

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

NADOMJESNI MODELI ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Rijeka, rujan, 2016.

Andrija Pečarić

0069050815

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

NADOMJESNI MODELI ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

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

Rijeka, rujan, 2016.

Andrija Pečarić

0069050815

TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike
Br.: 602-04/16-14/36
Rijeka, 14.03.2016.

Z A D A T A K
za završni rad

Pristupnik: Andrija Pečarić

Matični broj: : 0069050815

Lokalni matični broj: 10800004

Naziv zadatka: **NADOMJESNI MODELI ENERGETSKIH TRANSFORMATORA**

Title (*English*): **EQUIVALENT MODELS OF POWER TRANSFORMERS**

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

Energetski transformator kao element mreže. Dvonamotni, tronamotni transformator. Transformator u štednom spoju. Nadomjesni modeli energetskog transformatora u direktnom, inverznom i nultom sustavu. Analiza strujno-naponskih prilika na primaru uz poznate strujno-naponske prilike na sekundaru. Analiza strujno-naponskih prilika na sekundaru uz poznate strujno-naponske prilike na primaru.

Mentor:




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

Predsjednica Povjerenstva:



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

Student:



Andrija Pečarić

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

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad s naslovom „Nadomjesni modeli energetskih transformatora“ izradio samostalno pod voditeljstvom mentora V. Pred.mr.sc.Marijana Živić Đurović, dipl.ing

Andrija Pečarić

SADRŽAJ

1. UVOD.....	3
2. ENERGETSKI TRANSFORMATOR KAO ELEMENT MREŽE.....	4
2.1. Osnovno o transformatoru.....	4
2.2. Osnovni dijelovi transformatora.....	5
2.3. Podjela transformatora.....	6
2.3.1. Podjela transformatora prema snazi.....	6
2.3.2. Podjela transformatora prema načinu hlađenja.....	7
2.4. Idealni transformator.....	8
2.5. Realni transformator.....	10
2.5.1. Struja magnetiziranja.....	10
2.5.2. Gubici u bakru.....	10
2.5.3. Gubici u željezu.....	11
2.5.4. Rasipni magnetski tok.....	12
2.6. Pokus praznog hoda.....	13
2.7. Pokus kratkog spoja.....	14
2.8. Spojevi transformatora.....	17
3. DVONAMOTNI ENERGETSKI TRANSFORMATOR.....	20
3.1. Parametri dvonamotnog energetskog transformatora.....	20
3.2. T-model transformatora.....	23
3.3. Γ i I- model transformatora.....	24
3.4. II-model transformatora.....	26
3.5. Direktni (inverzni) sustav.....	27
3.6. Nulti sustav.....	27
4. TRONAMOTNI ENERGETSKI TRANSFORMATOR.....	29
4.1. Parametri tronamotnog energetskog transformatora.....	29
4.2. Direktni (inverzni) sustav.....	32
4.3. Nulti sustav.....	34
5. TRANSFORMATOR U ŠTEDNOM SPOJU.....	36
5.1. Parametri transformatora u štednom spoju.....	36
5.2. Direktni (inverzni) sustav.....	37
5.3. Nulti sustav.....	38
6. ANALIZA STRUJNO-NAPONSKIH PRILIKA.....	39

7. ZAKLJUČAK.....	44
8. LITERATURA.....	45

1.UVOD

Glavni cilj ovoga rada je upoznavanje sa energetske transformatorom kao elementom mreže, parametrima i modelima dvonamotnog energetske transformatora, tronamotnog energetske transformatora i transformatora u štednom spoju (autotransformatora).

Rad je podijeljen na 5 poglavlja.

U drugom poglavlju detaljno je opisan energetske transformator kao element mreže, osnovni dijelovi transformatora, podjela transformatora prema snazi i načinu hlađenja, idealni transformator, realni transformator (gubici), pokus praznog hoda i kratkog spoja transformatora i spojevi transformatora.

U trećem poglavlju opisani su parametri dvonamotnog energetske transformatora, T-model, Γ i I-model, Π -model transformatora, direktni (inverzni) sustav i nulti sustav dvonamotnog energetske transformatora.

U četvrtom i petom poglavlju opisani su parametri, direktni (inverzni) sustav, nulti sustav tronamotnog energetske transformatora kao i za transformator u štednom spoju.

2. ENERGETSKI TRANSFORMATOR KAO ELEMENT MREŽE

2.1. Osnovno o transformatoru

Transformator je statički električni stroj (uređaj). U njemu se električna energija iz jednog ili više izmjeničnih krugova primarnih namota transformatora prenosi (transformira) u jedan ili više izmjeničnih krugova sekundarnih namota transformatora. Izmijenjeni iznosi su napon i jakost električne struje, dok frekvencija ostaje nepromjenjiva. [1]

Energetski transformatori u elektroenergetskom sustavu imaju značajnu i veliku ulogu te su ekonomični, pouzdani i sigurni za prijenos i pretvorbu električne energije. Najčešće se koriste za povišenje ili sniženje napona, uz vrlo male gubitke.

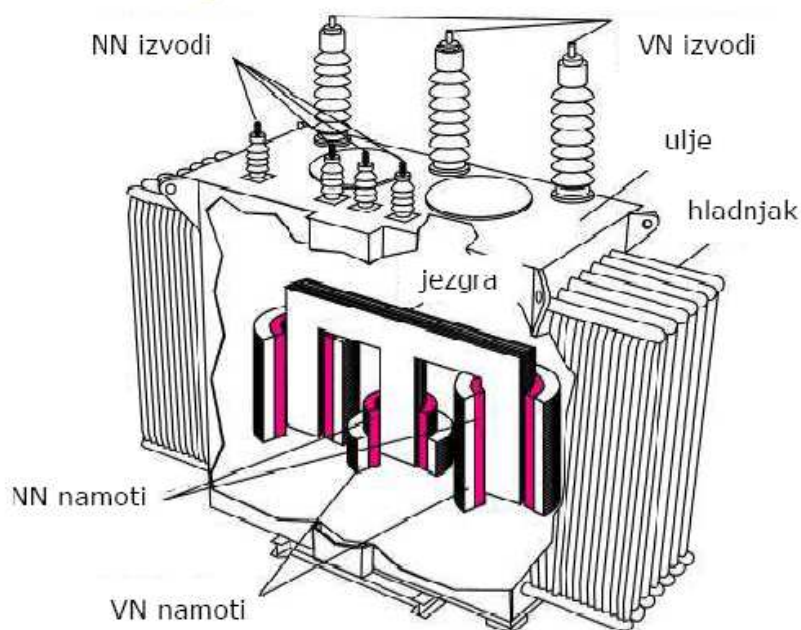


Slika 2.1. Energetski transformator (ispitna stanica tvrke Končar)

2.2. Osnovni dijelovi transformatora

Osnovni dijelovi energetskog transformatora jesu: kotao, jezgra, namoti, rashladni sustav, visoko-naponski (VN) i nisko-naponski (NN) priključci

- Kotao – kućište energetskog transformatora u koje se smještaju svi ostali dijelovi transformatora kao što su magnetska jezgra i namoti. Kotao mora biti hermetički zatvoren zbog rashladnog ulja koje se također u njemu nalazi, a izrađuje se od čeličnog lima.
- Jezgra – sastavljena od hladno valjanih transformatorskih limova debljine 0,23mm do 0,35mm koji su međusobno električki izolirani. Električna izolacija između limova služi kako bi se smanjile vrtložne struje koje nastaju u jezgri. Kako bi se dobila što bolju mehaničku kompaktnost, jezgru zatežemo bandažama od staklastog materijala koji se zagrijavanjem polimerizira i tako kompletno učvršćuje jezgru.
- Namoti – izrađuju se od bakrene žice okruglog, trakastog ili profilnog oblika. Između navoja vodič se izolira papirnatom izolacijom (kod transformatora većih snaga) ili lakom (kod transformatora manjih snaga). Obično razlikujemo namote višeg (VN), srednjeg (SN) i nižeg (NN) napona.
- Rashladni sustav – služi za hlađenje transformatora koji se zagrijava zbog gubitaka u bakru (namoti) i željezu (jezgra) transformatora.
- VN i NN priključci – priključci primarnog i sekundarnog namota



2.2. Osnovni dijelovi energetskog transformatora [4]

2.3. Podjela transformatora

Transformatore možemo podijeliti prema snazi, načinu hlađenja i prema broju faza.

2.3.1. Podjela transformatora prema snazi

1. Energetski transformatori:

- Generatorski (blok) transformator – služi za povezivanje generatora sa mrežom, gdje je primar transformatora spojen na generator (niži napon) a sekundar transformatora spojen na mrežu (viši napon). Najčešći spoj je Yd5 ili Yd11.
- Mrežni transformator – razlikujemo srednje i velike mrežne transformatore. Mrežni (veliki) transformatori koriste se za napone 400/220kV, 400/110kV i obratno. Mrežni (srednji) transformatori koriste se u prijenosnim mrežama za napone 110/35kV, 220/35kV ili za niži napon do 10kV.
- Distribucijski transformator – koristimo ih za pretvorbu napona u distribucijskoj mrezi iznosa 35/10 kV, 20/0,4 kV , 10/0,4 kV i slično. Najčešće je u kombiniranom Dyn ili Yzn spoju sa satnim brojem 5 ili 11.

2. Mjerni transformatori:

- Naponski mjerni transformator – koristi se za smanjivanje napona na razinu (npr. napon od 100V) povoljnu za mjerenje konvencionalnim (prikladnim) mjernim uređajima. Sekundar kod ovih transformatora je slabo opterećen. Na njega se uglavnom spajaju različiti releji kao i uređaji za mjerenje napona. [6]
- Strujni mjerni transformator – koristi se za smanjivanje struje do razine (npr. 1A ili 5A) povoljne za mjerenje konvencionalnim (prikladnim) mjernim uređajima. Sekundar kod ovih transformatora je slabo opterećen. Na njega se uglavnom spajaju različiti releji kao i uređaji za mjerenje struje. [6]

2.3.2. Podjela transformatora prema načinu hlađenja

Prema načinu hlađenja transformatore dijelimo na suhe i uljne transformatore.

- Suhi transformatori – medij za hlađenje kod suhog transformatora jest zrak koji prirodnim strujanjem ili prilagođenim hladnjacima hladi transformator. Zrak ima znatno slabiju učinkovitost hlađenja od ulja. Prednost suhih transformatora je ta što nisu zapaljivi pa se koriste na mjestima kao što su brodovi, bolnice, itd. Izrađuju se za snage do 10 MVA i napone do 50kV.
- Uljni transformatori – medij za hlađenje uljnog transformatora jest ulje koje ima veliku specifičnu toplinu i dobra izolacijska svojstva. Aktivni dio (jezgra i namoti) i ulje smješteni su u kotlu transformatora gdje se toplina preko stjenki kotla prenosi u okolinu i tako hladi transformator. Manji transformatori se izrađuju bez konzervatora u zatvorenoj hermetičkoj izvedbi kotla sa rebrima.

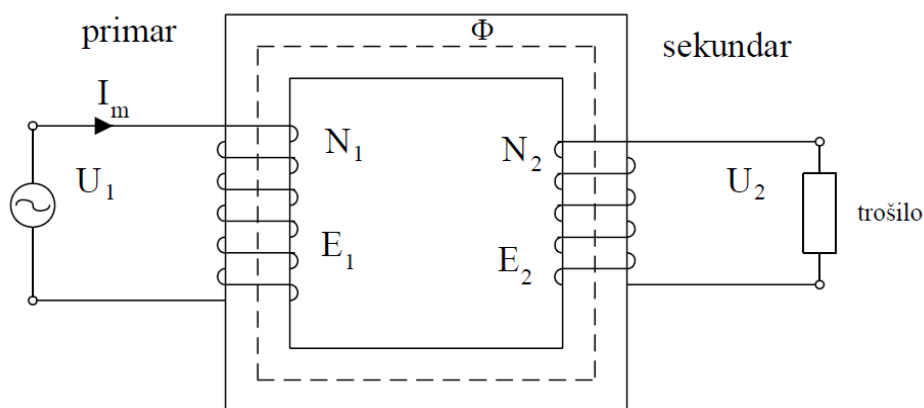
2.3.3. Podjela transformatora prema broju faza

Prema broju faza transformatore dijelimo na jednofazne i trofazne.

1. Jednofazni transformatori – transformiraju napon ili struju samo jedne faze. Za transformaciju trofaznog napona ili struje, može se koristiti kombinacija s tri jednofazna transformatora. Za potrebe trofazne transformacije, potrebno je tada utrošiti mnogo više materijala (željeznih limova), nego kod trofaznih izvedbi transformatora [6].
2. Trofazni transformatori – transformiraju napon ili struju trofaznog sustava. U slučaju kvara na transformatoru, potrebno je zamijeniti čitavu jedinicu. S obzirom na broj i vrstu namota, transformatore dijelimo na:
 - Dvonamotne transformatore –dviije naponske razine (razina nižeg i višeg napona)
 - Tronamotne transformatore –tri naponske razine
 - Transformatori u štednom spoju – imaju jedan namot za svaku fazu. Na jednoj strani se koriste svi namoti a na drugoj strani samo dio namota, čime se postiže željeni prijenosni omjer. Ovi transformatori se još nazivaju i autotransformatori. Specifični su po uštedi bakra. [6].

2.4. Idealni transformator

Idealni transformator predstavlja razvijeni model transformatora u kojem su zanemareni gubici i struja magnetiziranja. To znači da je korisnost ovoga transformatora 100%.



2.3. Shema idealnog transformatora [4]

Gubici koje zanemarujemo u ovom modelu transformatora jesu gubici u željezu (Fe) i gubici u bakru (Cu). To znači da željezo (Fe) smatramo idealnim vodičem magnetskog toka, da se magnetske silnice idealno zatvaraju u oba namota transformatora i da je permeabilnost željeza (Fe) konstantnog iznosa. U praksi nije moguće u potpunosti realizirati idealni transformator upravo zbog ovih gubitaka koje zanemarujemo.

Omjer transformacije:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.1)$$

Omjer struja i namota:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.2)$$

Iznos struje I_2 :

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_t} \quad (2.3)$$

Omjer snaga:

$$P_1 = P_2 \quad (2.4)$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (2.5)$$

Gdje su :

- U_1, U_2 naponi primara i sekundara transformatora, V
- N_1, N_2 namoti primara i sekundara transformatora
- I_1, I_2 struje primarnog i sekundarnog kruga, A
- Z_1, Z_2 impedancija trošila, Ω
- P_1, P_2 snage prima i sekundara transformatora, W

Struja I_2 poteče kada zatvorimo strujni krug nekim trošilom na sekundarnoj strani transformatora.

Kako bi dobili što točniji proračun, sekundarne veličine možemo reducirati na primarni broj zavoja. Ako dođe do promjene njihovih vrijednosti, ponovno ih vraćamo na vrijednosti sekundara. [4]

Reducirani napon:

$$U'_2 = U_2 \frac{N_1}{N_2} \quad (2.6)$$

Reducirana struja:

$$I'_2 = I_2 \frac{N_2}{N_1} \quad (2.7)$$

Reducirana impedancija:

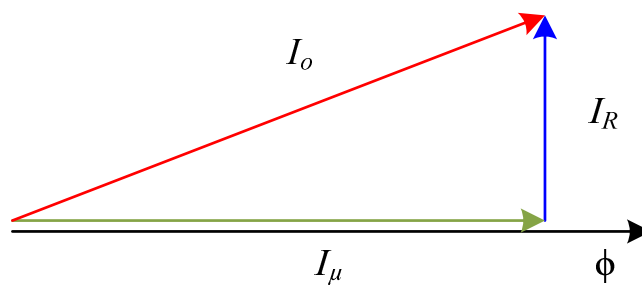
$$Z'_2 = Z_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (2.8)$$

2.5. Realni transformator

Realni transformator jest transformator kojeg koristimo u praksi (stvarni transformator). U njemu se pojavljuju gubici koji nastaju zbog stvarnih karakteristika materijala iz kojeg je transformator izgrađen. Uzimaju se u obzir gubici u namotima, odnosno bakru (Cu), gubici u željezu (Fe), postoji rasipni magnetski tok te iz mreže transformator povlači struju magnetiziranja.

2.5.1. Struja magnetiziranja

Ako je transformator neopterećen u njegovom primarnom namotu teče struja praznog hoda I_0 . Ta se struja može prikazati s dvije komponente: strujom magnetiziranja I_μ koja stvara magnetski tok ϕ i strujom koja pokriva gubitke u željeznoj jezgri i namotu primara I_R . Komponenta struje praznog hoda I_R znatno je manja od struje praznog hoda I_0 te je možemo zanemariti. U tom slučaju uzimamo da je struja magnetiziranja I_μ jednaka struji praznog hoda I_0 [7].



2.4. Struja magnetiziranja

Struja magnetiziranja nije sinusna već je iskrivljena zbog promjenjive magnetske permeabilnosti željezne jezgre.

2.5.2 Gubici u bakru

Namoti transformatora najčešće se izrađuju od bakra (Cu), a rjeđe mogu biti i od aluminija (Al). Zbog materijala od kojeg je izrađen namot, javlja se utjecaj omskog otpora na kojem se dio snage troši za zagrijavanje namota. Takav trošak snage zovemo gubici u bakru.

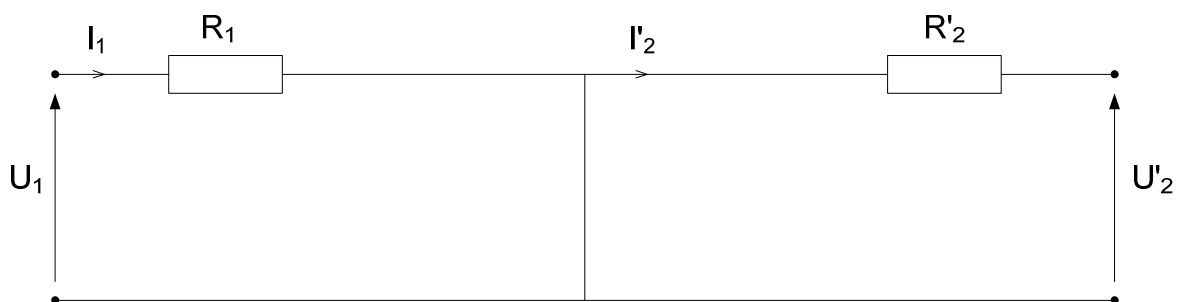
Gubici u bakru:

$$P_{Cu1} = I_1^2 R_1 \quad (2.9)$$

$$P_{Cu2} = I_2^2 R_2 \quad (2.10)$$

Gdje su:

- P_{Cu1}, P_{Cu2} gubici u bakru primara i sekundara, W
- R_1, R_2 omski (djelatni) otpor namota primara i sekundara, Ω



2.5 Shema otpora primarnog i sekundarnog namota

2.5.3. Gubici u željezu

Gubici u željezu javljaju se u jezgri transformatora zbog magnetskog toka koji uzrokuje gubitke zbog histereze i gubitke zbog vrtložnih struja.

Gubici u željezu:

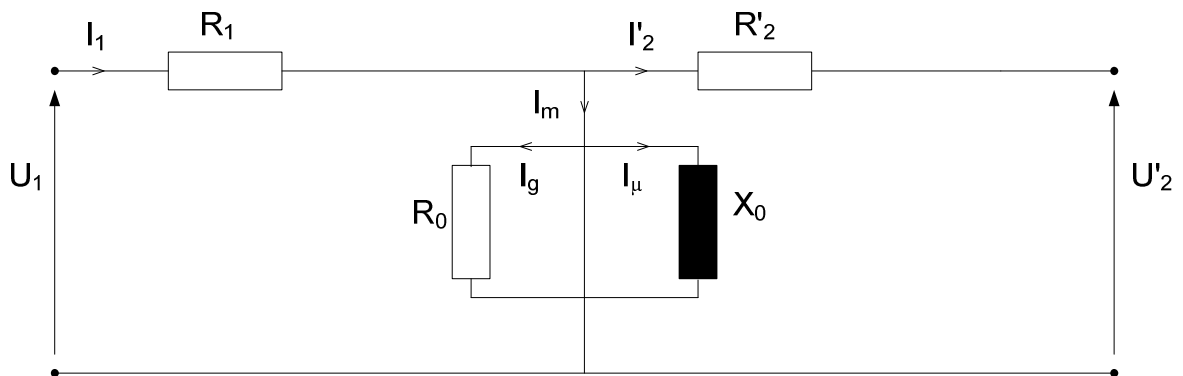
$$P_h = h \cdot f \cdot B_m^2 \cdot m \quad (2.11)$$

$$P_v = v \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot m \quad (2.12)$$

Gdje su:

- P_h gubici zbog histereze, W
- P_v gubici zbog vrtložnih struja, W
- h, v jedinični gubici, W/kg
- f frekvencija, Hz

- B_m amplituda magnetske indukcije, T
- m masa jezgre, kg



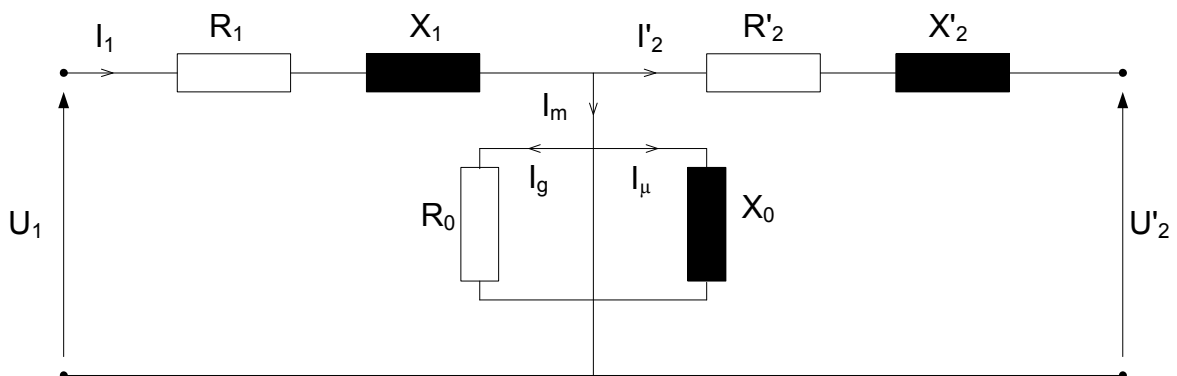
2.6. Shema gubitaka u željezu

Gdje su:

- R_1, R_2 djelatni otpor namota primara i sekundara, Ω
- X_1, X_2 rasipne reaktancije, Ω
- R_0 gubici vrtložnih struja, Ω
- X_0 gubici histereze, Ω

2.4.4. Rasipni magnetski tok

Rasipni magnetski tok javlja se jer permeabilnost željeza (Fe) nije beskonačno velika, tako da magnetski tok ne obuhvaća sve zavoje primarnog i sekundarnog namota. Dio magnetskog toka gubi se u zraku koji okružuje primarne i sekundarne namote transformatora.



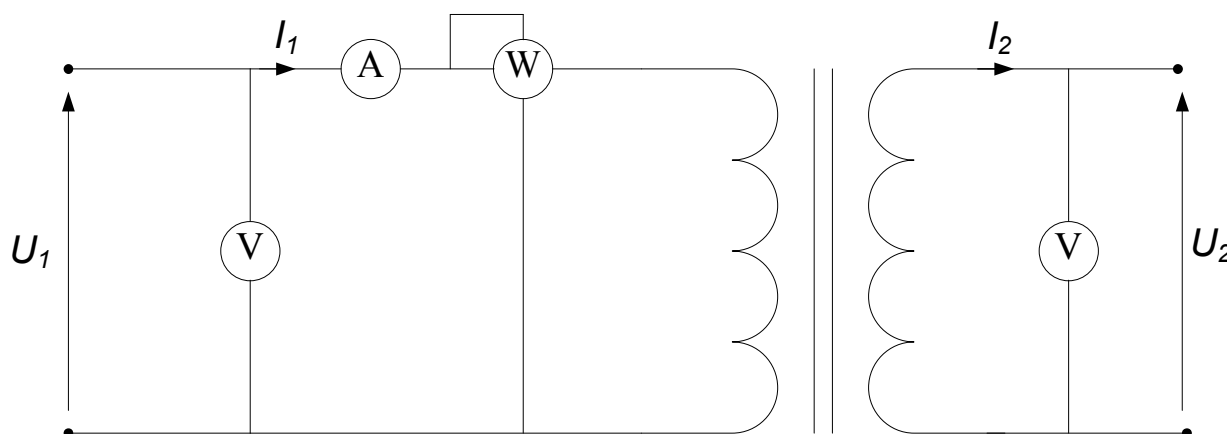
2.7. Shema rasipnog magnetskog toka, odnosno T-shema transformatora

2.6. Pokus praznog hoda

Prazni hod je pogonsko stanje transformatora kod kojeg je na primar priključen nazivni napon, a sekundarne stezaljke su otvorene. Narinuti napon (nazivni) na stezaljkama mora biti nazivne vrijednosti i nazivne frekvencije.

U ovom pokusu određujemo R_0 i X_0 . Vrijednost za X_0 je ovisna o stupnju zasićenja u jezgri, a nadomjesni otpor gubitaka u jezgri R_0 ovisan je magnetskoj indukciji i frekvenciji. Dio vrtložnih struja u jezgri je ovisan o temperaturi. Za točnije određivanje R_0 potrebno je da temperatura jezgre naraste blizu radne temperature. Izbor namota na kojeg se želi narinuti napon je proizvoljan, ipak namot nižeg napona je prihvatljiviji izbor, s obzirom na pogonsku sigurnost pri radu s nižim naponom. [8]

Shema spoja za provedbu pokusa praznog hoda prikazana je na slici (2.8), gdje je vatmetar spojen tako da mjeri snagu praznog hoda P_0 koju transformator uzima iz mreže.



2.8. Shema spoja za provedbu pokusa praznog hoda

Na početku pokusa čekamo da temperatura jezgre postigne iznos blizu radne temperature, mjerimo snagu P_0 , napon U_0 i struju I_0 . Za $I_2=I'_2=0$. Iznos impedancije promatrane sa strane izvora je:

$$Z_0 = R_1 + jX_{\sigma 1} + R_0 || jX_0 \quad (2.13)$$

Uzmemo li u obzir da je transformator dobro projektiran možemo pisati da je $(R_0, X_0) \gg (R_l, X_{\sigma l})$, za impedanciju sada možemo pisati:

$$Z_0 \approx R_0 || jX_0 \quad (2.14)$$

Aproksimacijom gornjeg izraza podrazumijeva se da je $U_0 \approx E_l$ iz čega proizlazi:

$$R_0 = \frac{U_0^2}{P_0} \quad (2.15)$$

S obzirom da vrijedi relacija $I_0^2 = I_{or}^2 + I_{\mu}^2$, izraz za X_0 je:

$$X_0 = \frac{U_0}{I_{\mu}} = \frac{U_0}{\sqrt{I_0^2 - \left(\frac{U_0}{R_0}\right)^2}} \quad (2.16)$$

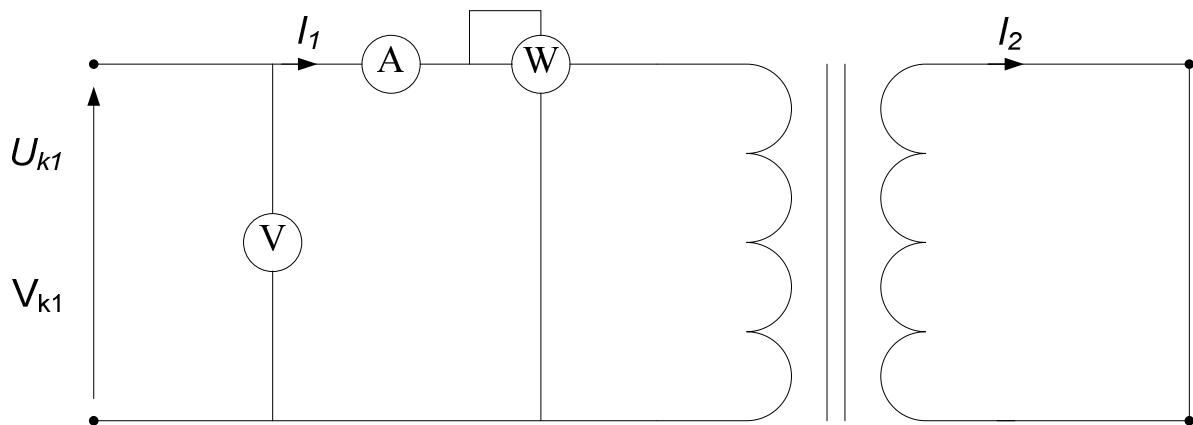
Izmjerena snaga P_0 predstavlja ukupne gubitke praznog hoda, a to su gubici u bakru (Cu) i gubici u željezu (Fe). Gubici u bakru (namotima) su zanemarivi prema gubicima u željezu (jezgri). Vrijedi da je:

$$P_0 \approx \text{gubici u željezu (Fe) transformatora}$$

2.7. Pokus kratkog spoja

Kratki spoj transformatora jest stanje kvara kod kojeg je na primarnu stranu transformatora priključen napon U_1 , a sekundarne stezaljke su kratko spojene, što znači da je sekundarni napon $U_2 = 0$ V. U namotima transformatora teku struje kratkog spoja koje svojim vrijednostima višestruko nadmašuju nazivnu struju primara i sekundara. [7]

Pogonsko stanje kratkog spoja vrlo je nepovoljno, jer struja kratkog spoja znatno povećava gubitke u namotima koji rastu s kvadratom vrijednosti struje. Posljedice mogu biti pogubne za transformator, ako u kratkom vremenu ne dođe do prekida ovakvog pogonskog stanja. U transformatoru se razvija velika količina topline i stvaraju se velika mehanička naprezanja, što može potpuno uništiti transformator i izazvati štetu na okolnim dijelovima postrojenja. [7]



2.9. Shema spoja za provedbu pokusa kratkog spoja

Pokus kratkog spoja provodimo tako da sekundarne stezaljke kratko spojimo, a na primarni namot priključimo nazivni napon koji postupno povećavamo sve dok mu kroz primarni namot ne poteče nazivna struja I_n .

Napon kratkog spoja izražen u postotnom iznosu:

$$u_k = 100 \frac{\text{napon KS}}{\text{nazivni napon}} [\%] = 100 \frac{V_{k1}}{V_{a1}} [\%] = 100 \frac{U_{k1}}{U_{a1}} [\%] \quad (2.17)$$

$$u_k = 100 \frac{I_n Z_k}{U_n} [\%] = 100 \frac{S_n Z_k}{U_n^2} [\%] \quad (2.18)$$

Impedancija primarne strane, $U_2=0$:

$$Z_k = R_1 + jX_{\sigma 1} + R_0 \parallel jX_0 \parallel a^2(R_2 + jX_{\sigma 2}) \quad (2.19)$$

Članovi R_0 i X_0 za dva reda su veći od $a^2 R_2$ i $a^2 X_{\sigma 2}$. Ako ne uzmemo u obzir ova dva člana, primarnu impedanciju (impedanciju kratkog spoja) možemo zapisati na sljedeći način:

$$Z_k \approx (R_1 + a^2 R_2) + j(X_{\sigma 1} + a^2 X_{\sigma 2}) = R_k + jX_{\sigma k} \quad (2.20)$$

Pomoću mjernih podataka za snagu P_k , napona U_k i struje $I_k=I_n$, izračun za nadomjesni otpor R_k i nadomjesnu rasipnu reaktanciju $X_{\sigma k}$ glasi:

$$R_k = \frac{P_k}{I_n^2} \quad (2.21)$$

$$Z_k = \frac{U_k}{I_n} \quad (2.23)$$

$$X_{\sigma k} = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (2.24)$$

Pomoću izraza:

$$R'_2 = a^2 R_2 = R_1 \text{ i } X'_{\sigma 2} = a^2 X_{\sigma 2} = X_{\sigma 1}$$

Dobije se:

$$X_{\sigma 1} = X'_{\sigma 2} = \frac{1}{2} X_{\sigma k} \quad (2.25)$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{1}{2} R_k \quad (2.26)$$

R_1 i R_2 iznose polovicu vrijednosti R_k iako ne poznajemo istosmjerne vrijednosti otpora namota. Sa poznatim vrijednostima istosmjernih otpora namota možemo izračunati R_1 i R'_2 za različite strujne gustoće prema sljedećim izrazima:

$$R_1 = \frac{R_{1=} }{R_{1=} + a^2 R_{2=}} R_k \quad (2.27)$$

$$R'_2 = R_k - R_1 \quad (2.28)$$

Djelatna (radna) i jalova komponenta za napon kratkog spoja iznose:

$$u_r = 100 \frac{I_n R_k}{U_n} [\%] = 100 \frac{P_k}{S_n} [\%] \quad (2.29)$$

$$u_k = 100 \frac{I_n X_{\sigma k}}{U_n} [\%] = 100 \frac{S_n X_{\sigma k}}{U_n^2} [\%] \quad (2.30)$$

Napon kratkog spoja postotak je nazivnog napona i obično iznosi ispod 10% za trofazne transformatore do nazivne snage 630 kVA, a do 20% za transformatore nazivne snage do

nekoliko stotina MVA. Pri nazivnoj frekvenciji i naponu koji je nekoliko puta manji od nazivnog i magnetska indukcija u jezgri je toliko puta manja. Djelatni otpori namota određuju se U-I metodom (tzv. istosmjerni otpori). [8]

Izmjerena snaga P_k predstavlja ukupne gubitke kratkog spoja, to su gubici u bakru (Cu) i gubici u željezu (Fe). Gubici u željezu (Fe) su zanemarivi prema gubicima u bakru (Cu). Vrijedi da je:

$$P_k \approx \text{gubici u bakru (Cu) transformatora}$$

2.8. Spojevi transformatora

Spoj transformatora je informacija o načinu spajanja namota transformatora i faznom pomaku između napona namota višeg i nižeg napona. [4]

- Y,y – oznaka za spoj namota u zvijezdu
- D,d – oznaka za spoj namota u trokut
- Z, z – oznaka za spoj cik-cak
- N,n – oznaka da je zvjezditište zvijezde (primara i /ili sekundara) uzemljeno
- 0, 1, 5, itd – oznaka za satni broj

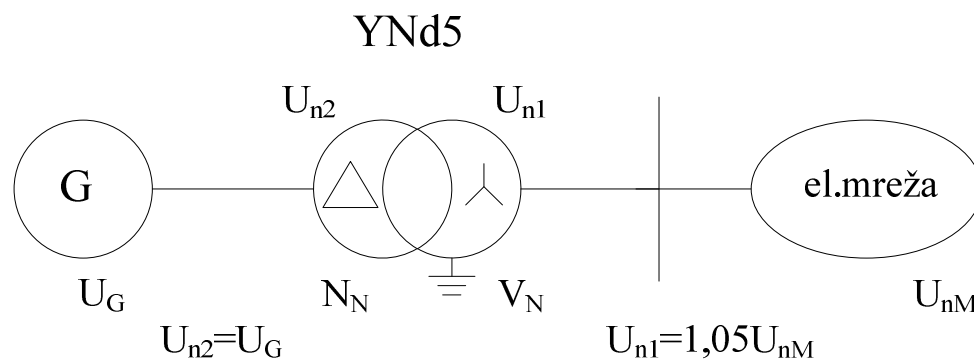
Velikim slovima se označuje primarni namot dok se malim slovima označuje sekundarni i tercijarni namot kod tronamotnih transformatora.

Fazni pomak se označuje brojevima na satu, tako da jednom satu odgovara 30° ($1=30^\circ$). To znači da npr. satnom broju 5 odgovara fazni pomak od 150° .

Broj najčešćih izvedbi spojeva energetskih transformatora koji se koriste u praksi, znatno je manji od broja mogućih teoretskih izvedbi spojeva energetskih transformatora.

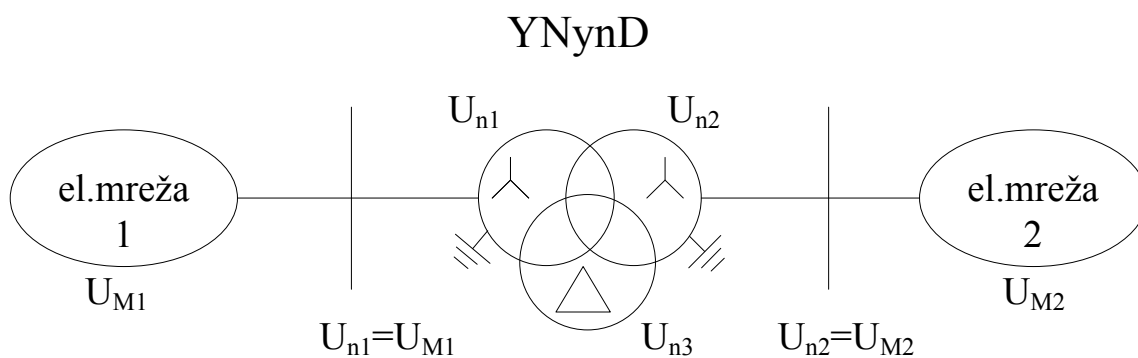
Najčešće izvedbe spojeva energetskih transformatora:

- Za spoj generatora s mrežom primjenjuje se spoj da generator bude priključen na namot transformatora spojen u trokut, tako da se reduciraju viši harmonici i da se generator odvoji od nultog sustava mreže. Najčešće koristimo YNd5 spoj prikazan na slici (2.10):



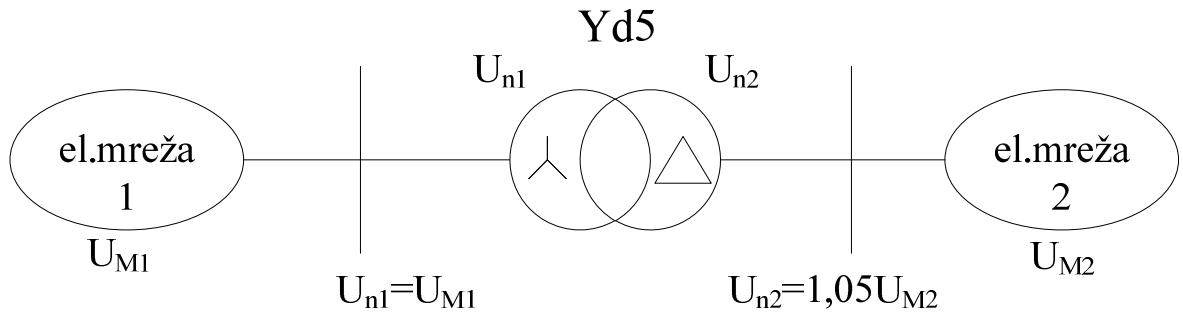
2.10. Spoj Ynd5 energetskog transformatora

- Za povezivanje elektroenergetskih mreža visokog napona (VN), vrlo visokog napona (VNN), najčešće se koristi YnynD (Ynd5) spoj. To su mreže napona 110 kV, 220 kV, 400 kV. Transformatori koji se koriste su: tronamotni energetski transformator sa tercijarnim namotom i autotransformatorom sa tercijarnim namotom.



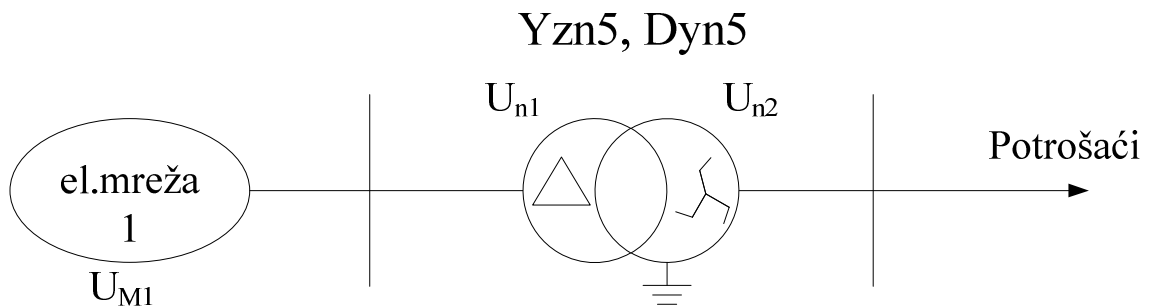
2.11. Spoj YnynD energetskog transformatora sa tercijarnim namotom

- Za povezivanje elektroenergetskih mreža srednjeg napona (SN), najčešće se koristi Yd5 spoj prikazan na slici (2.12.). To su mreže napona 35 kV, 20 kV, 10 kV.:



2.12. Spoj Yd5 energetskeg transformatora

- Za povezivanje napajanja niskonaponskih mreža (NN), najčešće se primjenjuju skupine spoja Yzn5 (manje jedinice), Dyn5 (veće jedinice) prikazan na slici (2.13.). Zvezdište na strani niskog napona se uzemljuje kako bi se smanila nesimetrija.

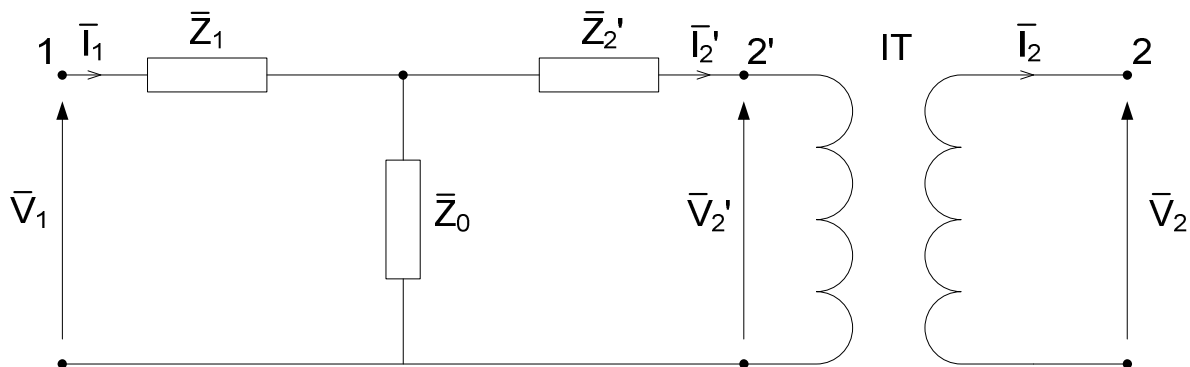


2.13. Spoj Yzn5, Dyn5 energetskeg transformatora

3. DVONAMOTNI ENERGETSKI TRANSFORMATOR

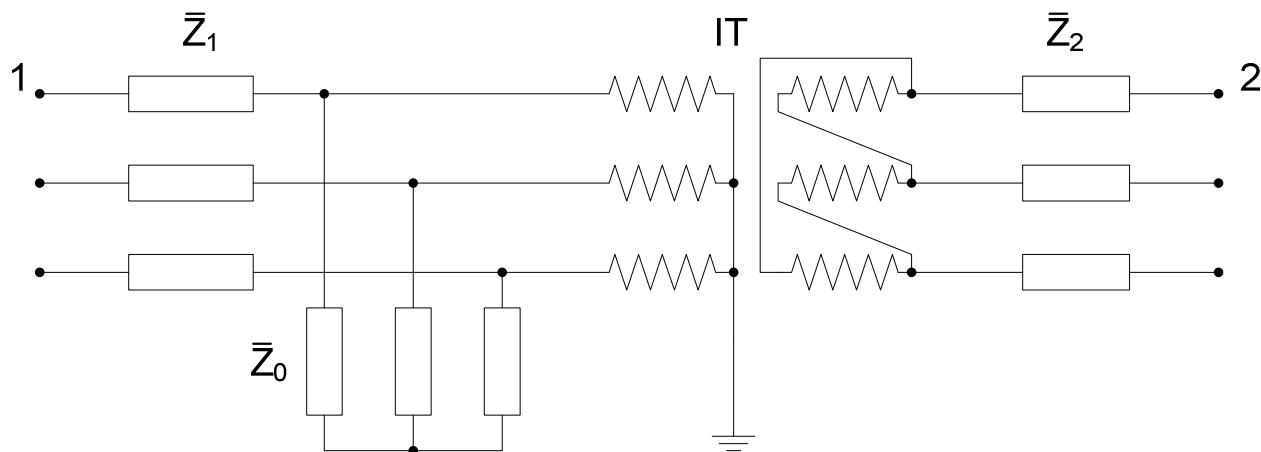
3.1. Parametri dvonamotnog energetskog transformatora

Na slici 3.1. prikazana je jednofazna nadomjesna shema dvonamotnog energetskog transformatora.



3.1. Jednofazna nadomjesna shema dvonamotnog energetskog transformatora

Na slici 3.1. prikazana je trofazna nadomjesna shema dvonamotnog energetskog transformatora.



3.2. Trofazna nadomjesna shema dvonamotnog energetskog transformatora

Gdje je:

- 1,2 primarna (1) i sekundarna (2) strana transformatora
- IT idealni transformator
- \bar{Z}_1 uzdužna impedancija (reaktancija i djelatni otpor) primarnog namota
- \bar{Z}_2 uzdužna impedancija (reaktancija i djelatni otpor) sekundarnog namota
- \bar{Z}_0 impedancija popriječne grane (struja magnetiziranja i gubici u željezu)

Položaj idealnog transformatora u shemi možemo proizvoljno odabrati ako su impedancije \bar{Z}_1 , \bar{Z}_2 , \bar{Z}_0 ispravno izračunate, odnosno ako ih prilikom promjene položaja idealnog transformatora (IT) točno preračunamo.

Preračunavanje primarne veličine (npr. \bar{Z}_1) na sekundarnu stranu izvodi se sljedećim izrazom:

$$\bar{S} = \frac{U_1^2}{\bar{Z}_1} = \frac{U_2^2}{\bar{Z}_1''} \quad (3.1)$$

Gdje su:

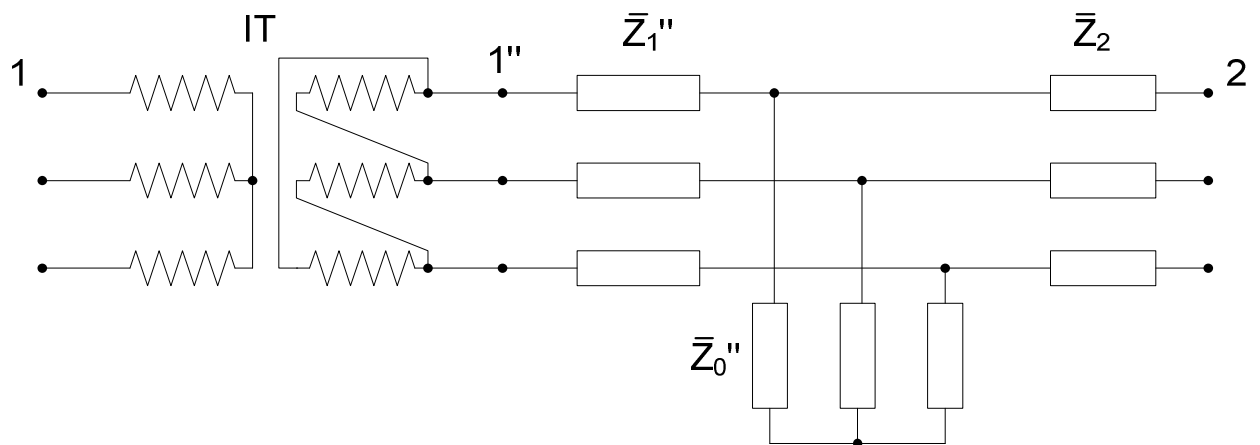
- \bar{S} snaga transformatora
- U_1 napon primara
- U_2 napon sekundara
- \bar{Z}_1', \bar{Z}_1'' preračunata primarna impedancija
- \bar{Z}_2', \bar{Z}_2'' preračunata sekundarna impedancija
- \bar{Z}_0', \bar{Z}_0'' preračunata popriječna impedancija

Iz predhodnog izraza izlazi:

$$\bar{Z}_1'' = \bar{Z}_1 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \quad (3.2)$$

$$\bar{Z}_0'' = \bar{Z}_0 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \quad (3.3)$$

Na shemi 3.3. prikazan je prijelaz sa sheme 3.2. na sekundarnu stranu primjenom formula 3.2 i 3.3.



3.3. Parametri dvonamotnog energetskog transformatora preračunati na sekundarnu stranu

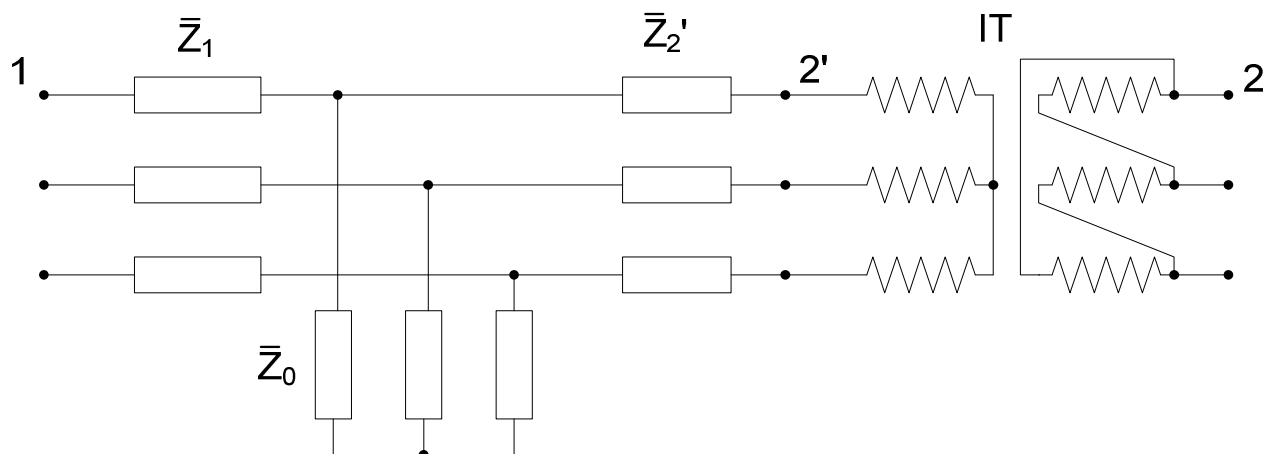
Preračunavanje sekundarne strane (npr. \bar{Z}_2) na primarnu stranu sljedećim izrazom:

$$\bar{S} = \frac{U_1^2}{\bar{Z}_2} = \frac{U_2^2}{\bar{Z}_2'} \quad (3.4)$$

Iz prethodnog izraza izlazi:

$$\bar{Z}_2' = \bar{Z}_2 \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 \quad (3.5)$$

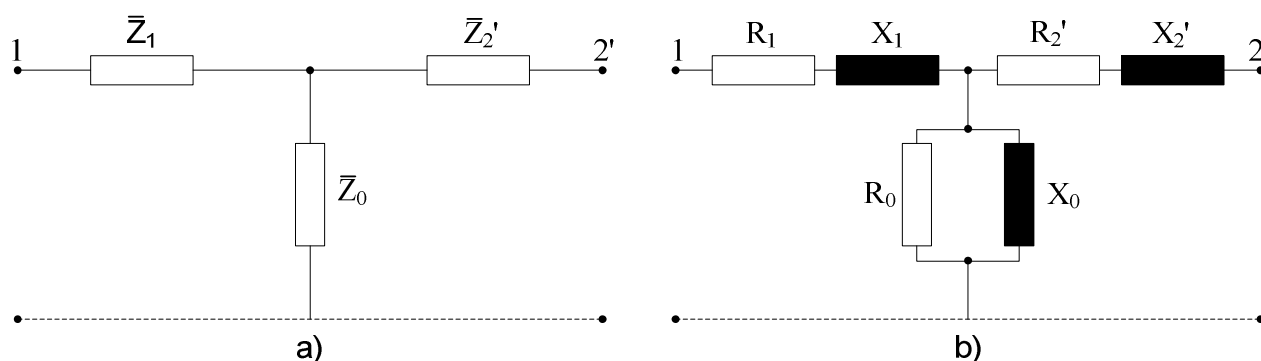
Na shemi 3.4. prikazan je prijelaz sa sheme 3.2. na primarnu stranu primjenom formula 3.4. i 3.5.



3.4. Parametri dvonamotnog energetskog transformatora preračunati na primarnu stranu

3.2. T- model transformatora

Transformator obično promatramo između krajeva 1"-2 ili 1-2', pa se u nadomjesnim shemama (modelima) ne crta idealni transformator. Bez obzira na njegovu izvedbu, trofazni se transformator smatra simetrično izvedenim elementom mreže, koji nema međusobni utjecaj faza, pa se kod proračuna isključivo koriste jednofazne nadomjesne sheme. [9]



3.5. T-shema transformatora

Na slici 3.5.a) je prikazana T-shema transformatora sa poprečnom reaktancijom \bar{Z}_0 koja je opširnije prikazana na slici 3.5.b) te ju preračunavamo u odgovarajuću admitanciju prema sljedećim izrazima:

$$\bar{Z}_0 = \frac{R_0 j X_0}{R_0 + j X_0} \quad (3.6)$$

$$\bar{Y}_0 = \frac{1}{\bar{Z}_0} = \frac{R_0 + j X_0}{R_0 j X_0} = \frac{1}{R_0} - j \frac{1}{X_0} \quad (3.7)$$

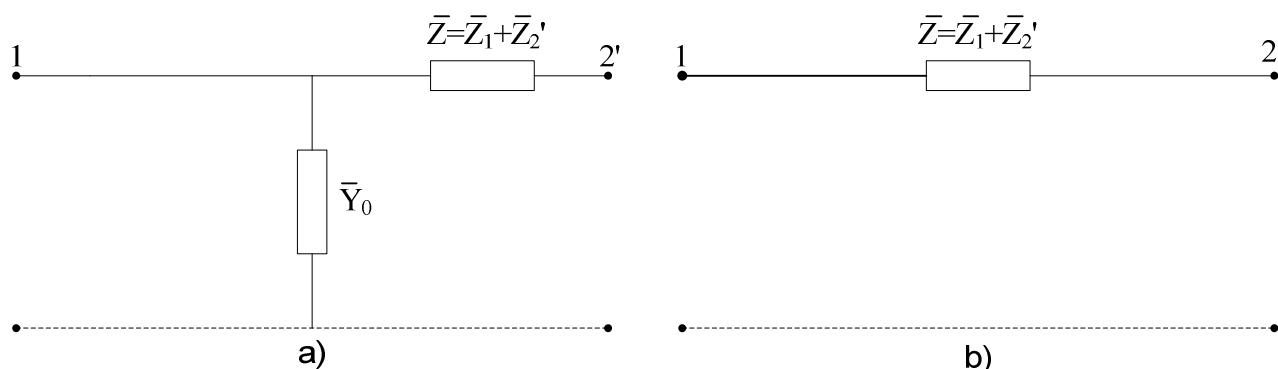
$$G_0 = \frac{1}{R_0} \quad (3.8)$$

$$B_0 = -\frac{1}{X_0} \quad (3.9)$$

3.3. Γ i I-model transformatora

Manje točna je Γ -shema (Sl. 3.6.a), u praksi zadovoljava u svim proračunima, osim u onim proračunima gdje se zahtijeva velika točnost.

Impedancije \bar{Z}_1 i \bar{Z}_2 nije moguće izračunati zasebno zbog manjka raspoloživih podataka. U mrežama srednjih napona zadovoljava I-shema (Sl. 3.6.b). Kod I-sheme u potpunosti se zanemaruje poprečna grana. Kod proračuna prilika u kratkom spoju zadovoljit će i ova najjednostavnija I-shema. [9]



3.6.- a) Γ -shema i b) I-shema transformatora

Iz sljedećih poznatih podataka mogu se odrediti parametri ekvivalentne Γ -sheme, a to su:

- U_{n1} nazivni linijski napon primarnog namota
- U_{n2} nazivni linijski napon sekundarnog namota
- S_n trofazna nazivna snaga
- e_k relativni napon kratkog spoja
- P_k gubici kratkog spoja transformatora
- i_o relativna struja magnetiziranja
- P_o gubici praznog hoda transformatora

Izraz za apsolutnu vrijednost $|\bar{Z}|$ dobiva se iz izraza za relativni napon kratkog spoja (e_k):

$$e_k = \frac{|\bar{Z}| I_n}{\frac{U_n}{\sqrt{3}}} \quad (3.10)$$

$$|\bar{Z}| = e_k \frac{U_n}{\sqrt{3}} \frac{1}{I_n} \frac{U_n}{U_n} = e_k \frac{U_n^2}{S_n} \quad (3.11)$$

Izraz za djelatnu komponentu (R) dobiva se iz izraza za gubitke kratkog spoja (Pk):

$$P_k = 3I_n^2 R = 3 \left(\frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} \right)^2 R = \left(\frac{S_n}{U_n} \right)^2 R \quad (3.12)$$

$$R = \left(\frac{U_n}{S_n} \right)^2 P_k \quad (3.13)$$

Izraz za reaktanciju X je:

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (3.14)$$

Izraz za apsolutnu vrijednost poprečne grane $|\bar{Y}_0|$ dobiva se iz izraza za struju praznog hoda:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_n} = \frac{|\bar{Y}_0| \frac{U_n}{\sqrt{3}}}{\frac{S_n}{\sqrt{3}U_n}} = \frac{U_n^2}{S_n} Y_0 \quad (3.15)$$

$$|\bar{Y}_0| = \frac{S_n}{U_n^2} i_0 \quad (3.16)$$

Izraz za djelatnu komponentu poprečne grane G_0 dobiva se iz izraza za gubitke praznog hoda

$$P_0 = 3 \left(\frac{U_n}{\sqrt{3}} \right)^2 G_0 = U_n^2 G_0 \quad (3.17)$$

$$G_0 = \frac{P_0}{U_n^2} \quad (3.18)$$

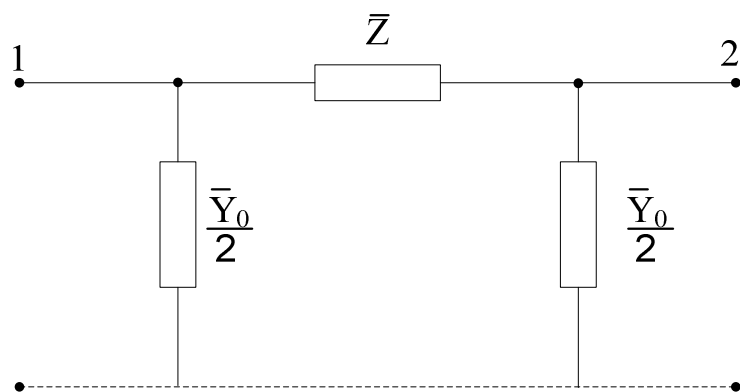
Izraz za susceptanciju B_0 je:

$$B_0 = \sqrt{Y_0^2 - G_0^2} \quad (3.19)$$

Parametri dobiveni za Γ -shemu nisu potpuno točni, iz razloga što je zanemarena poprečna grana kod izraza za reaktanciju (X), te zanemarena činjenica da se poprečna grana napaja preko dijela uzdužne grane (\bar{Z}_1) kod izraza za susceptanciju (B_0).

Rješavanjem jednačbi praznog hoda i kratkog spoja u koje se uvrštavaju precizne kompleksne veličine dobivene mjerenjem (na obje strane transformatora), dobiju se točni parametri kao i točne nadomjesne sheme energetskih transformatora. Precizna mjerenja se također približavaju T ili Γ -shemi, tako da učinjene zanemarenosti nemaju utjecaj na rezultate proračuna mreže. [9]

3.4. II-model transformatora

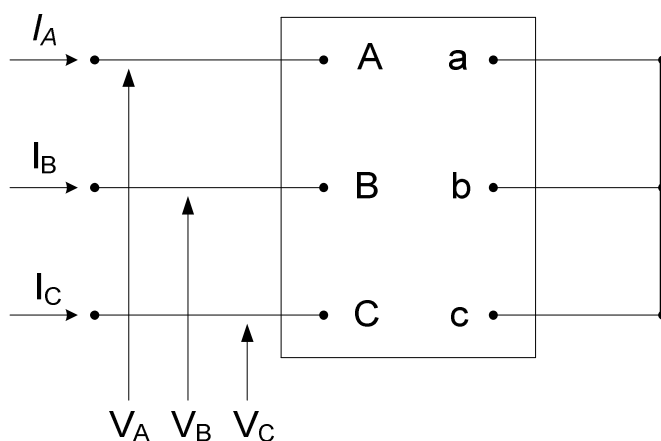


3.7. II-shema transformatora

Kod II-sheme transformatora poprečna grana podijeljena je na dvije poprečne grane. Ova shema koristi se samo za neke slučajeve i nije točnija od Γ -sheme transformatora.

3.5. Direktni (inverzni) sustav

Za određivanje ekvivalentne sheme potrebno je obaviti mjerenja. Mjere se struje i naponi u pokusu kratkog spoja, kako bi se odredila apsolutna vrijednost impedancije. Poprečnu granu zanemarujemo bez obzira je li poznata, tako da pokus praznog hoda nije potreban za ova mjerenja.



3.8. Pokus kratkog spoja dvonamotnog transformatora

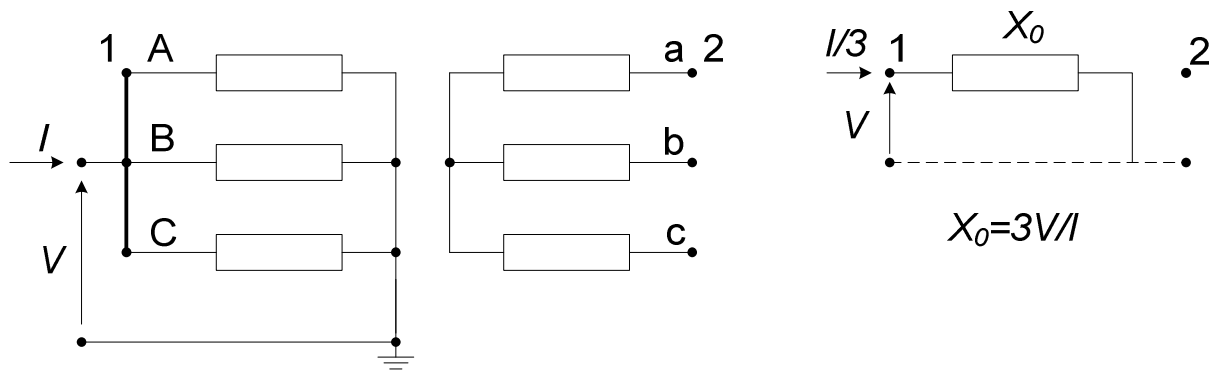
Bez obzira na grupu spoja provodi se pokus kratkog spoja transformatora prema slici 3.8. mjere se tri struje (I_A , I_B , I_C) kao i naponi (V_A , V_B , V_C) te računa njihova aritmetička srednja vrijednost. Slijedi izraz za reaktanciju direktnog sustava:

$$X \cong Z = \frac{V}{I} \quad (3.20)$$

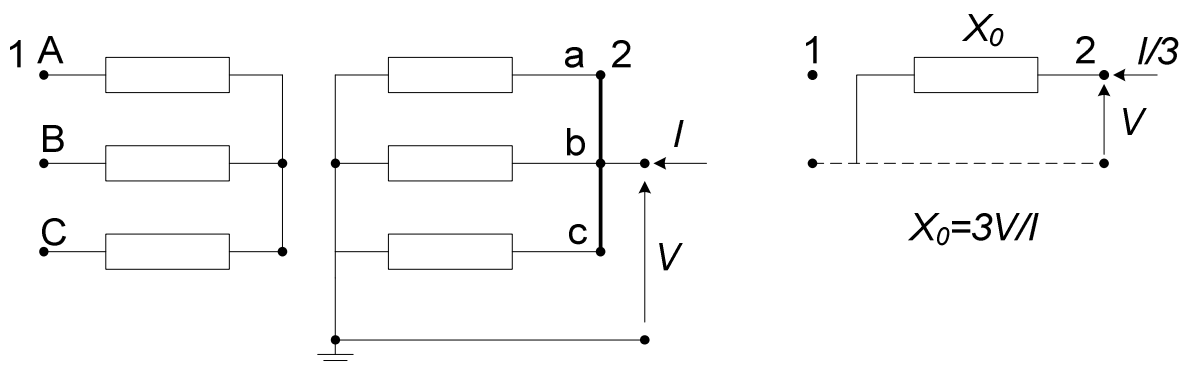
3.6. Nulti sustav

Mjerenje nulte reaktancije kod transformatora u spoju Yd nije potrebno, jer je nulta reaktancija jednaka direktnoj reaktanciji. Zvezidište transformatora obavezno moramo uzemljiti. [9]

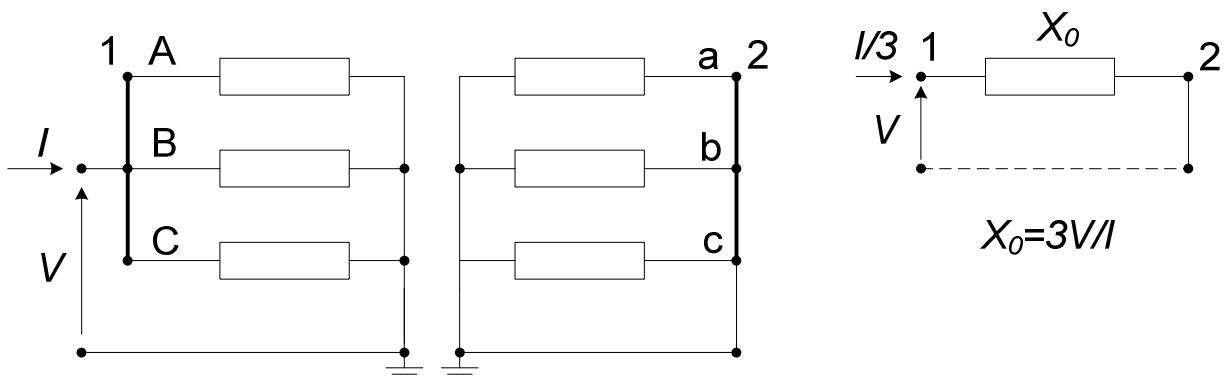
Na slijedećim primjerima (Sl. 3.9) prikazano je mjerenje transformatora u spoju Yy, kada je uzemljeno jedno ili oba zvezdišta. Struja koja se mjeri u ovim primjerima je trostruko veća od struje jedne faze.



a) uzemljeno zvjezdište višeg napona



b) uzemljeno zvjezdište nižeg napona



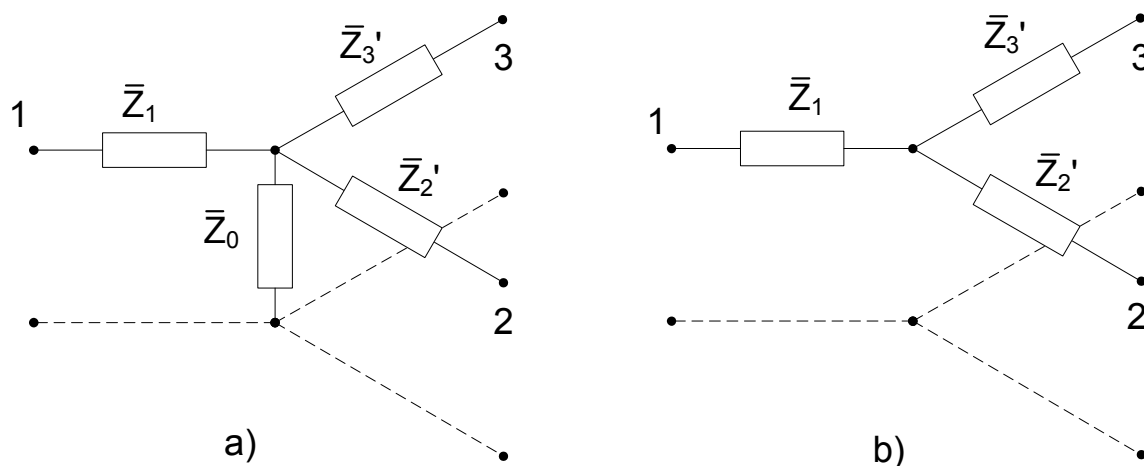
c) uzemljena oba zvjezdišta

3.9. Mjerenje nulte reaktancije energetskog transformatora zvijezda-zvijezda za razne slučajeve tretmana zvjezdišta (a,b,c)

4. TRONAMOTNI ENERGETSKI TRANSFORMATOR

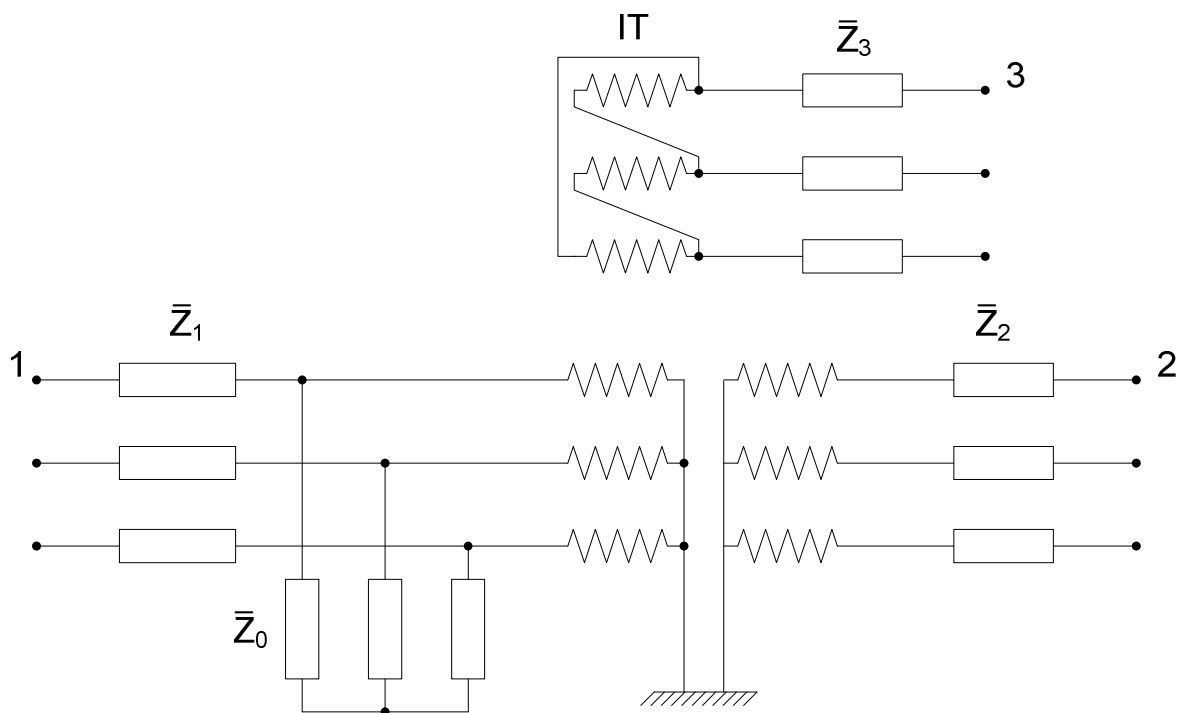
4.1. Parametri tronamotnog energetskog transformatora

Na slici 4.1a). prikazana je jednofazna shema tronamotnog energetskog transformatora gdje je izostavljen idealni transformator. Na slici 4.1b). izostavljen je idealni transformator i poprečna grana (zanemarena struja magnetiziranja i gubici u željezu).



4.1. Jednofazna nadomjesna shema tronamotnog energetskog transformatora

Na slici 4.2. prikazana je trofazna nadomjesna shema tronamotnog energetskog transformatora.



4.2. Trofazna nadomjesna shema tronamotnog energetskog transformatora

Preračunavanje parametara tronamotnog energetskog transformatora, vrši se na isti način kao i kod dvonamotnog energetskog transformatora. Prema sljedećim izrazima:

$$\bar{Z}_1'' = \bar{Z}_1 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \quad (4.1)$$

$$\bar{Z}_1''' = \bar{Z}_1 \left(\frac{U_3}{U_1} \right)^2 \quad (4.2)$$

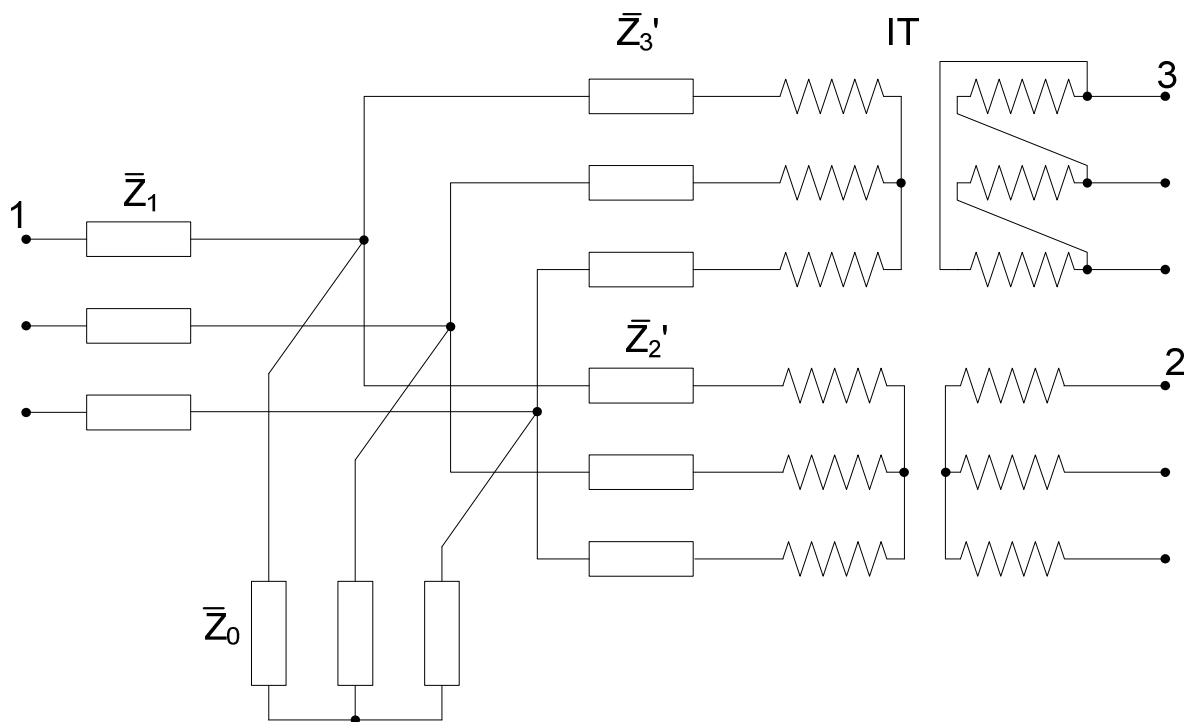
$$\bar{Z}_2' = \bar{Z}_2 \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 \quad (4.3)$$

$$\bar{Z}_2''' = \bar{Z}_2 \left(\frac{U_3}{U_2} \right)^2 \quad (4.4)$$

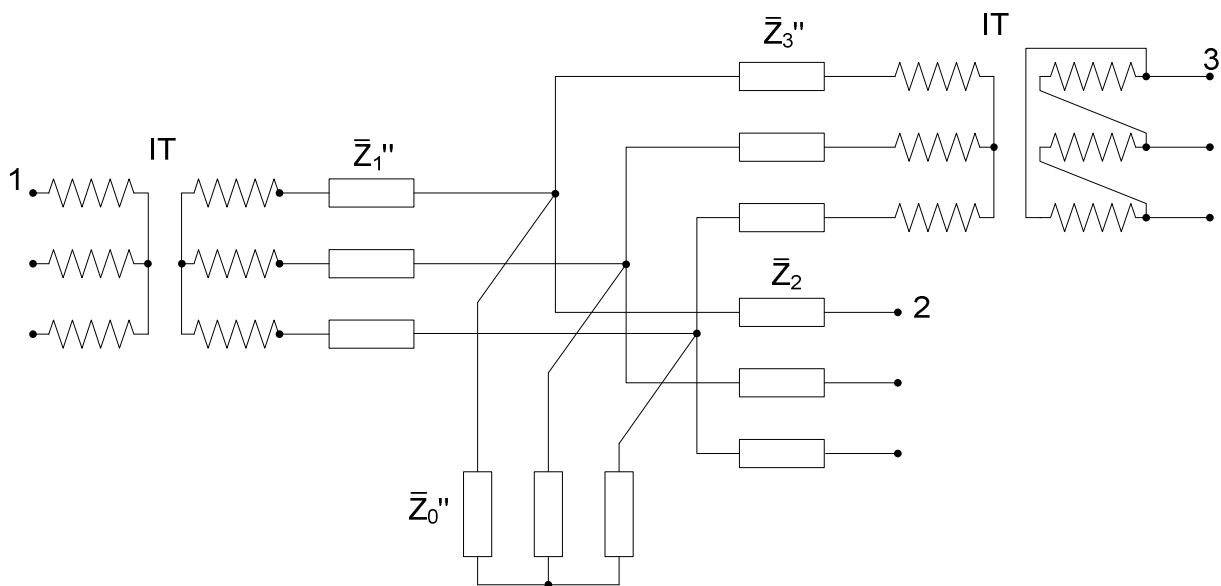
$$\bar{Z}_3' = \bar{Z}_3 \left(\frac{U_1}{U_3} \right)^2 \quad (4.5)$$

$$\bar{Z}_3'' = \bar{Z}_3 \left(\frac{U_2}{U_3} \right)^2 \quad (4.6)$$

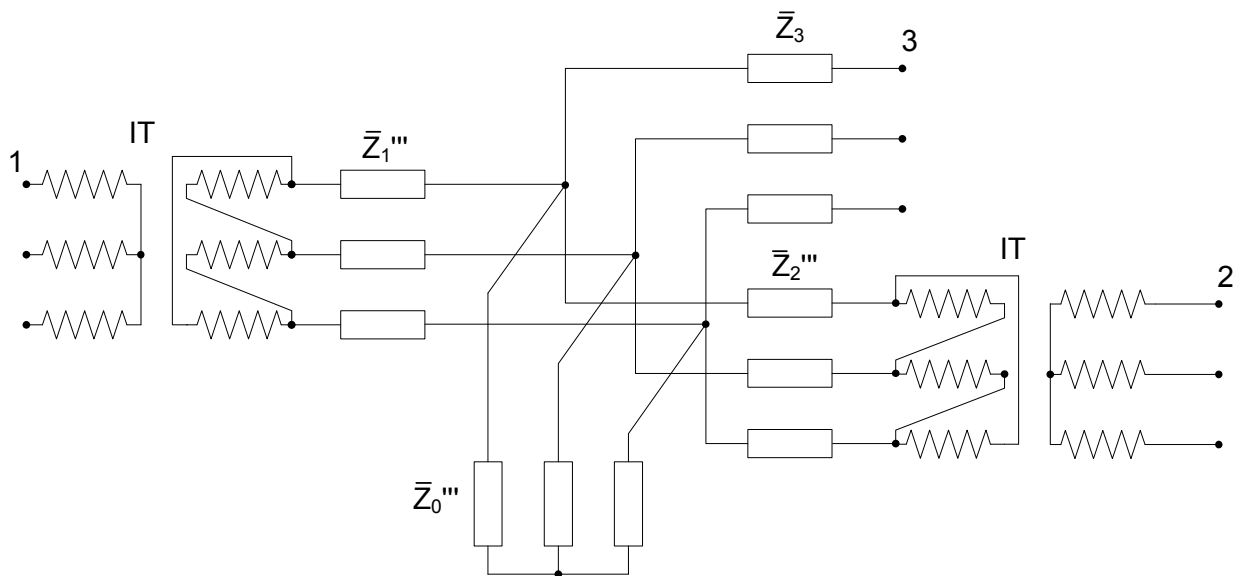
Ako sa slike 4.2. preračunamo sve parametre na jednu naponsku razinu, na slikama 4.3., 4.4. i 4.5. vidjet ćemo dobivene nadomjesne sheme.



4.3. Parametri tronamotnog energetskog transformatora preračunati na primarnu stranu



4.4. Parametri tronamotnog energetskog transformatora preračunati na sekundarnu stranu

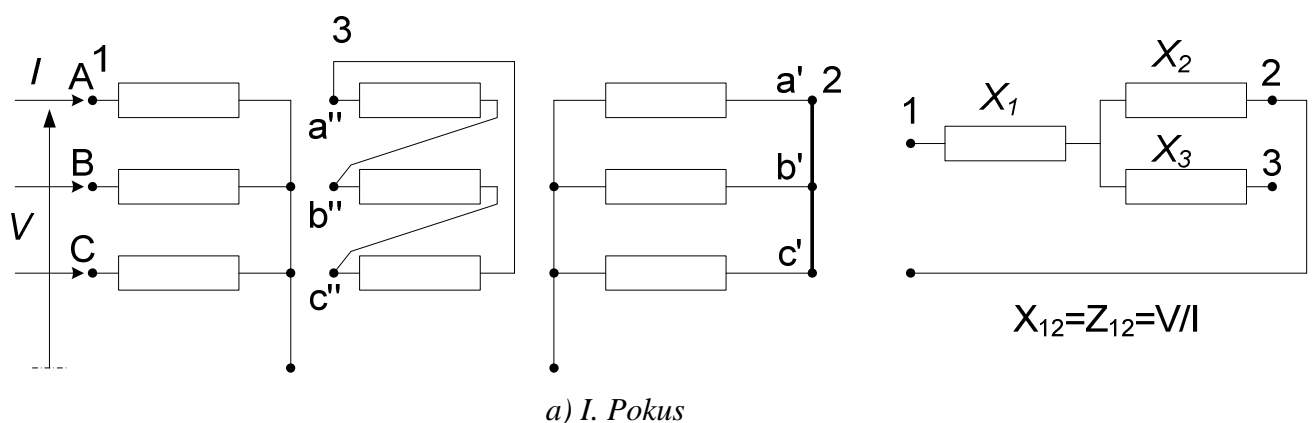


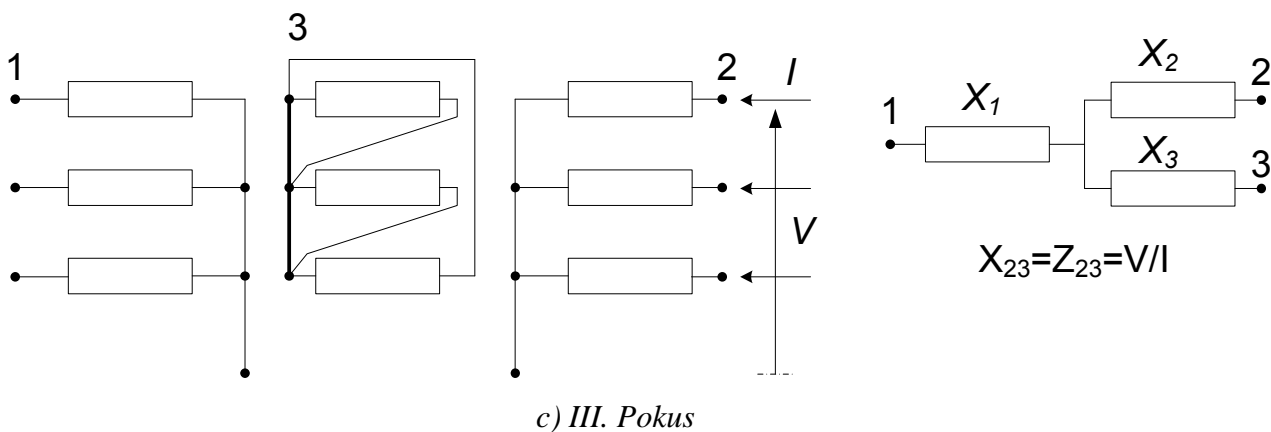
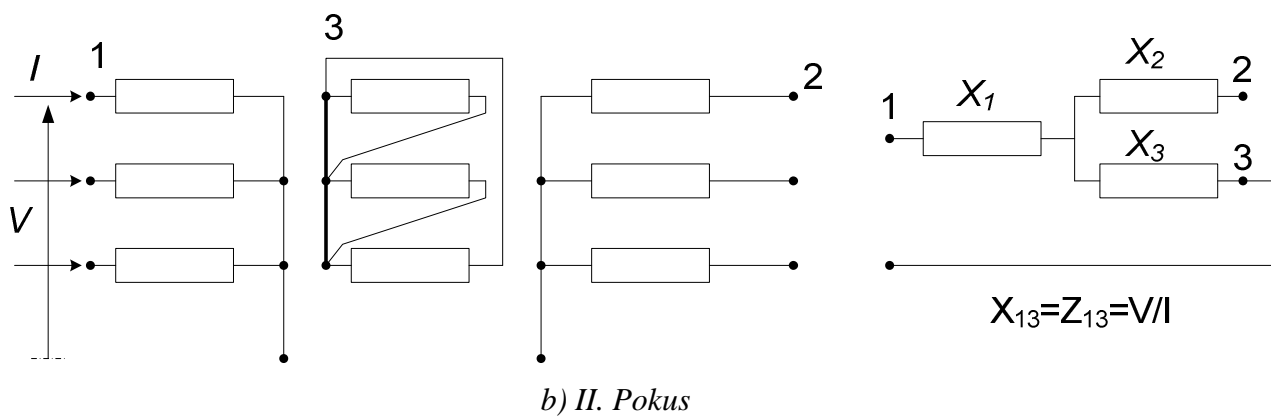
4.5. Parametri tronamotnog energetskog transformatora preračunati na tercijarnu stranu

4.2. Direktni (inverzni) sustav

Nadomjesna shema direktnog sustava tronamotnog energetskog transformatora ista je kao i shema za nulti sustav. Spoj koji se koristi je Y_{yd} . Ako u podacima nisu navedene veličine e_{k12} i e_{k23} nije moguće nacrtati nadomjesnu shemu.

Kako bi se dobili potrebni podaci potrebno je izvesti tri pokusa kratkog spoja. Zanemare se djelatni otpori i poprečne grane te se izvrše pokusi prema slici 4.6.





4.6. Mjerenje reaktancija direktnog sustava tronamotnog energetskog transformatora

Izrazi koji se dobiju ako se izmjerene reaktancije svedu na istu naponsku razinu jesu:

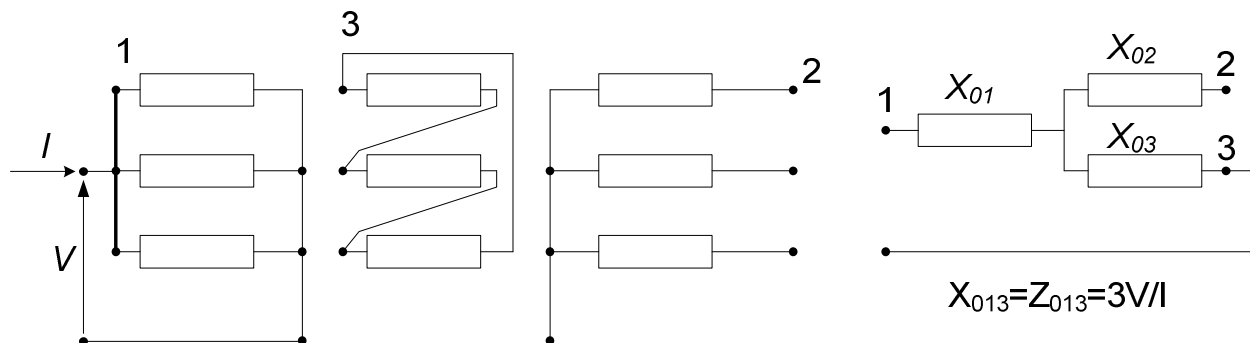
$$X_1 = \frac{1}{2} (X_{12} + X_{13} - X_{23}) \quad (4.7)$$

$$X_2 = \frac{1}{2} (X_{12} + X_{23} - X_{13}) \quad (4.8)$$

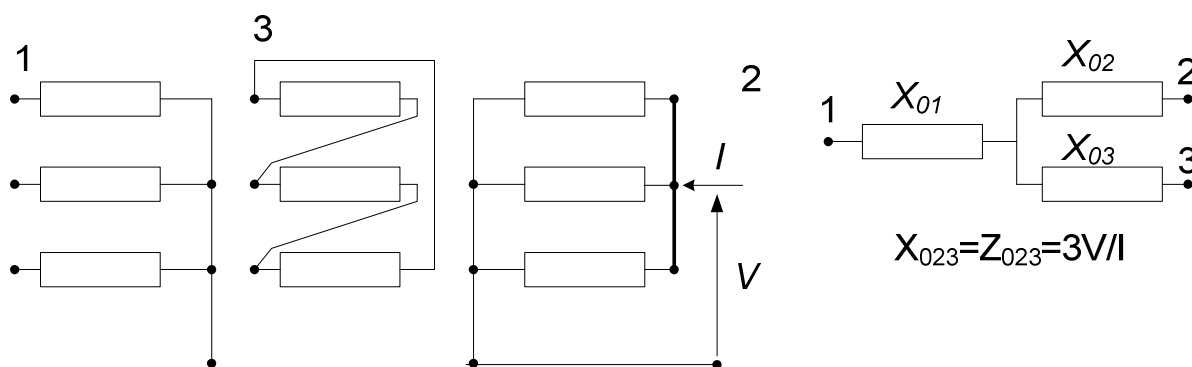
$$X_3 = \frac{1}{2} (X_{13} + X_{23} - X_{12}) \quad (4.9)$$

4.3. Nulti sustav

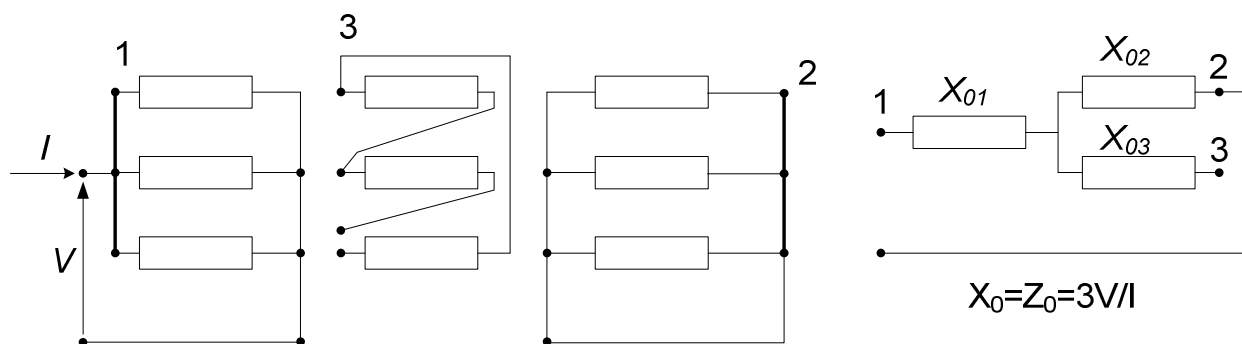
Kao i kod direktnog sustava, prikazana su tri pokusa (shematski i analitički) na slici 4.7.



a) I. Pokus



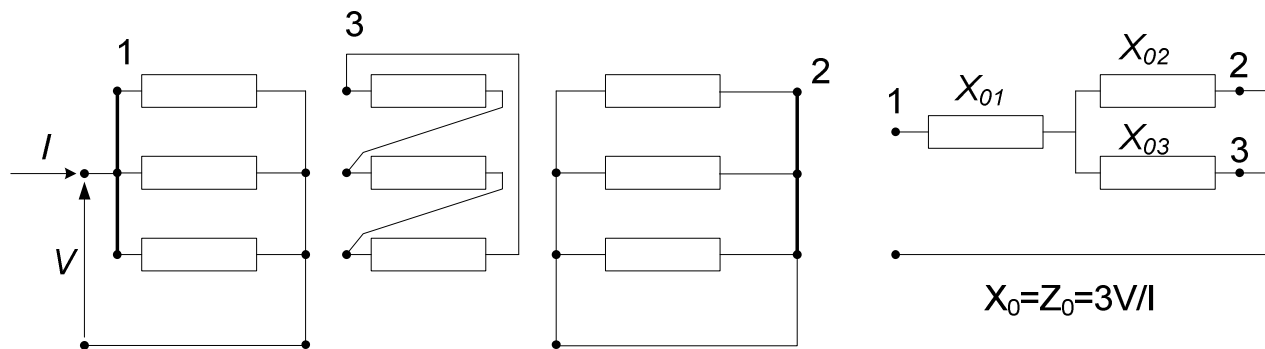
b) II. Pokus



c) III. Pokus (trokut otvoren)

4.7. Mjerenje reaktancija nultog sustava tronamotnog energetskog transformatora

Ako nije moguće ostvariti III. Pokus kao na slici 4.7c. (sa otvorenim trokutom), mora se zamijeniti pokusom kao na slici 4.8.



4.8. III. Pokus (zatvoreni trokut)

Izrazi za reaktancije:

$$X_{013} = X_{01} + X_{03} \quad (4.10)$$

$$X_{023} = X_{02} + X_{03} \quad (4.11)$$

$$X_{01} = X_{01} + \frac{X_{02}X_{03}}{X_{02} + X_{03}} \quad (4.12)$$

Zatim se iz ovih izraza dobije:

$$X_{01} = X_{013} - X_{03} \quad (4.13)$$

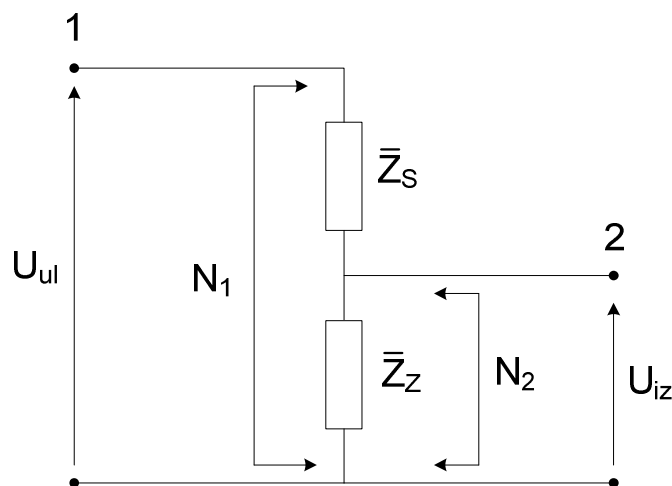
$$X_{02} = X_{023} - X_{03} \quad (4.14)$$

$$X_{03} = \sqrt{X_{023}(X_{013} + X_0)} \quad (4.15)$$

5. TRANSFORMATOR U ŠTEDNOM SPOJU

5.1. Parametri transformatora u štednom spoju

Transformator u štednom spoju još se naziva i autotransformator. Ovi transformatori imaju tercijarni namot, primjenjuju se u elektroenergetskim mrežama vrlo visokog napona (VVN) i elektroenergetskim mrežama visokog napona (VN).



5.1. Transformator u štednom spoju (shema impedancija)

Gdje je:

- \bar{Z}_S impedancija serijskog namota transformatora
- \bar{Z}_Z impedancija zajedničkog namota transformatora
- \bar{Z}_A impedancija autotransformatora

Odnosi između veličina (naponi, struje, broj zavoja):

$$\frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = \frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (5.1)$$

$$\frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (5.2)$$

Omjer ulaznog i izlaznog napona:

$$\frac{\bar{U}_{ul}}{\bar{U}_{iz}} = \frac{\bar{U}_1 + \bar{U}_2}{\bar{U}_1} = \frac{\frac{N_1}{N_2} \bar{U}_2 + \bar{U}_2}{\frac{N_1}{N_2} \bar{U}_2} = \frac{a + 1}{a} \quad (5.3)$$

Odnos struja:

$$\frac{\bar{I}_{ul}}{\bar{I}_{iz}} = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1 + \bar{I}_2} = \frac{\bar{I}_2}{\frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2 + \bar{I}_2} = \frac{a}{a + 1} \quad (5.4)$$

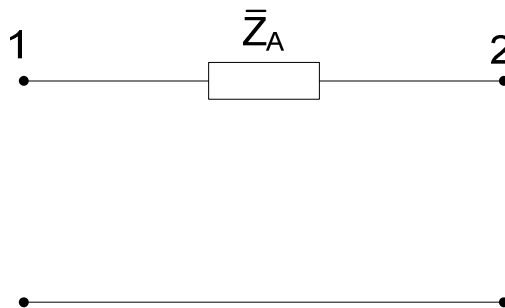
Kompleksne snage:

$$S_{iz} = \bar{U}_{iz} \bar{I}_{iz} \quad (5.5)$$

$$S_{ul} = \bar{U}_{ul} \bar{I}_{ul} = \left(\frac{a + 1}{a} \right) \bar{U}_{iz} \left(\frac{a}{a + 1} \right) \bar{I}_{iz} = \bar{U}_{iz} \bar{I}_{iz} \quad (5.6)$$

5.2. Direktni (inverzni) sustav

Nadomjesna shema direktnog (inverznog) sustava energetskog transformatora u štednom spoju s tercijarom, jednaka je kao shema za direktni sustav običnog tronamotnog energetskog transformatora.

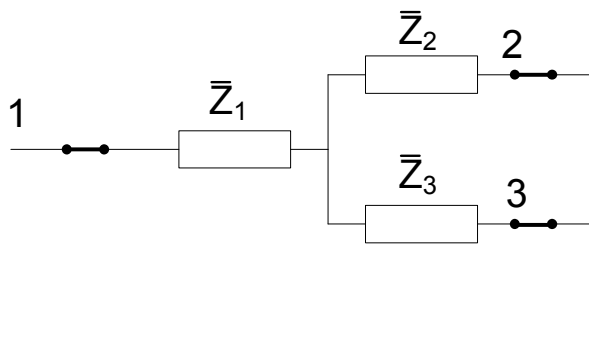


5.2. Nadomjesna shema autotransformatora s tercijarom

Izraz za impedanciju autotransformatora:

$$\bar{Z}_A = \bar{Z}_S + \left(\frac{N_1}{N_2} - 1\right)^2 \bar{Z}_Z \quad (5.7)$$

Na slici 5.3. prikazana je nadomjesna shema direktnog sustava energetskog transformatora u štednom spoju.

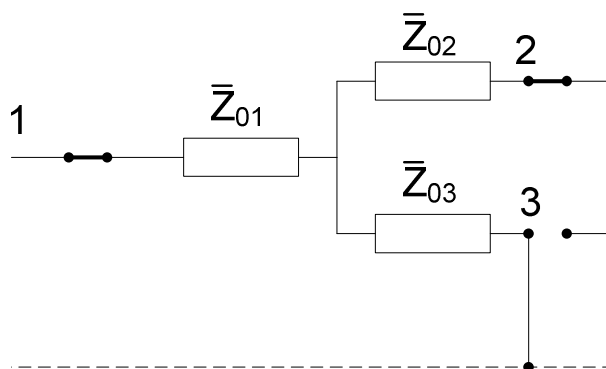


5.3. Nadomjesna shema direktnog sustava transformatora u štednom spoju s tercijarom

5.3. Nulti sustav

Nadomjesna shema nultog sustava energetskog transformatora dijeli se na dva modela:

- Slučaj kada je zvjezdište uzemljeno (shema je jednaka kao i kod tronamotnog energetskog transformatora).
- Slučaj kada je zvjezdište izolirano (složeni postupak proračuna ili mjerenja). Zbog složenosti se neće spominjati u radu.

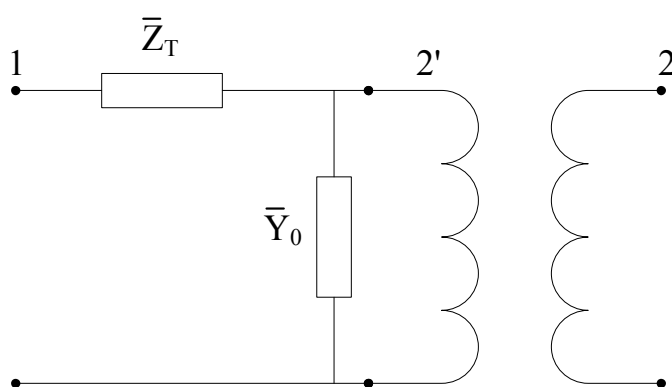


5.4. Nadomjesna shema nultog sustava transformatora u štednom spoju s tercijarom, zvjezdište neposredno uzemljeno

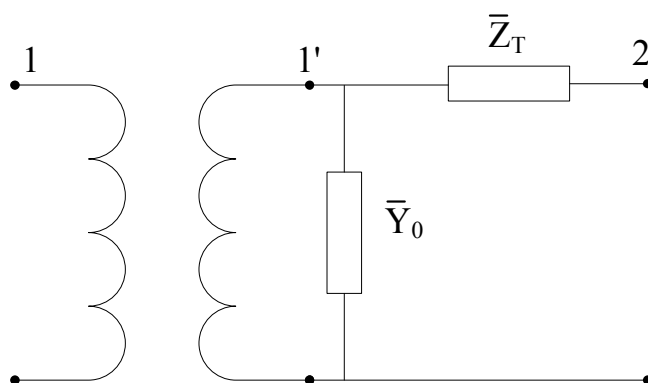
6. ANALIZA STRUJNO-NAPONSKIH PRILIKA

U ovom poglavlju izračunat će se parametri i analizirati strujno-naponske prilike jednog transformatora (trofazni dvonamotni energetski transformator) kojem su nazivni podaci sljedeći: Nazivna snaga 31,5 MVA, omjer napona primara i sekundara 110/10 KV, napon kratkog spoja je 10,5%, struja praznog hoda 2,7%, gubici u bakru 200 kW, gubici u željezu 86 kW. Snaga na sekundaru iznosi 20+j5 uz napon sekundara od 9,8 kV.

Prikaz Γ -modela transformatora za primarnu i sekundarnu stranu:

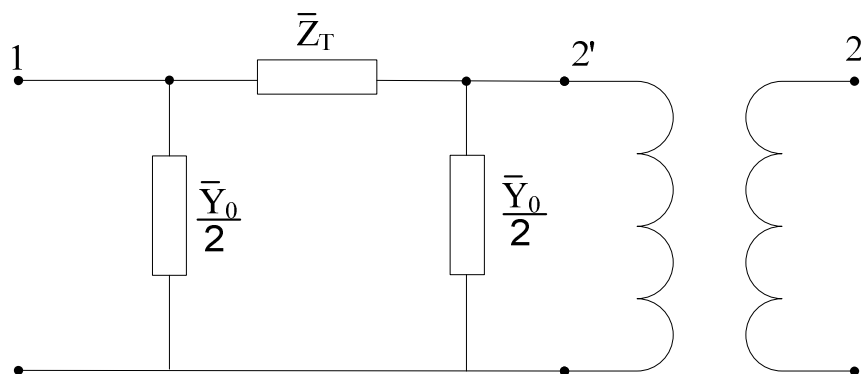


a) Γ - model transformatora kad prebacujemo na primarnu stranu

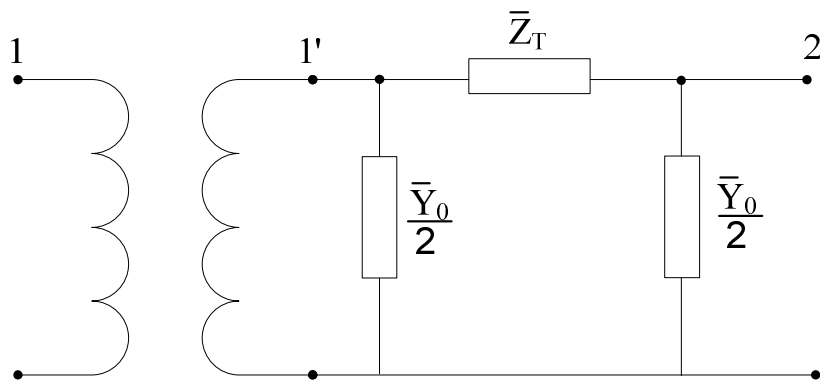


b) Γ -model transformatora kad prebacujemo na sekundarnu stranu

Prikaz Π -model transformatora za primarnu i sekundarnu stranu:

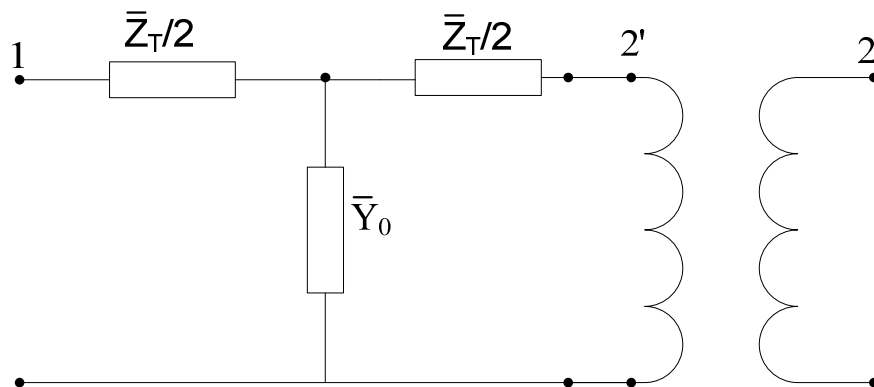


a) Π -model transformatora kad prebacujemo na primarnu stranu

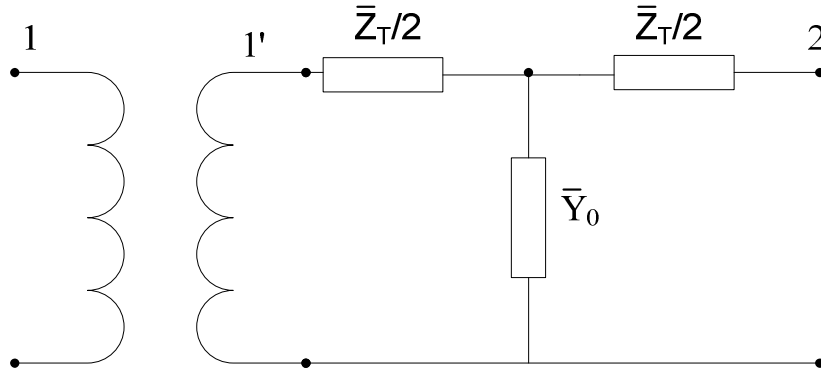


b) Π -model transformatora kad prebacujemo na sekundarnu stranu

Prikaz T-modela transformatora za primarnu i sekundarnu stranu:



a) T-model transformatora kad prebacujemo na primarnu stranu



b) T-model transformatora kad prebacujemo na sekundarnu stranu

Proračun preko Γ -modela transformatora:

Iznos impedancije \bar{Z}_T :

$$\bar{Z}_T = R_k + jX_k$$

$$U_B = 110 \text{ kV}$$

$$R_k = P_{Cu} \frac{U_B^2}{S_n^2} = 200 * 10^3 \frac{(110 * 10^3)^2}{(31,5 * 10^6)^2} = 2,43 \Omega$$

$$X_k = \frac{U_B^2}{S_n} \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{P_{Cu}}{S_n}\right)^2} = \frac{110^2}{31,5} \sqrt{0,105^2 - \frac{(200 * 10^3)^2}{(31,5 * 10^6)^2}} = 40,2595 \Omega$$

$$\bar{Z}_T = R_k + jX_k = 2,43 + j40,2595 \Omega = 40,3327 \angle 86,54^\circ \Omega$$

Iznos admitancije \bar{Y}_0 :

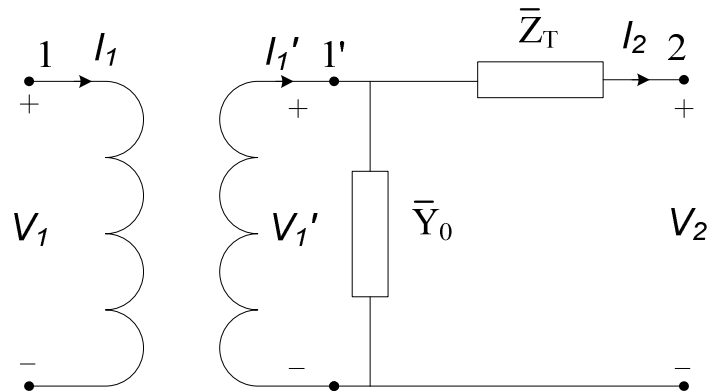
$$\bar{Y}_0 = G_0 + jB_0$$

$$G_0 = P_{Fe} \frac{1}{U_B^2} = \frac{0,086}{110^2} = 7,107 * 10^{-6} \text{ s}$$

$$B_0 = \frac{S_n}{U_B^2} \sqrt{i_0^2 - \left(\frac{P_{Fe}}{S_n}\right)^2} = \frac{31,5}{110^2} \sqrt{0,027^2 - \frac{(0,086)^2}{(31,5)^2}} = 6,993 * 10^{-5} \Omega$$

$$\bar{Y}_0 = G_0 + jB_0 = (7,107 - j69,93) * 10^{-6} s = 70,29 * 10^{-6} \angle 84,19^\circ s$$

Izračun primarnih parametara preko Γ -modela:



$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{S}_2^*}{\sqrt{3}} * \frac{1}{U_2^*} = \frac{20 - j5}{\sqrt{3} * 9,8 \angle 0^\circ} = 1,178 - j0,2946 kA = 1,21 \angle -14,04^\circ$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{T(10)} &= \bar{Z}_T \left(\frac{10}{110}\right)^2 = 40,3327 \angle 86,54^\circ \left(\frac{10}{110}\right)^2 = 0,02 - j0,332 \Omega \\ &= 0,333 \angle 86,54^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{0(10)} &= \bar{Y}_0 \left(\frac{110}{10}\right)^2 = 70,29 * 10^{-6} \angle 84,19^\circ \left(\frac{110}{10}\right)^2 = 0,00086 + j0,00846 \Omega \\ &= 8,505 * 10^{-3} \angle 84,19^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_1' &= \bar{V}_2 + \bar{Z}_T \bar{I}_2 = 5,658 + (0,02 - j0,332)(1,178 - j0,2946) \\ &= 5,778 + j0,383 kV = 5,79 \angle 3,79^\circ kV \end{aligned}$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}'_1 \frac{110}{10} = 5,79 \angle 3,76^\circ \frac{110}{10} = 63,69 \angle 3,79^\circ \text{ kV}$$

$$U_1 = \sqrt{3} \bar{V}_1 = \sqrt{3} * 63,69 \angle 3,76^\circ = 110,12 + j7,29 \text{ kV} = 110,36 \angle 3,79^\circ$$

$$\begin{aligned} \bar{I}'_1 &= \bar{I}_2 + \bar{V}'_1 \bar{Y}_0 = 1,178 - j0,2946 + (5,778 + j0,383)(0,00086 + j0,00846) \\ &= 1,179 - j0,246 = 1,204 \angle -11,78^\circ \text{ kA} \end{aligned}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}'_1 \frac{10}{110} = 0,109 \angle -11,78^\circ \text{ kA}$$

$$\bar{S}_1 = \sqrt{3} * U_1 * \bar{I}_1^* = \sqrt{3} * 110,36 \angle 3,79^\circ * 0,109 \angle 11,78^\circ = 20,84 \angle 15,57^\circ \text{ MVA}$$

7. ZAKLJUČAK

Energetski transformator je ključni element elektroenergetske mreže koji prilagođava naponsku razinu ostalim uređajima u mreži. Parametri transformatora važni su kako za sam transformator tako i za uređaje koji o njemu ovise, te se stoga koriste u proračunima mreže, generatora, rasklopnih postrojenja. Nadomjesni modeli transformatora i parametri koji iz njih proizlaze i prikazani su u ovom radu koriste se u praksi pri izračunima transformatora i ostalih komponenti mreže, zbog čega ih je iznimno važno poznavati. Važno je također prepoznati u kojim se mjernim režimima može određivati pojedini parametar i model, te koji se parametri mogu i smiju zanemariti bez narušavanja informacije za koju je pojedini tip nadomjesnog modela namijenjen.

8. LITERATURA

- [1] Transformator, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Transformator>
- [2] Maljković, Z.: „Transformatori“, FER
- [3] Dolenc, A.: „Transformatori I i II“ Udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, ETF-Zagreb, 1991.
- [4] Živić Đurović, M.: „Transformatori“, Predavanja, Tehnički fakultet Rijeka
- [5] Maljković, Z.: „Karakteristike i dinamički modeli transformatora“, FER
- [6] Goić, R.: „Distribucija električne energije“, interna skripta, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split
- [7] Transformatori, <https://element.hr/artikli/file/2457>
- [8] Šušnjić, L.: „Transformatori“, Tehnički fakultet Rijeka
- [9] Ožegović, M.: „Električne energetske mreže II“ FESB Split, 1997.

SAŽETAK

Energetski transformator je ključni element elektroenergetske mreže koji omogućava tehnološki i ekonomski povoljnu proizvodnju, prijenos, distribuciju i potrošnju električne energije. Transformator prilagođava naponsku razinu pojedinog odsjeka mreže na pasivan i pouzdan način. Energetski transformatori preko svog magnetskog jarma i namota prenose ogromne količine energije, odnosno kompletnu energiju na ugrađenom mjestu, te je nužno da pritom gubici budu minimalni. Transformatori su oduvijek uređaji s najvišom iskoristivošću prikladni za taj zadatak. U ovom radu obrađen je način utvrđivanja parametara za nadomjesne modele energetskih transformatora. Polazeći od osnovnih zakona koji vrijede kod transformatora, prikazane su jednostavne sheme i modeli koji se dobiju zanemarivanjem pojedinih utjecaja, do složenijih modela kakvi se danas koriste u praksi a sadržavaju prikladnu količinu podataka za proračune transformatora, mreže i okolnih uređaja koji o tim parametrima ovise. Napravljen je proračun parametara za jedan konkretni energetski transformator snage 31,5 MVA i napona 110/10 kV prema modelima ranije obrađenim u radu.

KLJUČNE RIJEČI

Nadomjesni model, Energetski transformator kao element mreže, dvonamotni energetski transformator, tronamotni energetski transformator, transformator u štednom spoju (autotransformator), idealni transformator, gubici.

ABSTRACT

Power transformer is a key element of the electricity network which allows for technological and cost-effective production, transmission, distribution and consumption of electricity. The transformer transforms the voltage level of network sections in a passive and reliable manner. Power transformer through its magnetic yoke and coils, transfers huge amounts of energy, namely complete power of the built-in section, and it is necessary that transformation losses are minimal. Transformers are up to today devices with the highest utilization suitable for this task. This paper elaborates the methods of determining the parameters of equivalent models of power transformers. Starting from the basic laws that apply to the transformer, simple schemes and models are shown that are obtained by neglecting certain influence, to more complex models which are currently used in practice and contain the appropriate amount of data for calculations of transformers, network and surrounding devices that depend on these parameters. The calculation is performed of parameters for one specific power transformer of 31.5 MVA output and 110/10 kV and the models are developed as previously shown in the papers.

KEYWORDS:

Equivalent model, Power transformer as part of network, Two-winding power transformer, Tree-winding power transformer, autotransformer, ideal transformer, losses