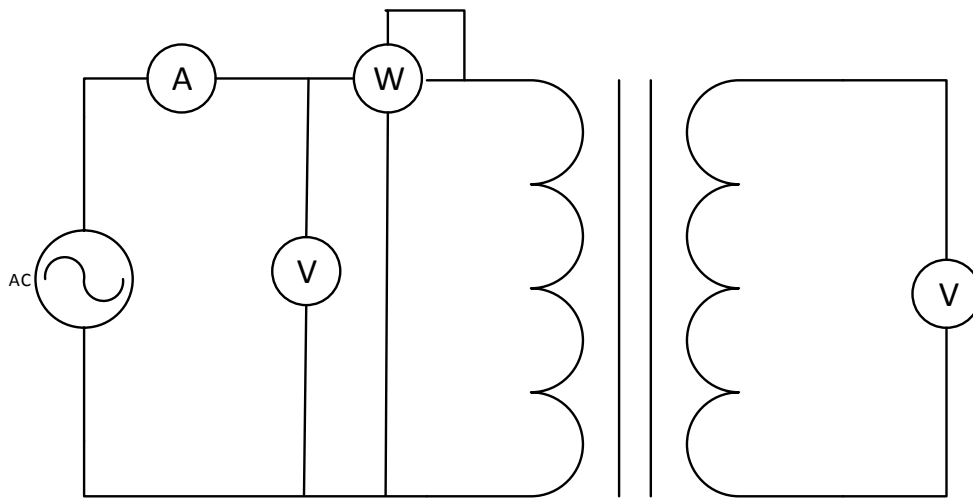
2.4. Prazni hod transformatora

Prazni hod transformatora je stanje transformatora u kojem je njegov primar priključen na nazivni napon, a sekundarne stezaljke su odspojene. U praznom hodu naponi na primaru i sekundaru su nazivnih veličina pri čemu struja primara iznosi 2 do 5% nazivne primarne struje koja služi za održavanje magnetskog polja u željeznoj jezgri, dok struje na sekundaru nema jer nije zatvoren strujni krug na sekundarnoj strani transformatora, [3].



Slika 2.10: Prazni hod transformatora

Pokusom praznog hoda mjeri se iznos magnetskih gubitaka odnosno gubitaka u željezu. Stezaljke primarnog namota se priključuju na nazivni napon, dok su stezaljke sekundarnog namota odspojene. Pošto su struje praznog hoda male ili ih uopće nema, električni gubici su zanemarivi. Naponi su nazivnih vrijednosti. Sva električna energija se troši na magnetske gubitke, [7].

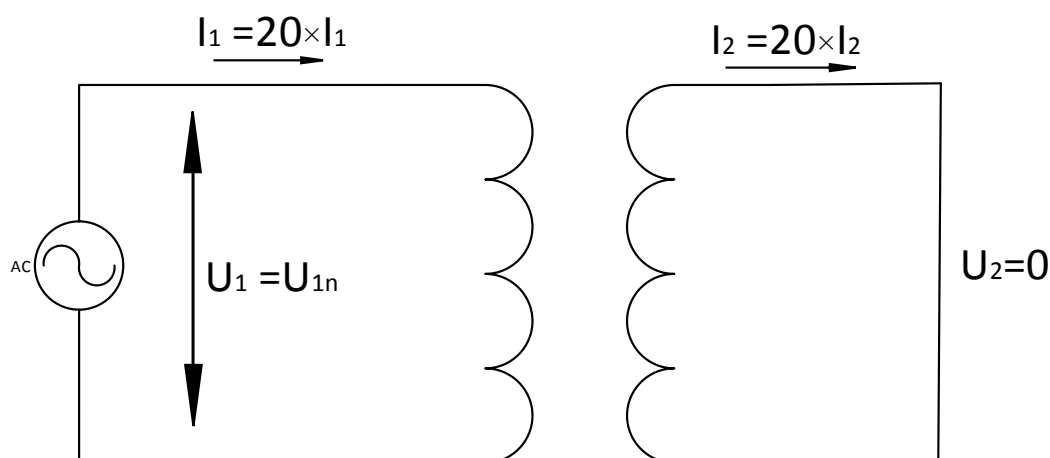


Slika 2.11: Pokus praznog hoda transformatora

2.5. Kratki spoj transformatora

Kod kratkog spoja transformatora, stezaljke primarnog namota se spajaju na izmjenični izvor naponskog napajanja, a stezaljke sekundarnog namota se kratko spoje. Postoje dvije vrste takvih spojeva koje se ovdje promatraju, a to su pogonski kratki spoj i pokus kratkog spoja.

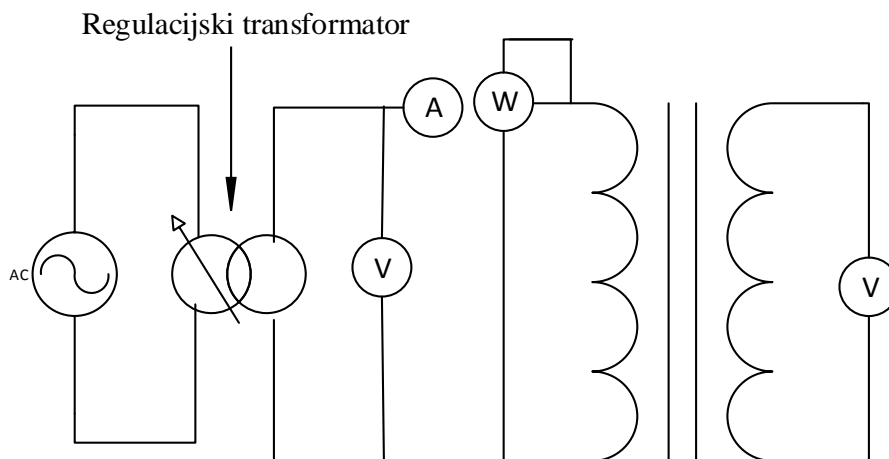
Pogonski kratki spoj je pojava kvara kada je napon primara nazivne vrijednosti, a struje primara i sekundara su dvadeset puta veće od nazivnih. Napon sekundara je jednak nuli. Velike struje vode do velikih zagrijavanja. Zbog pojave velikih elektromagnetskih sila dolazi do uništenja transformatora. Rastalni osigurači, nadstrujni releji i drugi se koriste kako bi zaštitili transformator i spriječili uništenje ili oštećenje transformatora.



Slika 2.12: Pogonski kratki spoj transformatora

Pokusom kratkog spoja mjeri se iznos električnih gubitaka. Pokus kratkog spoja se vrši tako da se stezaljke primarnog namota transformatora spoji na regulacijski transformator i kratko se spoje stezaljke sekundarnog namota.

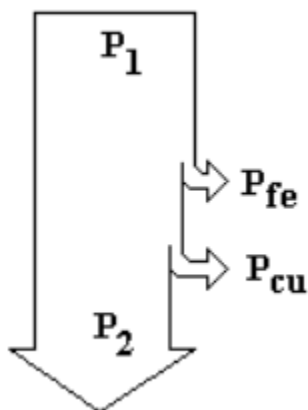
Napon na primaru se od nule podiže do one vrijednosti dok kroz primar i sekundar ne poteku nazivne struje. Taj napon nije jednak nazivnom, već je oko dvadeset puta manji od nazivnog, a pošto nema opterećenja tada su svi gubici transformatora električni (gubici u bakru), [7].



Slika 2.13: Pokus kratkog spoja transformatora

2.6. Korisnost transformatora

Korisnost uređaja je odnos između dobivene i uložene energije. Povećanjem gubitaka, korisnost uređaja se smanjuje. Korisnost transformatora je vrlo velika i kreće se u granicama od 80-95% i to zbog toga jer nema pokretnih dijelova, a time ni trenja što za posljedicu ima male gubitke, [5].



P_1 – uložena električna energija (primar)

P_2 – dobivena električna energija (sekundar)

P_{fe} – magnetski gubici u željezu

P_{cu} – električni gubici u bakru

Formule za izračun korisnosti:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_g}{P_1} = 1 - \frac{P_g}{P_1} \quad (2.6)$$

P_g – ukupni gubici

2.7. Načini hlađenja

Zbog zagrijavanja samog transformatora i njegovih dijelova potrebno je osigurati hlađenje istih. Oznaka vrste hlađenja sastoji se od četiri velika slova, od kojih prva dva slova označavaju vrstu i način strujanja rashladnog sredstva koje je u dodiru sa namotajima, dok treće i četvrto slovo označavaju vrstu i način strujanja rashladnog sredstva u dodiru sa hladnjakom. Oznake za rashladno sredstvo koje se odnosi na namotaje su sljedeće: O (oil) – ulje, L (liquid) – sintetično ulje, G (gas) – plin, W (water) – voda, A (air) – zrak.

Oznake koje se odnose na način strujanja:

N (natural) – prirodno, F (forced) – prisilno

Oznake za rashladno sredstvo koje se odnosi na hladnjak:

A (air) – zrak, G (gas) – plin, W (water) – voda

Slijede primjeri sustava hlađenja. ONAN je oznaka za hlađenje prirodnim strujanjem ulja oko namota, a zrak se koristi kao sekundarno rashladno sredstvo. Oznaka ONAN/ONAF – označava da se do 80% snage koristi prirodno strujanje zraka oko namota, a zrak se koristi kao sekundarno rashladno sredstvo. Nakon 80% snage, automatski se uključuju ventilatori. ONWF je oznaka za hlađenje prirodnim strujanjem ulja oko namota, a izvana se hladi sa vodom i vodenom pumpom. Oznaka ANAN označava prirodno strujanje zraka unutar transformatora i izvan njega, [5].



Slika 2.14: Prikaz pasivnog hlađenja energetskeg transformatora

3. DVONAMOTNI REGULACIJSKI ENERGETSKI TRANSFORMATORI

Zbog potrebe za regulacijom napona, transformatori su izvedeni tako da se određeni broj zavoja može odspojiti iz prijenosnog omjera transformatora kako bi se postigao željeni iznos napona. Razlikujemo dvije vrste regulacije transformatora:

1. Transformatori s odcjepima
2. Regulacijski transformatori

Transformatori s odcjepima su izvedeni tako da se dio namotaja može odcjepiti od ukupnog namota, no se oni mogu podešavati samo u slučaju beznaponskog stanja.

Obično se izvode u tri slučaja preklopke:

$$20\text{kV} \pm 5\% / 10\text{kV} \Rightarrow 21\text{kV}/10\text{kV} - 20/10\text{ kV} - 19/10\text{ kV}$$

Izvedba transformatora sa odcjepima zbog svoje konstrukcije nije povoljna jer se mogu javiti aksijalne sile između namota zbog njihove nesimetrije i njihova mogućnost regulacija je od 2.5% do 7.5%.

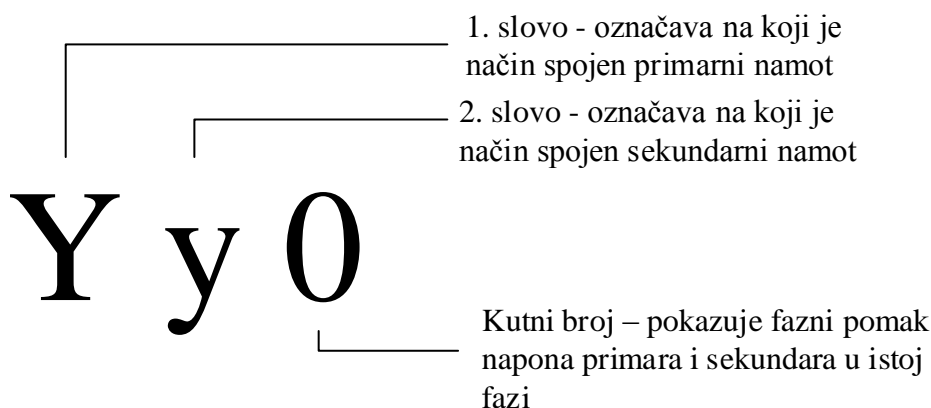
Regulacijski transformatori su transformatori kojima je omogućeno mijenjati prijenosni omjer i za vrijeme rada transformatora. Njihova maksimalna mogućnost regulacije iznosi od 10-20%, ali napon jednog stupnja regulacije još iznosi 1.5-2%.

Pa tako za transformator 110kV/10 kV uz regulaciju od 10% i jedan stupanj regulacije od 1.5%, napon iznosi u granicama od 126.5/10kV do 93.5/10 kV

Regulacijske preklopke se mogu ugraditi i na visokonaponsku i na niskonaponsku stranu transformatora. Obično se ugrađuju na visokonaponsku stranu iz razloga što su tamo iznosi struja manji pa je samim time i regulacijska preklopka jeftinija i lakša.

3.1. Spojevi dvonamotnih transformatora

Spoj transformatora nam daje podatke o načinu spajanja namota transformatora i faznom pomaku višeg i nižeg napona. Postoji sveukupno šest mogućih kombinacija spajanja, pošto ima tri namotaja primara i tri namotaja sekundara. Svaki spoj se zove grupa spoja i označava se na natpisnoj pločici transformatora, [1]. Ovakva oznaka je standardna i sadrži uglavnom dva slova i jedan broj, kao šta se može vidjeti na primjeru:



Prvo slovo kod označavanja mora biti veliko štampano i on označava primarni namot, a drugo slovo malo pisano koji označava sekundarni namot. Navedeni su simboli kojima se označavaju pojedini spojevi namota:

- Namot spojen u zvijezdu označava se sa Y ili y
- Oznaka za namot spojen u trokut je D ili d
- Oznaka za namot spojen cik-cak (razlomljena zvijezda) označavamo slovom Z ili z
- Sa slovnom oznakom N ili n označava se uzemljeno zvjezdište

Spoj zvijezda se upotrebljava za visokonaponske mreže i takav spoj omogućava neutralnu točku (uzemljenje preko impedancije ili kruto uzemljenje).

Spoj trokut se upotrebljava za niskonaponske mreže u kojima se javljaju veliki iznosi struja.

Spoj razlomljena zvijezda se upotrebljava za uzemljivačke transformatore kako bi se formirala nul točka mreže i kako bi se smanjila nesimetrija u sustavima u kojima teret nije jednako raspoređen po fazama.

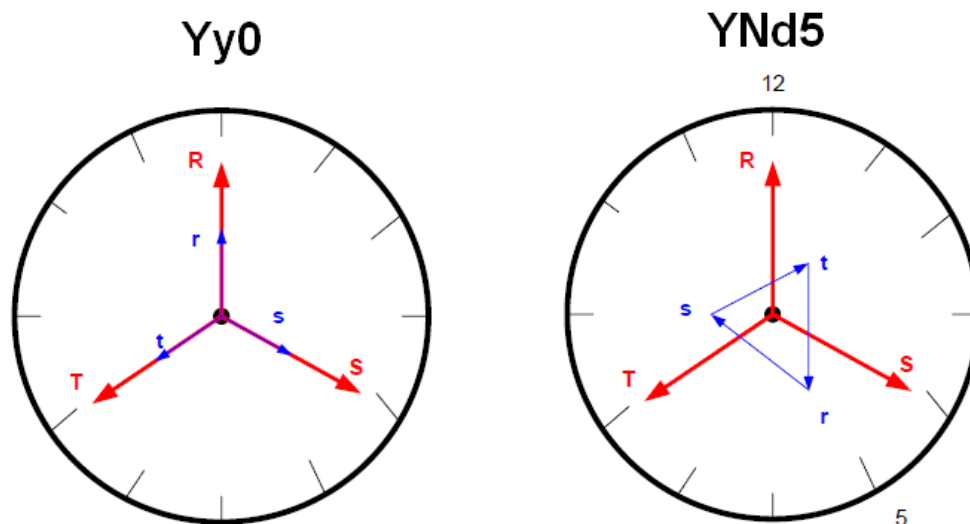
Tablica 3 1: Tablični prikaz mogućih kombinacija spajanja namota:

	PRIMAR	SEKUNDAR	OZNAKA
1.	zvijezda	zvijezda	Yy
2.	zvijezda	trokut	Yd
3.	trokut	zvijezda	Dy
4.	trokut	trokut	Dd
5.	zvijezda	cik-cak	Yz
6.	trokut	cik-cak	Dz

Kad se u spoju pojavljuje zvijezdište i ono je uzemljeno onda se uz oznaku zvijezdišta (Y) dodaje slovo n (npr. Ynd 5 ili Ynyn 0). Ova se oznaka ne dodaje za spoj namota trokut, jer on ne može imati zvijezdište.

Kutni broj naziva se broj u oznaci grupe spoja, on simbolički označava fazni pomak primarnog i sekundarnog napona u istoj fazi. On poprima vrijednosti od 0 do 11, Kut za koji su te dvije faze pomaknute dobiva se kad se taj broj pomnoži sa 30° (npr. u oznaci Ynd5, broj pet označava fazni pomak od $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$), [1], [3].

Navedena su dva primjera spoja transformatora:

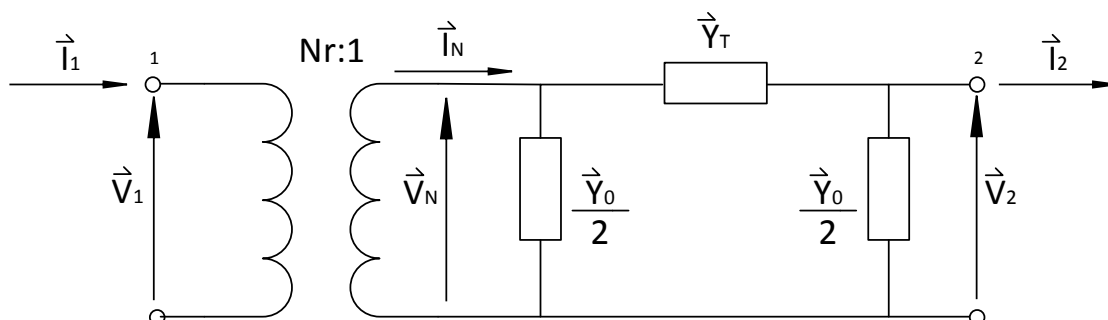


Slika 3.1: Prikaz primjera spoja transformatora

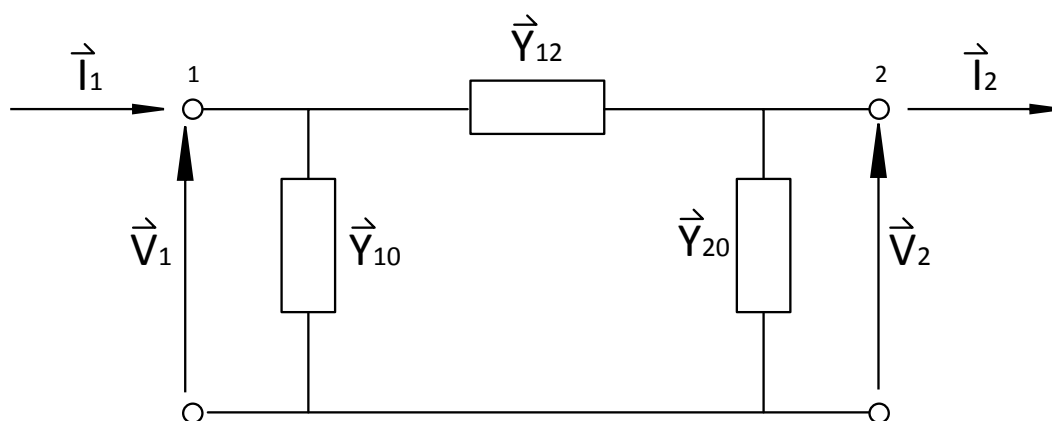
Spoj Yy0 – primar i sekundar su spojeni u zvijezdu i nisu fazno pomaknuti.

Spoj Ynd5 – primar je spojen u zvijezdu i uzemljen je, a sekundar je spojen u trokut sa faznim pomakom 5 (broj 5 označava broj 5 na satu).

3.2. Nadomjesni modeli regulacijskog energetskog transformatora



Slika 3.2: Nadomjesni π model



Slika 3.3: Nadomjesni π model bez idealnog transformatora

Nadomjesni T model energetskog transformatora je kompleksniji za izračunavanje. Za promatrani sustav transformatora dovoljno se velika preciznost dobije iz pi modela, pa se samim time promatra pi model.

Prijenosni omjer transformatora računa se prema formuli:

$$n_r = 1 + r \cdot \Delta n \quad (3.1)$$

Djelatni otpor R_k u uzdužnoj impedanciji transformatora računa se kao kvadrat omjera baznog napona U_b i nazivne snage transformatora S_{nT} u ovisnosti o gubicima u bakru P_{cu} :

$$R_k = P_{cu} \cdot \left(\frac{U_b}{S_{nT}} \right)^2 [\Omega] \quad (3.2)$$

Uzdužnu reaktanciju transformatora dobivamo iz sljedećeg izraza:

$$X_k = \frac{U_b^2}{S_{nT}} \cdot \sqrt{U_k^2 - \left(\frac{P_{cu}}{S_{nT}} \right)^2} [\Omega] \quad (3.3)$$

Uzdužna impedancija Z_k dobije se kao zbroj uzdužne reaktancije X_k kao imaginarna komponenta, i djelatnog otpora R_k .

$$\vec{Z}_k = R_k + jX_k [\Omega] \quad (3.4)$$

Izraz za admitanciju \vec{Y}_T :

$$\vec{Y}_T = \frac{1}{\vec{Z}_k} [S] \quad (3.5)$$

Admitancija \vec{Y}_{10} (pojednostavljeni model):

$$\vec{Y}_{10} = \vec{Y}_T \cdot \frac{(1 - n_r)}{n_r^2} [S] \quad (3.6)$$

Admitancija \vec{Y}_{20} (pojednostavljeni model):

$$\vec{Y}_{20} = \vec{Y}_T \cdot \frac{(n_r - 1)}{n_r} [S] \quad (3.7)$$

Admitancija \vec{Y}_{12} (pojednostavljeni i točni model):

$$\vec{Y}_{12} = \frac{\vec{Y}_T}{n_r} [S] \quad (3.8)$$

Izraz za poprečnu reaktanciju \vec{Y}_0 :

$$\vec{Y}_0 = \frac{S_n}{U_{n1}^2} \cdot \left(\frac{P_{Fe}}{S_{nT}} - j \cdot \sqrt{i_0^2 - \frac{(P_{Fe})^2}{S_n}} \right) [S] \quad (3.9)$$

Admitancija \vec{Y}_{10} (točni model):

$$\vec{Y}_{10} = \vec{Y}_T \cdot \frac{(1 - n_r)}{n_r^2} + \frac{\vec{Y}_0}{2 \cdot n_r^2} [S] \quad (3.10)$$

Admitancija \vec{Y}_{20} (točni model)

$$\vec{Y}_{20} = \vec{Y}_T \cdot \frac{(n_r - 1)}{n_r} + \frac{\vec{Y}_0}{2} [S] \quad (3.11)$$

Struja na sekundarnoj strani \vec{I}_2 :

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{S}_2^*}{\sqrt{3} \cdot \vec{U}_2^*} [A] \quad (3.12)$$

Struja \vec{I}_{12} :

$$\vec{I}_{12} = \vec{I}_2 + \vec{V}_2 \cdot \vec{Y}_{20} [A] \quad (3.13)$$

Struja \vec{I}_1 :

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_{12} + \vec{V}_1 \cdot \vec{Y}_{10} [A] \quad (3.14)$$

Napon na primarnoj strani \vec{U}_1 :

$$\vec{U}_1 = \left(\vec{V}_2 + \vec{I}_{12} \cdot \frac{1}{\vec{Y}_{12}} \right) \cdot \sqrt{3} [V] \quad (3.15)$$

Snaga na primaru transformatora \vec{S}_1 se računa umnoškom napona na primarnoj strani i struje u konjugirano kompleksnom obliku:

$$\vec{S}_1 = 3 \cdot \vec{V}_1 \cdot \vec{I}_1^* [VA] \quad (3.16)$$

3.3. Proračun parametara regulacijskog transformatora

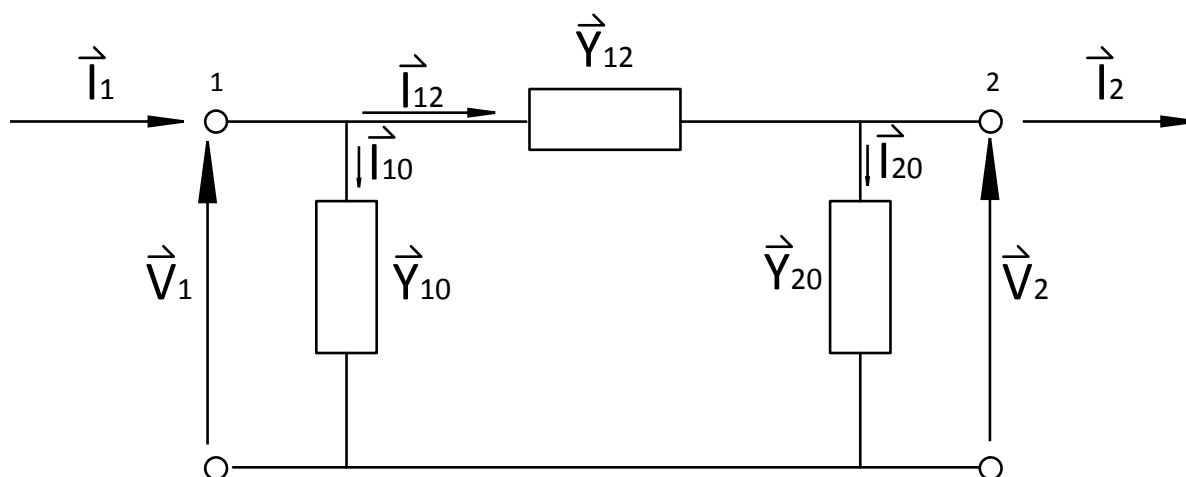
Trofazni regulacijski energetski transformator ima na primarnoj VN strani izvedenu automatsku regulaciju napona s položajem preklopke 110 kV +/- (4x1,25%). Odredit će se parametri regulacijskog transformatora, te strujno-naponske prilike uz zadano opterećenje transformatora na sekundaru 20+j10 MVA, uz nazivni napon sekundara. Poznati su sljedeći podaci:

Nazivna snaga $S_n = 31,5$ MVA

Prijenosni omjer $n_n = 110/10$ kV/kV

$u_k = 10,5$ %, $i_0 = 2,7$ %

Gubici $P_{Cu} = P_k = P_{KS} = 200$ kW, $P_{Fe} = P_0 = 86$ kW



Slika 3.4: Nadomjesni π model

Odabere se bazni napon: $U_b = 110$ kV .

Izračuna se prijenosni omjer prema formuli 3.1:

$$n_r = 1 + r \cdot \Delta n = 1 + 4 \cdot \frac{1,25}{100}$$

$$n_r = 1,05$$

Izračuna se djelatni otpor u uzdužnoj impedanciji transformatora prema formuli 3.2

$$R_k = P_{cu} \cdot \left(\frac{U_b}{S_{nT}} \right)^2 = 200 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \left(\frac{110 \cdot 10^3 \text{ V}}{31,5 \cdot 10^6 \text{ VA}} \right)^2$$

$$R_k = 2.4389 \Omega$$

Izračuna se uzdužna reaktancija prema formuli 3.3

$$X_k = \frac{U_b^2}{S_{nT}} \cdot \sqrt{U_k^2 - \left(\frac{P_{cu}}{S_{nT}} \right)^2} = \frac{(110 \cdot 10^3 \text{ V})^2}{31,5 \cdot 10^6 \text{ VA}} \cdot \sqrt{(0,105 \text{ V})^2 - \left(\frac{200 \cdot 10^3 \text{ W}}{31,5 \cdot 10^6 \text{ VA}} \right)^2}$$

$$X_k = 40.2595 \Omega$$

Izračuna se uzdužna reaktancija Z_k prema formuli 3.4

$$\vec{Z}_k = R_k + jX_k = 2.4389 \Omega + j40.2595 \Omega$$

$$\vec{Z}_k = 40.3333 \angle 86,53^\circ \Omega$$

Izračuna se admitancija Y_T prema formuli 3.5

$$\vec{Y}_T = \frac{1}{\vec{Z}_k} = \frac{1}{40.3333 \angle 86,53^\circ \Omega}$$

$$\vec{Y}_T = 0,0247 \angle -86,52^\circ \text{ S}$$

Izračuna se admitancija \vec{Y}_{12} prema formuli 3.8

$$\vec{Y}_{12} = \frac{\vec{Y}_T}{n_r} = \frac{0,0247 \angle -86,53^\circ \text{ S}}{1,05}$$

$$\vec{Y}_{12} = 0,0236 \angle -86,61^\circ \text{ S}$$

Izračuna se admitancija \vec{Y}_{10} prema formuli 3.6

$$\vec{Y}_{10} = \vec{Y}_T \cdot \frac{(1 - n_r)}{n_r^2} = 0.0247 \angle -86.52^\circ S \cdot \frac{(1 - 1.05)}{1.05^2}$$

$$\vec{Y}_{10} = 1.1202 \cdot 10^{-3} \angle 93.48^\circ S$$

Izračuna se admitancija \vec{Y}_{20} prema formuli 3.7

$$\vec{Y}_{20} = \vec{Y}_T \cdot \frac{(n_r - 1)}{n_r} = 0.0247 \angle -86.52^\circ S \cdot \frac{1.05 - 1}{1.05}$$

$$Y_{20} = 1.1762 \cdot 10^{-3} \angle -86.52^\circ S$$

Po formuli za prijenosni omjer transformatora 3.1 $n_r = 1 + r \cdot \Delta n$ uvrštava se vrijednost r , od -4 do +4 u koracima od 1.

Tablica 3. 2: Prikaz vrijednosti prijenosnog omjera

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
r	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
n_{rn}	0,9500	0,9625	0,9750	0,9875	1	1,0125	1,0250	1,0375	1,0500

3.3.1 Vrijednosti pojednostavljenog nadomjesnog modela

U sljedećoj tablici prikazane su dobivene vrijednosti za \vec{Y}_{12} po formuli 3.8 $\vec{Y}_{12} = \frac{\vec{Y}_T}{n_r}$ gdje se od n_{r1} do n_{r9} uvrštava prethodno dobivene vrijednosti.

Tablica 3.3: Admitancija pojednostavljenog modela

nr	$\vec{Y}_{12}[\text{S}]$	$\vec{Y}_{12}[\text{S}]$
0.9500	0,0016-j0,0261	0.0261 \angle -86.53°
0.9625	0,00156-j0,0257	0.0258 \angle -86.53°
0.9750	0,0015-j0,0254	0.0254 \angle -86.53°
0.9875	0,0015-j0,0251	0.0251 \angle -86.53°
1	0,0015-j0,0247	0.0248 \angle -86.53°
1.0125	0,0015-j0,0244	0.0245 \angle -86.53°
1.0250	0,0015-j0,0241	0.0242 \angle -86.53°
1.0375	0,0014-j0,0239	0.0239 \angle -86.53°
1.0500	0,0014-j0,0236	0.0236 \angle -86.53°

U sljedećoj tablici prikazane su izračunate vrijednosti za \vec{Y}_{10} po formuli 3.6: $\vec{Y}_{10} = \vec{Y}_T \cdot \frac{(1-n_{rn})}{n_r^2}$.

Tablica 3.4: Prikaz vrijednosti admitancije \vec{Y}_{10} pojednostavljenog modela

nr	$\vec{Y}_{10}[\text{S}]$	$\vec{Y}_{10}[\text{S}]$
0.9500	$8,3059 \cdot 10^{-5} - j0,001371$	0.001374 \angle -86.53°
0.9625	$6,0687 \cdot 10^{-5} - j0,001002$	0.001004 \angle -86.53°
0.9750	$3,9427 \cdot 10^{-5} - j0,000651$	0.000652 \angle -86.53°
0.9875	$1,9218 \cdot 10^{-5} - j0,000317$	0.000318 \angle -86.53°
1	0	0
1.0125	$-1,8280 \cdot 10^{-5} + j0,000302$	0.000302 \angle 93.47°
1.0250	$-3,5675 \cdot 10^{-5} + j0,000589$	0.000589 \angle 93.47°
1.0375	$-5,2230 \cdot 10^{-5} + j0,000862$	0.000864 \angle 93.47°
1.0500	$-6,7992 \cdot 10^{-5} + j0,001122$	0.001124 \angle 93.47°

U sljedećoj tablici prikazane su izračunate vrijednosti \vec{Y}_{20} po formuli 3.7 $\vec{Y}_{20} = \vec{Y}_T \cdot \frac{(n_r-1)}{n_r}$.

Tablica 3.5: Prikaz vrijednosti admitancije \vec{Y}_{20} pojednostavljenog modela

nr	$\vec{Y}_{20}[\text{S}]$	$\vec{Y}_{20}[\text{S}]$
0.9500	$-7,8906 \cdot 10^{-5} + j0,001303$	$0.001305 \angle 93.47^\circ$
0.9625	$-5,8411 \cdot 10^{-5} + j0,000964$	$0.000966 \angle 93.47^\circ$
0.9750	$-3,8442 \cdot 10^{-5} + j0,000635$	$0.000636 \angle 93.47^\circ$
0.9875	$-1,8977 \cdot 10^{-5} + j0,000313$	$0.000314 \angle 93.47^\circ$
1	0	0
1.0125	$1,8509 \cdot 10^{-5} - j0,000306$	$0.000306 \angle -86.53^\circ$
1.0250	$3,6566 \cdot 10^{-5} - j0,000604$	$0.000605 \angle -86.53^\circ$
1.0375	$5,4189 \cdot 10^{-5} - j0,000895$	$0.000896 \angle -86.53^\circ$
1.0500	$7,1392 \cdot 10^{-5} - j0,001178$	$0.001181 \angle -86.53^\circ$

3.3.2. Izračun vrijednosti točnog nadomjesnog modela

Poprečna reaktancija \vec{Y}_0 se računa po formuli 3.9 $\vec{Y}_0 = \frac{S_n}{U_{n1}^2} \cdot \left(\frac{P_{Fe}}{S_{nT}} - j \cdot \sqrt{i_0^2 - \frac{(P_{Fe})^2}{S_n}} \right)$

Tablica 3.6: Dobivene vrijednosti za admitanciju \vec{Y}_{10} točnog modela

nr	$\vec{Y}_{10}[\text{S}]$	$\vec{Y}_{10}[\text{S}]$
0.9500	$8,6267 \cdot 10^{-5} - j0,001403$	$0.001405 \angle -86.48^\circ$
0.9625	$6,3979 \cdot 10^{-5} - j0,001034$	$0.001036 \angle -86.46^\circ$
0.9750	$4,2806 \cdot 10^{-5} - j0,000684$	$0.000685 \angle -86.42^\circ$
0.9875	$2,2683 \cdot 10^{-5} - j0,000351$	$0.000352 \angle -86.31^\circ$
1.0000	$3,554 \cdot 10^{-6} - j3,496 \cdot 10^{-5}$	$3,514 \cdot 10^{-5} \angle -84.20^\circ$
1.0125	$-1,4637 \cdot 10^{-5} + j0,000266$	$0.000266 \angle 93.15^\circ$
1.0250	$-3,1941 \cdot 10^{-5} + j0,000552$	$0.000553 \angle 93.31^\circ$
1.0375	$-4,8405 \cdot 10^{-5} + j0,000825$	$0.000826 \angle 93.36^\circ$
1.0500	$-6,4074 \cdot 10^{-5} + j0,001084$	$0.001086 \angle 93.38^\circ$

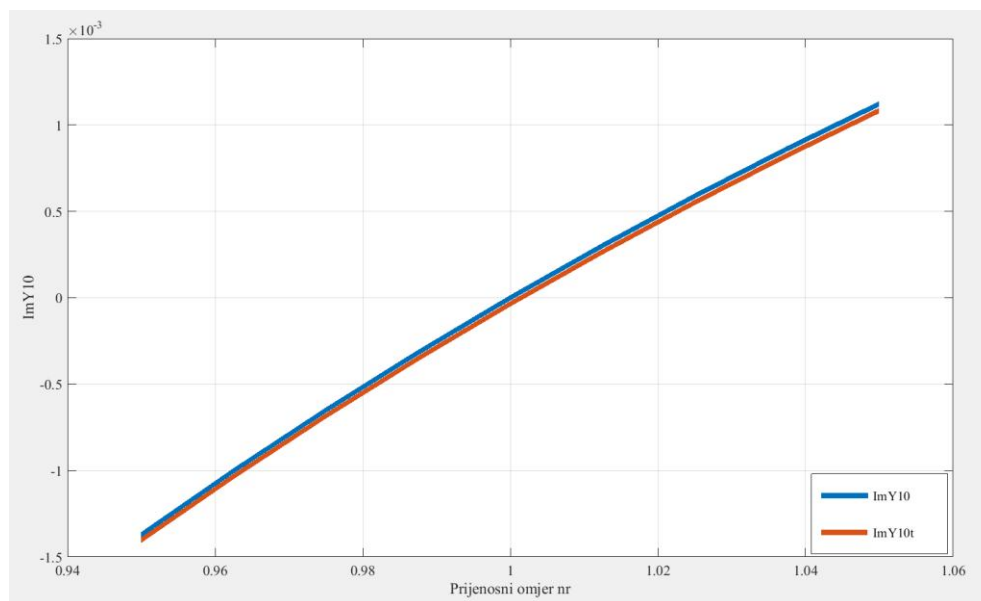
Tablica 3.7: Dobivene vrijednosti za admitanciju \vec{Y}_{20} točnog modela

nr	$\vec{Y}_{20}[\text{S}]$	$\vec{Y}_{20}[\text{S}]$
0.9500	$-7,535 \cdot 10^{-5} + j0,001268$	$0.001270 \angle 93.40^\circ$
0.9625	$-5,486 \cdot 10^{-5} + j0,000929$	$0.000931 \angle 93.38^\circ$
0.9750	$-3,489 \cdot 10^{-5} + j0,000600$	$0.000601 \angle 93.33^\circ$
0.9875	$-1,542 \cdot 10^{-5} + j0,000278$	$0.000279 \angle 93.17^\circ$
1.0000	$3,554 \cdot 10^{-6} - j3,50 \cdot 10^{-5}$	$3.51 \cdot 10^{-5} \angle -84.20^\circ$
1.0125	$2,206 \cdot 10^{-5} - j0,000340$	$0.0003412 \angle -86.29^\circ$
1.0250	$4,012 \cdot 10^{-5} - j0,000639$	$0.000640 \angle -86.40^\circ$
1.0375	$5,774 \cdot 10^{-5} - j0,000929$	$0.000931 \angle -86.45^\circ$
1.0500	$7,495 \cdot 10^{-5} - j0,001213$	$0.001216 \angle -86.47^\circ$

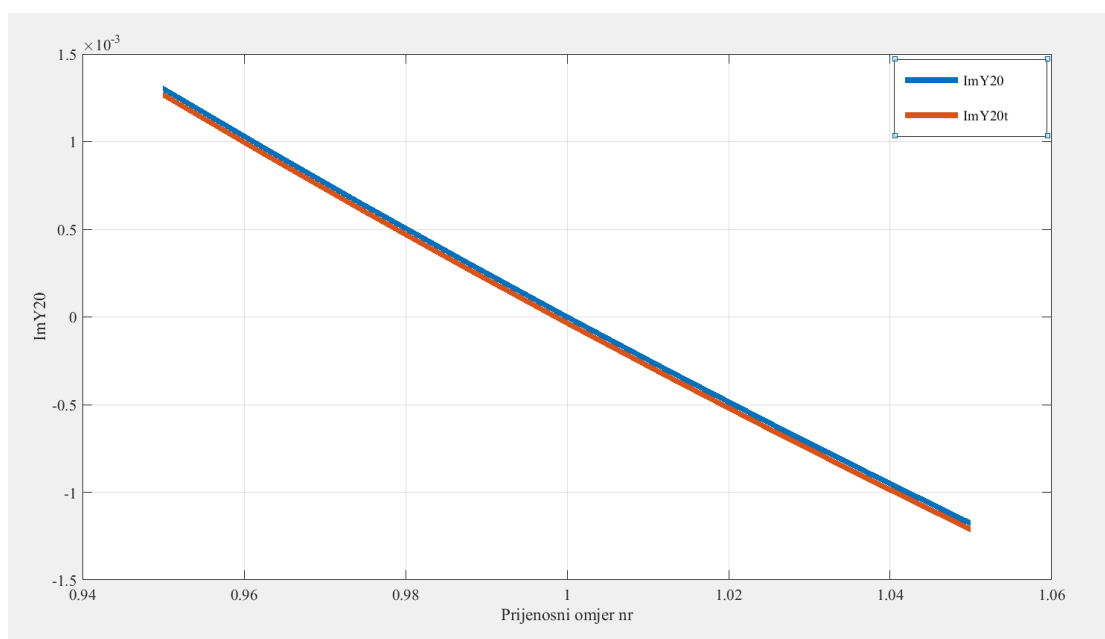
Iz dobivenih vrijednosti se vidi da pojednostavljeni model nema previše odstupanja od točnog, pa samim time može se koristiti pojednostavljene vrijednosti u našim proračunima.

Kako bismo si lakše predočili koliko je razlika zaista mala kod točnih ili približnih vrijednosti, prikazat ćemo ih grafički na istom grafu.

Kod prikazivanja na grafu prikazujemo imaginarne vrijednosti, pošto su one puno veće od realnih vrijednosti.



Slika 3.5: Usporedne vrijednosti admitancija $Im|Y_{10}|$ točnog i približnog modela



Slika 3.6: Usporedne vrijednosti admitancija $Im|Y_{20}|$ točnog i približnog modela

3.4. Proračun strujno-naponskih prilika kod regulacijskog transformatora

Zadan je napon U_2 i snaga \vec{S}_2 , zadatak je promatrati što se dešava sa naponom U_1 , strujom I_1 i snagom S_1 kad napon U_2 mjenjamo za $\pm 10\%$ nazivne vrijednosti transformatora. Dobivene vrijednosti grafički prikazati.

$$U_2 = U_{nT} = 10kV$$

$$\vec{S}_2 = 15 + j5 \text{ MVA}$$

Poprečna reaktancija \vec{Y}_0 računa se prema formuli 3.9 $\vec{Y}_0 = \frac{S_n}{U_{n1}^2} \cdot \left(\frac{P_{Fe}}{S_{nT}} - j \cdot \sqrt{i_0^2 - \frac{(P_{Fe})^2}{S_n}} \right)$

Izračuna se struja na sekundarnoj strani \vec{I}_2 prema formuli 3.12

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{S}_2^*}{\sqrt{3} \cdot \vec{U}_2^*} = \frac{(15 - j5) \cdot 10^6 \text{ VA}}{\sqrt{3} \cdot (110 \cdot 10^3 \angle 0^\circ \text{ V})}$$

$$\vec{I}_2 = 78.7296 - j26.2432 = 82.9883 \angle -18.43^\circ \text{ A}$$

Izračuna se struja \vec{I}_{12} prema izrazu 3.13

$$\vec{I}_{12} = \vec{I}_2 + \vec{V}_2 \cdot \vec{Y}_{20} = 82.9883 \angle -18.43^\circ \text{ A} + \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \text{ V} \cdot 1.1762 \cdot 10^{-3} \angle -86.52^\circ \text{ S}$$

Admitancije \vec{Y}_{20} , \vec{Y}_{10} i \vec{Y}_{12} izračunate su u prethodnom poglavlju, koriste se u izračunu.

$$\vec{I}_{12} = 83.2636 - j101.0865 = 130.9630 \angle -50.52^\circ \text{ A}$$

Izračuna se struja primara \vec{I}_1 prema izrazu 3.14

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_{12} + \vec{V}_1 \cdot \vec{Y}_{10} = \vec{I}_{12} + \left(\vec{V}_2 + \vec{I}_{12} \cdot \frac{1}{\vec{Y}_{12}} \right) \cdot \vec{Y}_{10}$$

$$\vec{I}_1 = 85.7644 \angle -22.66^\circ \text{ A} + \left(\frac{110 \cdot 10^3 \text{ V}}{\sqrt{3}} + 130.9630 \angle -50.52^\circ \text{ A} \cdot \frac{1}{0.0236 \angle -86.61^\circ \text{ S}} \right) \cdot 1.1202 \cdot 10^{-3} \angle 93.48^\circ \text{ S}$$

$$\vec{I}_1 = 74.9806 - j24.9935 \text{ A} = 79.0365 \angle -18.43^\circ \text{ A}$$

Izračuna se napon primara \vec{U}_1 prema izrazu 3.15

$$\vec{U}_1 = \left(\vec{V}_2 + \vec{I}_{12} \cdot \frac{1}{\vec{Y}_{12}} \right) \cdot \sqrt{3} = \left(\frac{110 \cdot 10^3 \text{ V}}{\sqrt{3}} + \frac{130.9630 \angle -50.52^\circ \text{ A}}{0.0236 \angle -86.61^\circ \text{ S}} \right) \cdot \sqrt{3}$$

$$\vec{U}_1 = 117.7707 + j5.648 \text{ kV} = 117.9060 \angle 2.75^\circ \text{ kV}$$

Konačno, se dobije snaga \vec{S}_1 prema formuli 3.16

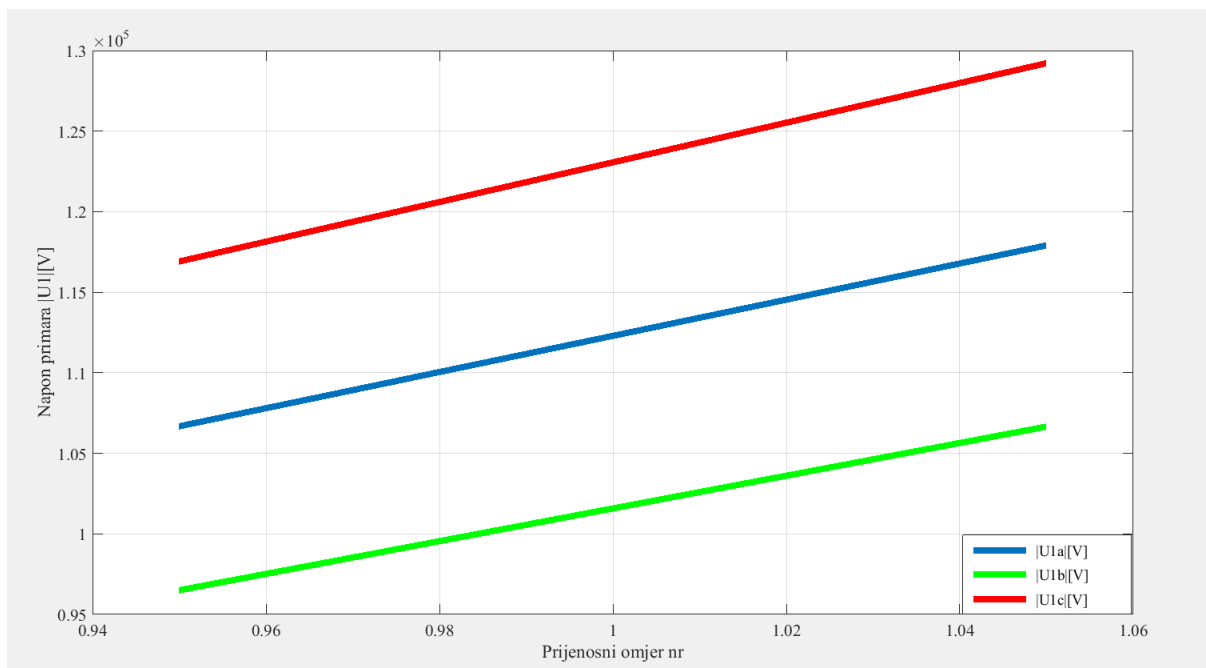
$$\vec{S}_1 = 3 \cdot \vec{V}_1 \cdot \vec{I}_1^* = 3 \cdot \frac{117.9060 \angle 2.75^\circ \text{ kV}}{\sqrt{3}} \cdot 79.0365 \angle 18.43^\circ \text{ A}$$

$$\vec{S}_1 = 15.0504 + j5.832 \text{ MVA} = 16.1408 \angle 21.18^\circ \text{ MVA}$$

Izračunate vrijednosti na primarnoj strani biti će prikazane tablično i grafički (apsolutne vrijednosti).

Tablica 3.8: Usporedne vrijednosti napona na primarnoj strani transformatora

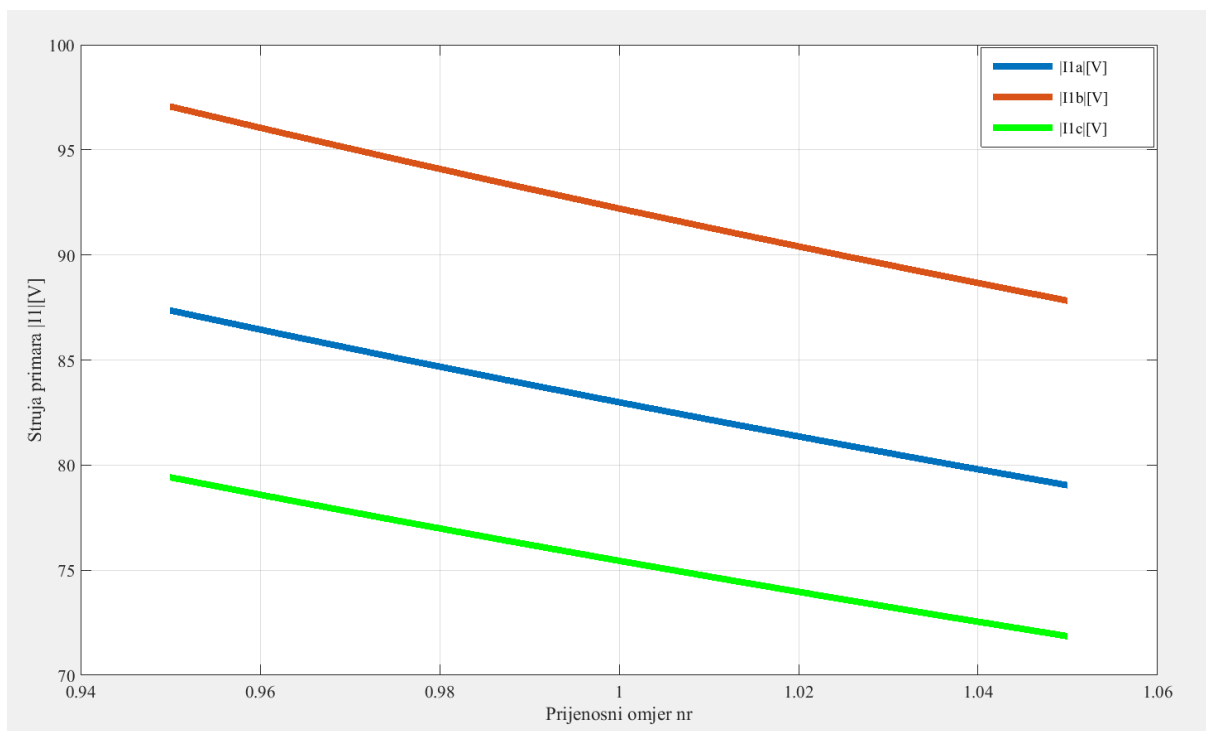
nr	U1a	U1b	U1c
0.9500	106.55443+ j5.11012	96.33270+ j5.67791	116.81766+ j4.64557
0.9625	107.95646+ j5.1774	97.60023+ j5.75262	118.35474+ j4.70669
0.9750	109.35849+ j5.2449	98.86777+ j5.82733	119.89181+ j4.76782
0.9875	110.76052+ j5.3118	100.13530+ j5.90204	121.42889+ j4.82894
1	112.16256+ j5.37908	101.40284+ j5.97675	122.96596+ j4.89007
1.0125	113.56459+ j5.44655	102.67038+ j6.05146	124.50303+ j4.95120
1.0250	114.96662+ j5.51355	103.93791+ j6.12617	126.04011+ j5.01232
1.0375	116.36865+ j5.58079	105.20545+ j6.20088	127.57718+ j5.07345
1.0500	117.77068+ j5.64803	106.47298+ j6.27559	129.11426+ j5.13457



Slika 3.7: Grafički prikaz napona U_1

Tablica 3.9: Usporedne vrijednosti struja na primarnoj strani transformatora

nr	I _{1a}	I _{1b}	I _{1c}
0.9500	83.08904- j31.18659	92.32355- j34.69134	75.52873- j28.23990
0.9625	82.00281- j30.66361	91.10582- j33.93171	74.55227- j27.94633
0.9750	80.91332- j29.64036	89.89162- j32.73437	73.56631- j27.09010
0.9875	79.82186- j28.15509	88.68184- j31.13309	72.57250- j25.71396
1	78.72958- j26.24319	87.47731- j29.15910	71.57235- j23.85745
1.0125	77.63756- j23.93744	86.27874- j26.84131	70.56723- j21.55720
1.0250	76.54674- j21.26818	85.08678- j24.20647	69.55841- j18.84713
1.0375	75.45799- j18.26354	83.90198- j21.27939	68.54702- j15.75870
1.0500	74.37210- j14.94961	82.72486- j18.08306	67.53410- j12.32107



Slika 3.8: Grafički prikaz struje primara

Tablica 3.10: Usporedan prikaz snaga primara

n	S1a	S1b	S1c
0.9500	15.05869+ j6.49114	15.06330+ j6.69631	15.05481+ j6.32163
0.9625	15.05841+ j6.46902	15.06322+ j6.64387	15.05512+ j6.33667
0.9750	15.05690+ j6.34932	15.06300+ j6.51286	15.05297+ j6.23301
0.9875	15.05422+ j6.13574	15.06267+ j6.30627	15.04845+ j6.01518
1	15.05039+ j5.83181	15.06221+ j6.02692	15.04165+ j5.68744
1.0125	15.04547+ j5.44086	15.06164+ j5.67752	15.03264+ j5.25388
1.0250	15.03950+ j4.96609	15.06096+ j5.26063	15.02153+ j4.71835
1.0375	15.03250+ j4.41053	15.06017+ j4.77868	15.00837+ j4.08456
1.0500	15.02453+ j3.77705	15.05928+ j4.23401	14.99324+ j3.35600

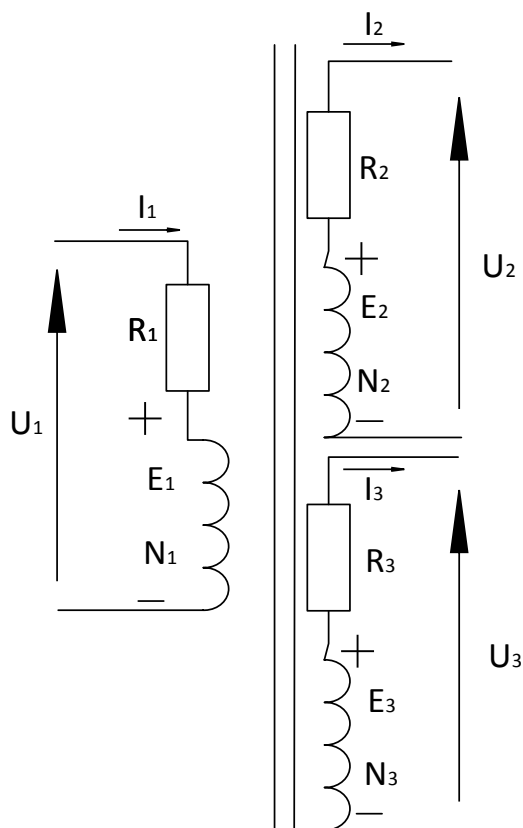
Iz navedenih grafova vidi se da napon primara proporcijonalno raste porastom prijenosnog omjera, dok struja primara proporcijonalno pada. Snaga se ne mjenja, tj. sve vrijednosti su unutar dopuštenih vrijednosti koji se toleriraju po mrežnim pravilima.

4. TRONAMOTNI REGULACIJSKI TRANSFORMATOR I NJEGOVI NADOMJESNI MODELI

Tronamotni transformatori za razliku od dvonamotnih koji imaju samo primarni i sekundarni namot, tronamotni transformatori imaju i tercijarni namot. Kod tronamotnih transformatora postoje dvije transformacije napona: primar na sekundar i primar na tercijar. Tronamotni energetska transformatori se koriste u distribucijskim mrežama kao veza distribucijske i prijenosne mreže naponom 110/35/10 kV.

Namjena tronamotnog transformatora je: povezivanje tri različita sustava različitim naponskim razinama, naprimjer napajanje pomoćne opreme u trafostanici ako je potreban poseban napon koji se razlikuje od visokog i niskog napona. Upotrebljava se za regulaciju jalove snage i napona, [5].

U spoju zvijezda ima ulogu smanjiti nultu reaktanciju, uspostaviti simetriju među fazama te smanjiti nultu komponentu struje uključenja. U spoju trokut tercijalni namot ima ulogu stabilizacijskog namota ukoliko nisu priključeni vanjski potrošači. Stabilizacijski namot se koristi za tok struje trećeg harmonika i time se postiže sinusni valni oblik napona i u slučaju nesimetričnog opterećenja transformatora za stabilizaciju nul točke.



Slika 4.1: Nadomjesna shema tronamotnog transformatora

Osnovne jednadžbe za nadomjesni model tronamotnog regulacijskog transformatora:

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2} = \frac{E_3}{N_3} \quad (4.1)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.2)$$

$$\frac{E_2}{E_3} = \frac{N_2}{N_3} \quad (4.3)$$

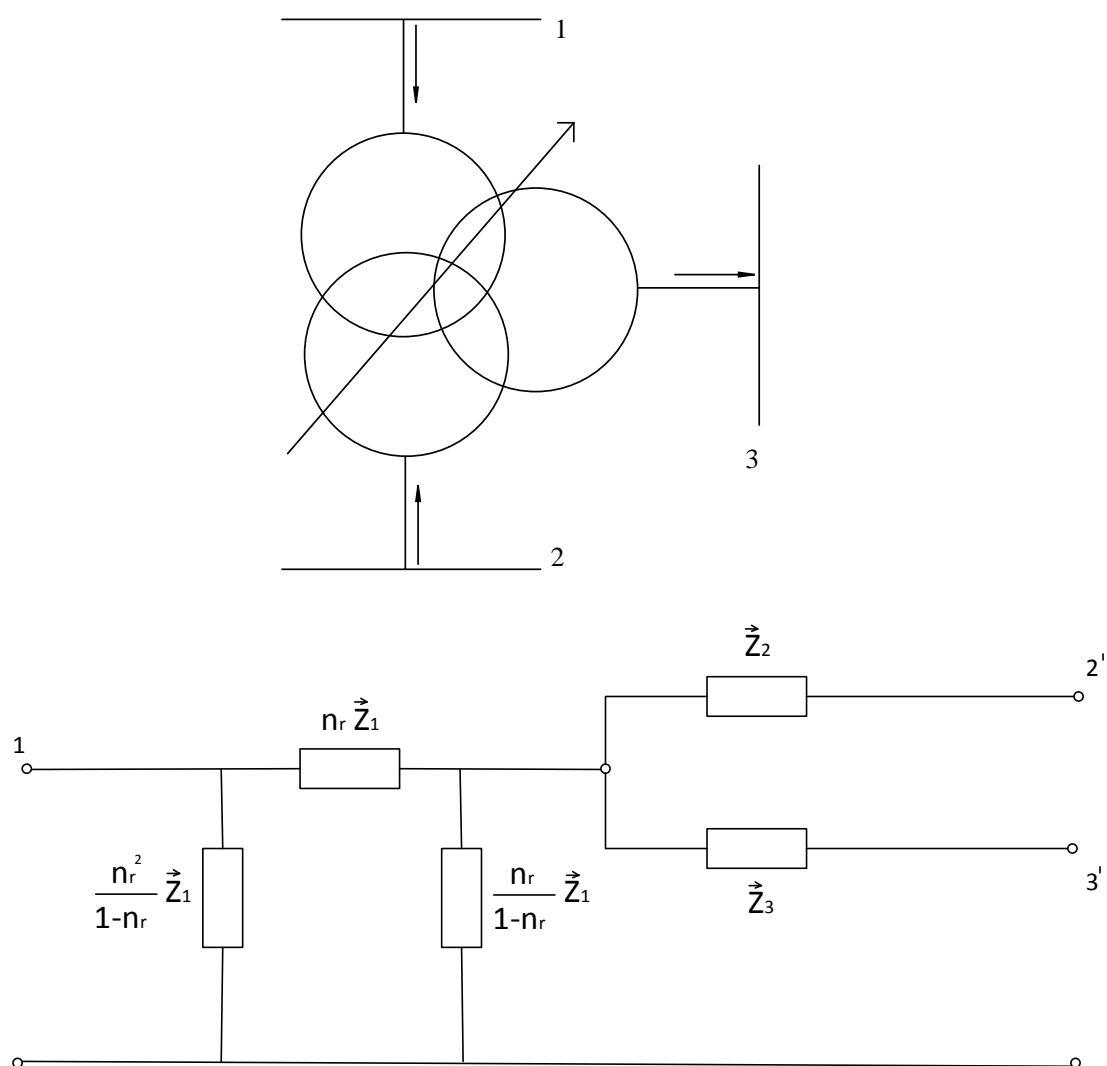
$$\frac{E_1}{E_3} = \frac{N_1}{N_3} \quad (4.4)$$

$$I_1 E_1 + I_2 E_2 + I_3 E_3 \approx 0 \quad (4.5)$$

Tercijarni namot povezuje isti magnetski tok kao primarni i sekundarni namot pa je samim time i inducirani napon po određenom zavoju jednak za sve namote. Ukupna snaga koja ulazi u transformator jednaka je nuli.

U dvonamotnom transformatoru snaga koja ulazi i izlazi iz transformatora je jednaka, dok kod tronamotnog transformatora snaga je raspodijeljena na tri namota, pa samim time ona ovisi o opterećenju sekundarnog i tercijarnog namota. Pošto svaki namot obuhvaća dio rasipnog toka druga dva namota, opterećenje jednog namota utječe na napone druga dva namota, [1].

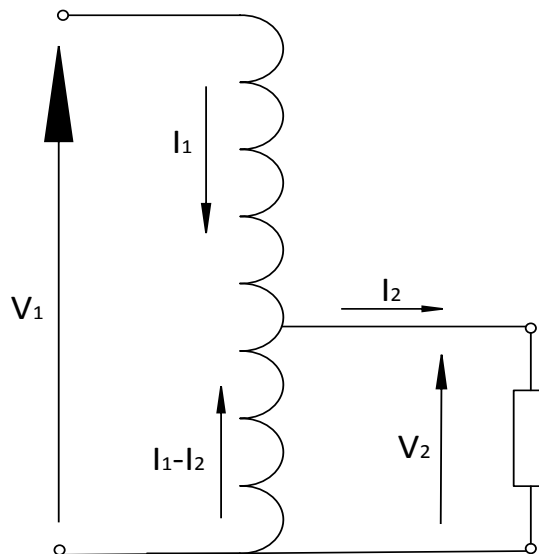
Regulacijska preklopka kod tronamotnih regulacijskih transformatora najčešće se nalazi na primarnoj strani, pa se nadomjesni model prikazuje kao na slici 4.2.



Slika 4.2: Nadomjesni model tronamotnog regulacijskog transformatora

5. AUTOTRANSFORMATORI

Autotransformator je posebna vrsta transformatora koji ima jedan zajednički namot primarnog i sekundarnog dijela, za razliku od klasičnih koji ima poseban namot primara i posebni namot sekundara. Za njih kažemo da ima samo jedan namot na transformatoru čija se jedna strana koristi kao primarna strana, a druga kao sekundarna strana. Primarna – višenaponska strana namota sadrži dva namota spojena u seriju N_1 i N_2 , dok sekundarna- niženaponska strana namota sadrži samo jedan namot N_2 kao što možemo vidjeti na slici, [15], [17].



Slika 5.1: Nadomjesni model autotransformatora

Uspoređujući ih sa dvonamotnim transformatorima iste snage i naponske razine prednosti su im:

- manje dimenzije do 50%
- veća učinkovitost radi manjih omskih gubitaka i jezgre gubitaka
- bolja regulacija napona
- manji ukupni gubici
- cjenovno pristupačniji

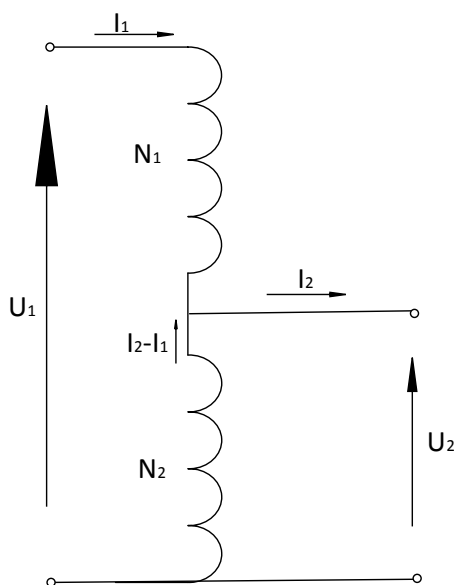
dok su nedostaci:

- direktan prijenos prenapona sa primarne na sekundarnu stranu ukoliko dođe do kvara tj. nema izolacije između primarne i sekundarne strane
- nije pogodan za velike snage
- propuštanje magnetskog toka između rotora i statora je malo pa je impedancija niska

Autotransformatore možemo podijeliti u dije skupine: silazne autotransformatore te uzlazne autotransformatore.

5.1. Silazni autotransformator

Kao što sam naziv govori, silazni autotransformator služi nam za snižavanje vrijednosti napona. Kod njega je N_1 serijski namot dok je N_2 zajednički namot, [17].



Slika 5.2: Nadomjesni model silaznog autotransformatora

Računanje tipske snage S_T se vrši:

$$S_a = U_{1a} \cdot I_{1a} = (U_1 + U_2) \cdot I_1 \quad (5.1)$$

$$S_a = U_1 \times I_1 \cdot \left(1 + \frac{U_2}{U_1}\right) \quad (5.2)$$

$$S_a = S_T \cdot \frac{U_{1a}}{U_{1a} - U_{2a}} \quad (5.3)$$

$$S_T = S_a \left(1 - \frac{U_{2a}}{U_{1a}}\right) \quad (5.4)$$

Računanje faktora redukcije q se vrši:

$$q = \frac{S_T}{S_a} = \left(1 - \frac{U_{2a}}{U_{1a}}\right) \quad (5.5)$$

Pošto se dio snage prenosi galvanском vezom između primarnog i sekundarnog namota tada možemo definirati i faktor povećanja kapaciteta autotransformatora uspoređujući je sa tipskom snagom prema jednadžbi:

$$F_c = \frac{S_a}{S_T} = \frac{1}{1 - \frac{U_{2a}}{U_{1a}}} \quad (5.6)$$

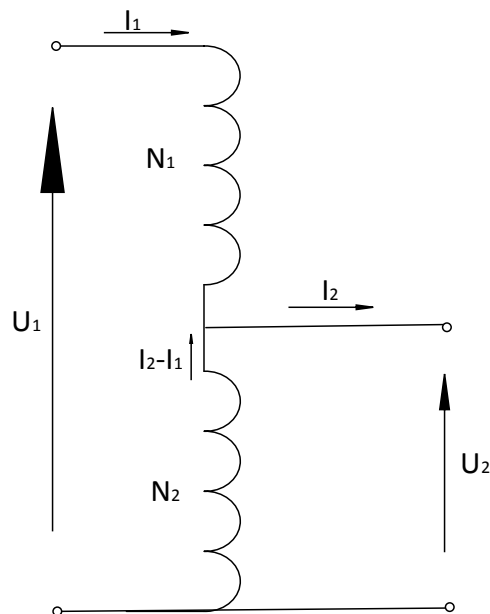
Računanje kratkog spoja silaznog autotransformatora:

Pošto su impedancije kratkog spoja autotransformatora i dvoamotnih transformatora jednake te napon kratkog spoja na visokonaponskoj strani manji u odnosu na primarni napon tada dobivamo izraz:

$$u_{ka\%} = u_{k\%} \frac{S_T}{S_{an}} \quad (5.7)$$

5.2. Uzlazni autotransformator

Kao što sam naziv govori, silazni autotransformator služi nam za snižavanje vrijednosti napona. Kod njega je N2 serijski namot dok je N1 zajednički namot, [17].



Slika 5.3: Nadomjesni model uzlaznog autotransformatora

Računanje tipske snage S_T se vrši:

$$S_a = U_{1a} \cdot I_{1a} = U_1 \cdot (I_1 + I_2) \quad (5.8)$$

$$S_a = U_1 \cdot I_1 \cdot \left(1 + \frac{I_2}{I_1}\right) = U_1 \cdot I_1 \cdot \left(1 + \frac{U_1}{U_2}\right) \quad (5.9)$$

$$S_a = S_T \cdot \frac{U_{2a}}{U_{2a} - U_{1a}} \quad (5.10)$$

$$S_T = S_a \left(1 - \frac{U_{1a}}{U_{2a}}\right) \quad (5.11)$$

Računanje faktora redukcije q se vrši:

$$q = \frac{S_T}{S_a} = \left(1 - \frac{U_{1a}}{U_{2a}}\right) \quad (5.12)$$

Pošto se dio snage prenosi galvanском vezom između primarnog i sekundarnog namota tada možemo definirati i faktor povećanja kapaciteta autotransformatora uspoređujući je sa tipskom snagom prema jednadžbi:

$$F_c = \frac{S_a}{S_T} = \frac{\frac{U_{2a}}{U_{1a}}}{\frac{U_{2a}}{U_{1a}} - 1} \quad (5.13)$$

Računanje kratkog spoja silaznog autotransformatora na visoko naponskoj strani:

Pošto je napon kratkog spoja na visokonaponskoj strani manji jer je primarni napon veći tada se mjenja bazni napon pa sljedi:

$$u_{ka\%} = u_{k\%} \frac{U_{1an} - U_{2an}}{U_{1an}} \quad (5.14)$$

Računanje kratkog spoja silaznog autotransformatora na nisko naponskoj strani:

Za razliku od visoko naponske strane, napon na nisko naponskoj strani je manji od napona kratkog spoja dvonamotnih transformatora jer je impedancija na nisko naponskoj strani manja od impedancije kratkog spoja pa sljedi:

$$u_{ka\%} = u_{k\%} \frac{U_{2an} - U_{1an}}{U_{2an}} \quad (5.15)$$

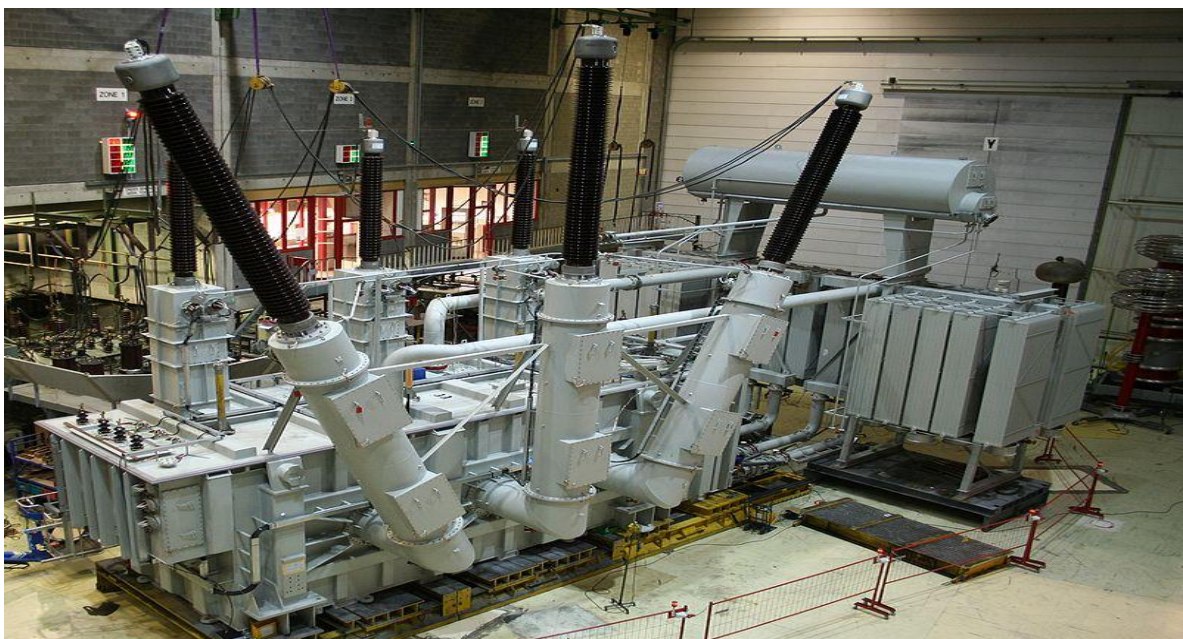
5.3. Spojevi autotransformatora

Autotransformatori se uglavnom koriste u spoju zvijezda sa uzemljenim zvjezdlištem YNa0. Tim spojem ograničava se odlazak prenapona koji može nastati na primarnoj strani da dođe do sekundarne strane. Dakako autotransformatori se mogu koristiti u spoju trokut Dd, ali se to gotovo pa nigdje ne koristi zbog ovisnosti faznog pomaka na visokonaponskoj i niskonaponskoj strani o prijenosnom omjeru transformatora. Spojeve Yd ili Dy nije moguće koristiti jer visokonaponska i niskonaponska strana moraju imati zajedničku neutralnu točku, a korištenjem tih spojeva nemamo neutralnu točku, [16], [17].

5.4. Primjena autotransformatora

Autotransformatori se najčešće koriste radi:

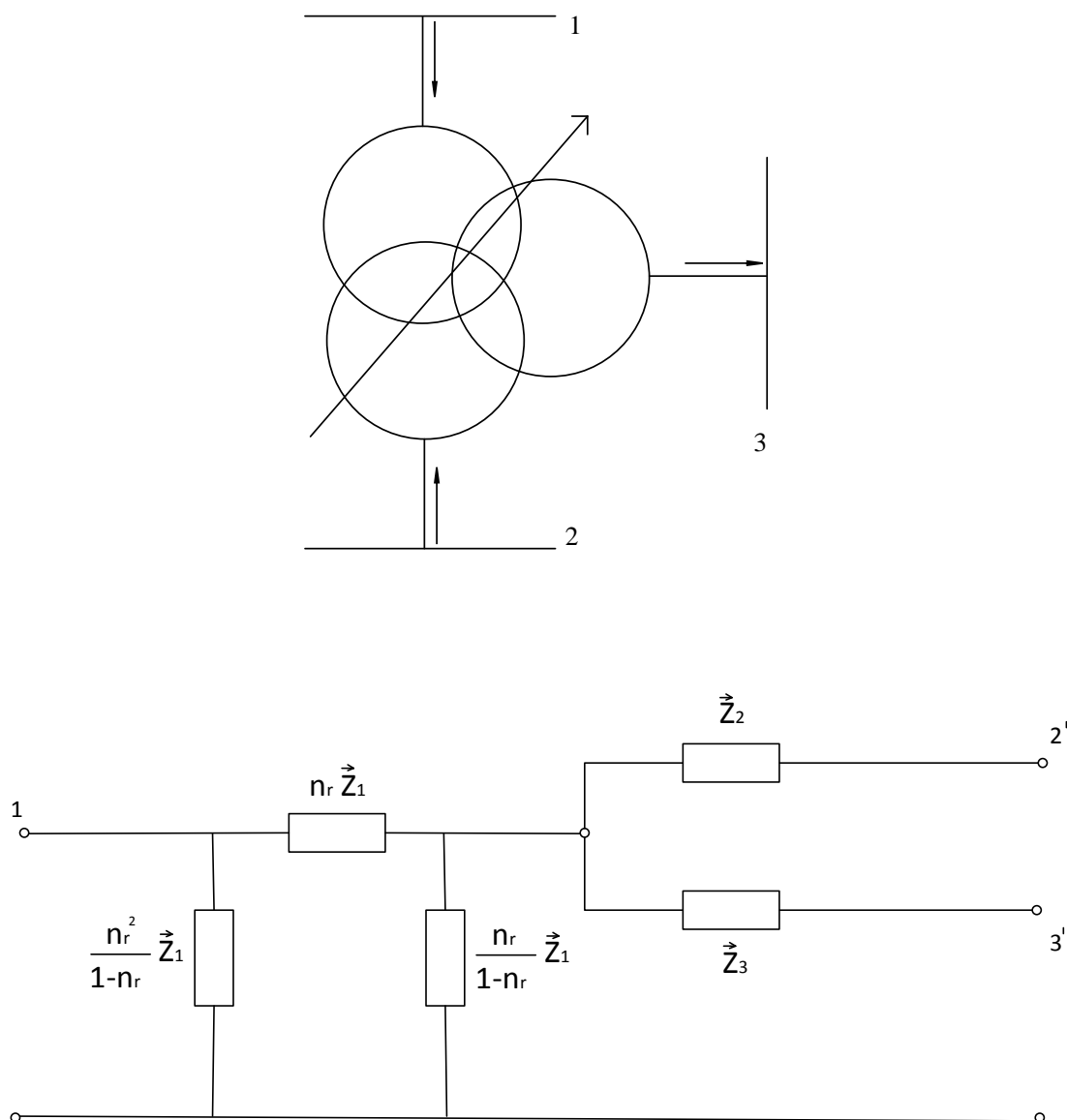
- pokretanja sinkronih i asinkronih motora
- podizanja naponsih razina kod udaljenih izvora
- uštede u dimezijama i cijeni, ukoliko je moguće koristiti auotransformator umjest dvonamotnih ili tronamotnih transformatora
- povezivanju dijelova elektroenergetskog sustava različitih naponskih razina



Slika 5.3: Autotransformator

IZVOR: <http://www.wikiwand.com/nl/Autotransformator>, 04.07.2016.

5.5 Nadomjesni model regulacijskog auto transformatora



Slika 5.4: Prikaz nadomjesnog modela regulacijskog autotransformatora

$$n = n_n \cdot n_r \quad (5.16.)$$

Regulacijski namot se najčešće nalazi na primarnoj (visokonaponskoj) strani autotransformatora jer su tamo iznosi struja manji pa je samim time i regulacijska preklopka jeftinija i lakša. Nadomjesni model se uzima isti kao i kod tronamotnih regulacijskih transformatora.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu promatraju se nadomjesni modeli regulacijskih transformatora i energetske transformatori kao elementi elektroenergetske mreže. Ukratko je objašnjen osnovni princip pretvorbe jednog iznosa napona ili struje u drugi i što se pritom dešava, kolika je korisnost i za što se upotrebljavaju.

Ukratko su opisani aktivni i pasivni dijelovi elektroenergetskog transformatora. Za lakše razumijevanje samih transformatora opisane su osnovne jednačbe transformatora. Navedeni su i realni gubici koji se javljaju u transformatoru te kako ti isti gubici dijeluju na sam transformator, zatim je opisano kako se transformator štiti od pretjeranog pregrijavanja.

Opisani su i dvonamotni regulacijski energetske transformatori te kakva im može biti izvedba. Naznačeni su te formulama objašnjeni nadomjesni modeli regulacijskog energetskog transformatora. Računaju se točne i približne vrijednosti nadomjesnog modela, te se uspoređuju dobivene vrijednosti, iz čega proizlazi da su približne vrijednosti dovoljno točne pa su one referentne za daljnji izračun. Kod računanja strujno-naponskih prilika dolazimo do zaključka da napon raste proporcijonalno prijenosnom omjeru, dok struja proporcijonalno pada. Pritom snaga se ne mijenja značajno, sve vrijednosti su u granicama $\pm 10\%$ što se tolerira mrežnim pravilima, to je ujedno i cilj kod regulacijskih transformatora.

Objašnjen je osnovni princip rada tronamotnih regulacijskih transformatora te naveden nadomjesni model. Naveden je autotransformator kao posebna vrsta transformatora, sa pripadajućim nadomjesnim modelom.

7. LITERATURA

- [1] Ožegović M. i Ožegović K.: „ELEKTRIČNE ENERGETSKE MREŽE II“, FESB Split, Dalmacija papir Split, 1996 godina.
- [2] Z. Maljković
TRANSFORMATORI 1
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EEPE_10_TR1.pdf
- [3] D. Radovanić
ELEKTRIČNI STROJEVI- Poglavlje 1: Jednofazni transformator
http://ss-ios-pu.skole.hr/upload/ss-ios-pu/images/static3/883/attachment/ES_2-_1-Jednofazni_transformator.pdf
- [4] <http://static.elitesecurity.org/uploads/2/2/2247941/TRANSFORMATORI.doc>
- [5] TERMISTORI
FER
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Tronamotni_transformator.pdf
- [6] D. Vučetić
BRODSKI ELEKTRIČNI UREĐAJI
Pomorski fakultet u Rijeci
http://www.pfri.uniri.hr/~vucetic/BEU_BS_2012.pdf
- [7] TRANSFORMATORI: Prazni hod, kratki spoj i ekvivalentna sprega
2013 godina
<https://www.scribd.com/doc/141393439/Transformatori-Prazan-hod-kratak-spoj-i-ekvivalentna-sprega>
- [8] TRANSFORMATOR
FER
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/INEU-09-11-PRINT.pdf

- [9] I. Gašparac i M. Cettolo
ELEKTRIČNI TROJEVI
2010/2011 godina
[https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/ISPITIVANJE_ELEKTRICNIH_STROJ
EVA.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/ISPITIVANJE_ELEKTRICNIH_STROJ_EVA.pdf)
- [10] ENERGETSKI TRANSFORMATORI
RITEH
[http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zee/nastava/svel/ep/download/ELEKTRICNA%2
0POSTROJENJA%208-p.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zee/nastava/svel/ep/download/ELEKTRICNA%20POSTROJENJA%208-p.pdf)
- [11] Z. Maljković
TRANSFORMATORI 2
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EEPE_2014_TR2.pdf
- [12] R. Goić, D. Jakus i I. Penović
Distribucija električne energije
2008 godina
- [13] Z. Maljković i D. Žarko
IZVEDBE TRANSFORMATORA
2014/2015 godina
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/TESIT_2014_2015_Transformatori2.pdf
- [14] Z. Maljković
KARAKTERISTIKE I DIAMIČKI MODELI TRANSFORMATORA
FER
[https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/DIS_2014_P5_Karakteristike_transforma
tora.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/DIS_2014_P5_Karakteristike_transformatora.pdf)
- [15] The Autotransformer
Electronis Tutorials
<http://www.electronics-tutorials.ws/transformer/auto-transformer.html>

- [16] Auto Transformer
electrical4u
<http://www.electrical4u.com/what-is-auto-transformer/>
- [17] D. Žarko
AUTOTRANSFORMATOR
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Autotransformator.pdf

8. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

U ovom se radu promatraju nadomjesni modeli regulacijskih energetske transformatora. Ukratko je objašnjen osnovni princip pretvorbe jednog iznosa napona ili struje u drugi i što se pritom dešava, kolika je korisnost i za što se upotrebljavaju. Navedeni su i realni gubici koji se javljaju u transformatoru te kako ti isti gubici dijeluju na sam transformator, zatim je opisano kako se transformator štiti od pretjeranog pregrijavanja.

Opisani su i dvonamotni regulacijski energetske transformatori, te kakva im može biti izvedba. Određivanje parametara transformatora u ovisnosti o prijenosnom omjeru, te promjena strujno-naponskih prilika u ovisnosti o prijenosnom omjeru. Objašnjeni su i nadomjesni modeli tronamotnih transformatora i autotransformatora.

This thesis observes equivalent models of tap changer power transformers. It briefly explains the basic principle of conversion of an amount of voltage or current to the other and what happens during that process, how efficient it is and what it is used for. Real losses are also described and how these losses affect the transformer. Overheating protection is also described in this thesis.

Two winding tap changer power transformers and their performance are also described in this thesis. Parameters are determined depending on the gear ratio and changes of the current-voltage conditions which also depend on the gear ratio. There are also explained the equivalent models of three winding power transformers and autotransformers.

Regulacijski transformator – Transformer with on - load tap changer

Energetski transformator – Power transformer

Dvonamotni regulacijski transformator – Double - wound transformer with on - load tap changer

Tronamotni regulacijski transformator – Triple - wound transformer with on - load tap changer

Autotransformatori - Autotransformer