

UKLOPNA STRUJA TRANSFORMATORA

Živković, Dominik

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:913447>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSMAYERA U OSIJEKU

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Sveučilišni studij

UKLOPNA STRUJA TRANSFORMATORA

Završni rad

Dominik Živković

Osijek, 2021

SADRŽAJ

| | |
|---|-----------|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Zadatak završnog rada..... | 2 |
| 1.2. Pregled područja teme..... | 2 |
| 2. TRANSFORMATORI..... | 3 |
| 3. UKLOPNA STRUJA | 6 |
| 3.1. Transformatorska relejna zaštita i viši harmonici | 7 |
| 3.2. Matematički i grafički prikazi remanentnog magnetizma..... | 10 |
| 3.3. Aproksimacija uklopne struje..... | 12 |
| 4. UTJECAJ UKLOPNE STRUJE..... | 15 |
| 4.1. Analiza utjecaja uklopne struje na zaštitu transformatora..... | 16 |
| 4.2. Unutarnje putanje magnetiziranja | 18 |
| 5. METODE UBLAŽAVANJA DJELOVANJA STRUJE UKLOPA | 21 |
| 5.1. PWM (Pulse-Width Modulation, Pulsno širinska modulacija)..... | 21 |
| 5.2. Sekvencijalno uklapanje faza transformatora..... | 22 |
| 5.2.1. Proračun uklopne struje s neutralnim otpornikom | 23 |
| 6. SIMULACIJA UKLOPNE STRUJE TRANSFORMATORA | 25 |
| 6.1. Rezultat simulacije | 34 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 36 |
| 8. LITERATURA | 37 |
| SAŽETAK..... | 39 |
| ŽIVOTOPIS | 41 |

1. UVOD

Jedan od najraširenijih strojeva na planeti Zemlji koji nema pokretne dijelove je transformator. Zbog jednostavnosti pretvorbe energije i izvedbe, do sada nije stvoren stroj koji će ga zamijeniti. Poznavanjem prijelaznih pojava te kako se transformator ponaša u kratkom spoju i praznom hodu, stroj je moguće zaštititi od pregrijavanja namotaja, kratkih spojeva, prekomjerne uzbude itd. Uklapanje transformatora u mrežu dovodi do pojavljivanja prijelaznih pojava koje mogu uzrokovati nepravilan rad releja za zaštitu. Zaštita transformatora od kratkih spojeva prilikom uklopa transformatora pogrešno može protumačiti pojavu nadstruja tijekom prijelazne pojave uklopa sa kratkim spojem te nepotrebno isključiti transformator iz rada. Zbog toga se upotrebljavaju posebne zaštite (numeričke) koje analiziraju harmonički spektar struje transformatora te na osnovi njega prave razliku između prijelazne pojave uklopa i kratkog spoja. Naime, uklopna struja transformatora u harmoničkom spektru sadrži drugi i peti harmonik što je svojstveno za uklop, a ne za kratki spoj.

U ovom radu proučava se utjecaj uklopne struje na transformator te koje prijelazne pojave se pojavljuju prilikom uklopa transformatora u praznom hodu. Promatra se na koji način struja utječe na rad relejnih zaštita te kako ta struja ima oblik u ovisnosti o remanentnom magnetizmu.

1.1. Zadatak završnog rada

U završnom radu potrebno je opisati fenomen uklopnih struja transformatora zbog zaostalog magnetskog toka u jezgri transformatora. Također, valja izložiti i opisati odgovarajuće modele te uspostaviti vezu s fizikalnim veličinama koje imaju utjecaj na amplitudu, trajanje i valni oblik struje uklopa neopterećenih transformatora na električnu mrežu. Važno je analizirati utjecaj B-H karakteristike jezgre, utjecaj remanentnog magnetizma i trenutka uklopa na amplitudu struje uklopa i osvrnuti se na načine prepoznavanja nastanka pojave struje uklopa koji se koriste za sprječavanje pogrešnog djelovanja zaštitnih releja. Rezultate prema mogućnosti treba provjeriti analitičkim izrazima, simulacijama ili drugim metodama. Izlaganje je potrebno poduprijeti izračunima, grafičkim prikazima, shemama i prema mogućnosti mjerenjima.

1.2. Pregled područja teme

Fenomen uklopne struje vrlo je poznat pojam u elektroinženjstvu. Sve više se pažnje posvećuje toj prijelaznoj pojavi koja je katkada nepredvidiva, a može prouzrokovati pregršt nepravilnosti u radu elektroenergetskog sustava. Teorijsku podlogu i matematičke relacije o samom fenomenu pokriva knjiga „Transformatori“ profesora Branka Mitrovića [3]. U doktorskoj disertaciji Nicole Chiese „Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation“ [5] detaljno je objašnjen izračun struje uklopa, kao i njezin utjecaj na vanjsku mrežu. Bez postavljanja modela transformatora nije moguć ni jedan izračun. Takav model je detaljno prikazan u radu L. Wu, i suradnika pod nazivom „The Effect of Inrush Current on Transformer Protection“ [11]. U znanstvenim radovima profesora Željka Hederića sa suradnicima „Transformer Inrush Current Problems and Solutions“ [8] i „Measurement System for Transformer Inrush Current Higher Harmonics Determination“ [10], pojašnjeno je ponašanje, trajanje i načini smanjenja uklopne struje simulacijama i analizama. Dokazano je kako se uklopna struja manifestira pod zaostalim magnetskim tokom te kakav utjecaj ona ima u transformatorima različitih snaga. Zaštita transformatora je osnova kod projektiranja takvog stroja, stoga je važno napomenuti kako je u radu profesora Krešimira Bardača „Relejna zaštita transformatora“ [9] detaljno opisana zaštita svih mogućih prijetnji kao što su atmosferska pražnjenja, nadstruje, prenaponi itd.

2. TRANSFORMATORI

Transformatori se smatraju jedinim statičkim energetske strojevima koji jednu razinu napona transformiraju na drugu ili istu razinu napona. Napon narinut na primarnoj strani \underline{U}_1 izaziva proticanje struje \underline{I}_1 koja primarnim namotom teče i uzrokuje pojavu magnetskog toka Φ . Zbog magnetskog toka koji se pojavljuje u feromagnetskoj jezgri transformatora, na primarnoj strani se inducira napon E_1 koji održava ravnotežu narinutom naponu U_1 . Istovremeno, zbog promjene magnetskog toka na sekundarnoj strani se inducira napon E_2 . Struja I_2 ne teče, odnosno njezin iznos je nula ($I_2=0$) ako su stezaljke sekundarnog namota otvorene (Slika 2.1.) Zbog toga je napon na sekundarnoj strani jednak E_2 ($U_2=E_2$). Stanje transformatora bez opterećenja (s otvorenim stezaljkama sekundara) naziva se prazni hod. S druge strane, ako postoji trošilo kojim se opterećuje transformator (Slika 2.2.) na sekundarnoj strani proteče struja I_2 trošilom i sekundarnim namotom. Struja I_2 teče skundarom te stvara novo protjecanje [1]:

$$\theta_2 = I_2 N_2. \quad (2-1)$$

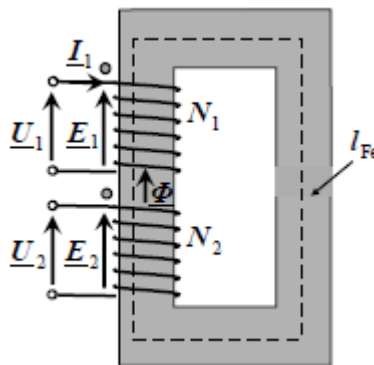
Ukupno protjecanje u magnetskom krugu:

$$\theta = \theta_1 N_1 - \theta_2 N_2. \quad (2-2)$$

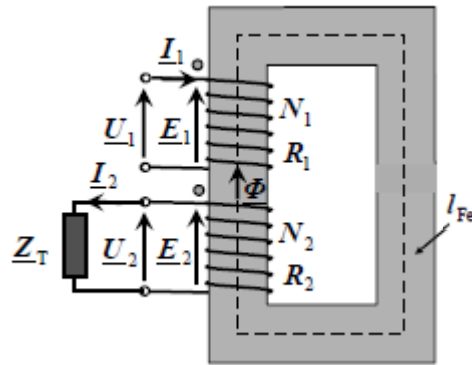
Impedancija trošila:

$$Z_T = R_T \pm jX_T, \quad (2-3)$$

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_T}. \quad (2-4)$$

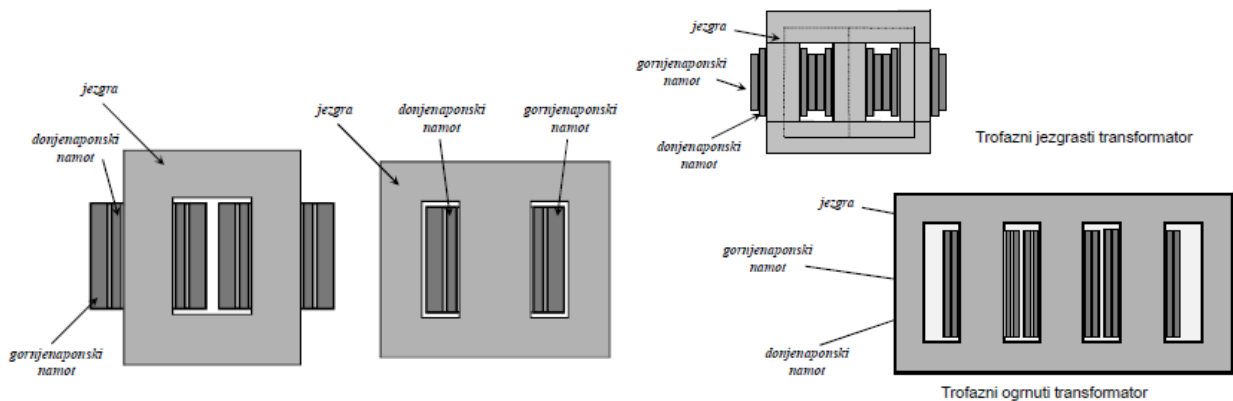


Slika 2.1. Transformator bez opterećenja [1].



Slika 2.2. Transformator s opterećenjem Z_T [1].

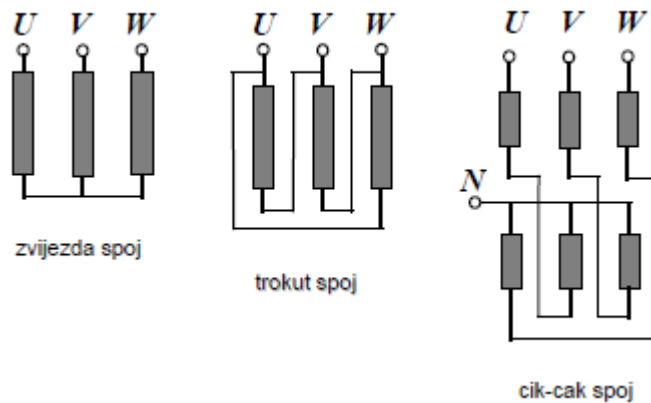
Izvedbe transformatora se međusobno razlikuju, ali imaju tri iste fizičke glavne komponente: primarni i sekundarni namot te jezgru. Svaki transformator je projektiran za rad u fizičkom svijetu kako bi zadovoljio karakteristike koje se traže, bilo u elektroenergetskom sustavu ili kod nekih manjih aparata. Zbog masovne upotrebe transformatora u svakoj grani energetike i dijelom elektronike razvili su se i različiti tipovi jezgara za jednofazne i trofazne transformatore. Na slici 2.3. naznačeni su osnovni tipovi izvedbe jezgara [1].



Slika 2.3. Osnovne izvedbe jednofaznog i trofaznog transformatora [1].

Namoti na jezgrama se mogu omotati oko središnjeg stupa (ognuto) ili zasebno na obodnim stupovima (jezgrasto). Namoti se mogu razlikovati po oblicima, broju faza i različitim presjecima. Trofazni energetske transformatori su najčešće izvedbe višefaznih transformatora te se oni razlikuju u načinu spajanja. Osnovni spojevi namota energetskih trofaznih transformatora

su spoj u trokut (*delta* ili D), zvijezdu (*wye* ili Y) i cik-cak (spoj u dvostruku zvijezdu (Z)) kao što je naznačeno na slici 2.4. [1].



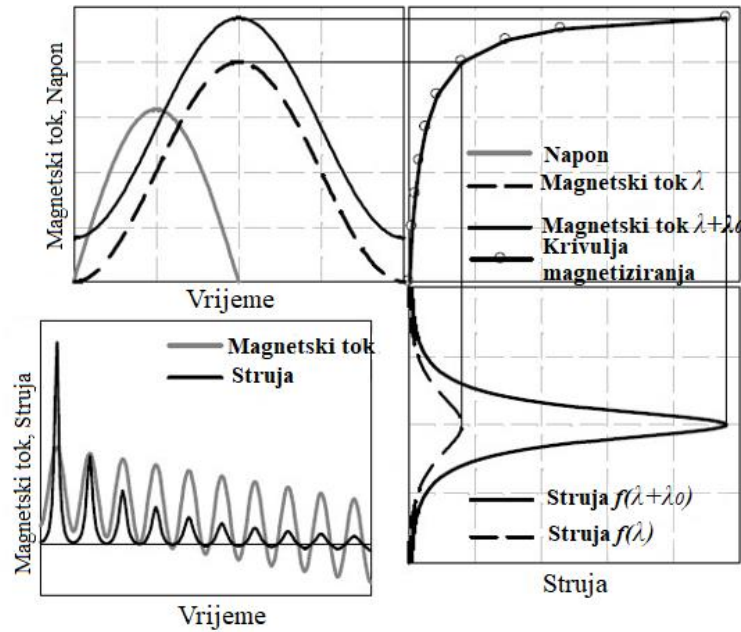
Slika 2.4. Spojevi trofaznog transformatora [1].

Postoje različiti spojevi namota transformatora zbog prilagodbe određenim vrstama opterećenja i ekonomski prihvatljivijih razloga. Osnovna razlika je u vrijednostima faznih i linijskih struja i faznih i linijskih napona. Namot koji je spojen u trokut ima $\sqrt{3}$ puta veći fazni napon od onoga spojenog u zvijezdu gdje je fazni napon jednak linijskom $U_f = U_l$. Također, ima $\sqrt{3}$ puta više zavoja i $\sqrt{3}$ puta manji presjek vodiča koji čine namot [1]. Prednost cik-cak spoja je da lakše podnosi nesimetrična opterećenja uz 100% podnošenja opterećenja po fazi. Izradom transformatora veće snage za cik-cak spoj potrebno je utrošiti 15,5% više zavoja te je time utrošak bakra veći. Zato se takav spoj najviše koristi u transformatorima nazivne snage do 160 kVA [2].

3. UKLOPNA STRUJA

Priključivanjem bilo kojeg stroja na mrežu promjena stanja se ne može dogoditi trenutno, već je potrebno neko vrijeme da se tražena promjena dogodi. Kao što je električnom motoru potrebno vrijeme da se zaleti, tako je i transformatoru potrebno određeno vrijeme za traženi rad. U intervalu trenutka uključivanja pa sve do željenog radnog stanja najčešće je potrebno nekoliko perioda izmjenične struje. Za vrijeme trajanja tih perioda u stroju se događaju razne prijelazne pojave. Stoga se barem najjednostavnijim pokusima kratkog spoja i praznog hoda proučavaju prijelazne pojave koje će se dogoditi te pojave koje dolaze s njima, kako bismo mogli predvidjeti ponašanje transformatora. Transformator prilikom uključivanja na mrežu može imati dva stanja. Prvo je stanje kada uključujemo transformator u trenutku $t=0$ pa je ukupni magnetski tok $\Phi=0$. Također, postoji slučaj kada je transformator već bio uključivan te se u njemu pojavljuje remanentni magnetizam koji remeti ukupni magnetski pa on više nije nula, nego ima iznos $\pm \Phi_{rem}$ [3]. Ako upravljanje uklopom nije kontrolirano, pojavom remanentnog magnetizma i uključivanjem transformatora na napajanje u prijelaznoj pojavi nastaje velika nesimetrija tokova u željeznoj jezgri. Nesimetrija uzrokuje velika izobličenja valnog oblika struje magnetiziranja te udarne struje koje mogu izazvati mehanička oštećenja. Pogrešan rad zaštita i releja može se manifestirati kao nepravilno uklapanje transformatora i zanemarivanje praćenja pojava udarnih struja uklopa koje mogu dostići vrijednost 90 % struje kratkog spoja. Regulacijom trenutka uklopa transformatora mogu se izbjeći navedeni problemi oštećivanja osjetljivih mjesta na trošilima i smanjenja kvalitete električne energije u mreži. Određivanjem trenutka uklopa ovisno trenutnom naponu, njegove faze i remanentnog magnetizma moguće je spriječiti struju uklopa [4].

Glavni uzrok pojave uklopne struje jest zasićenje magnetske jezgre što je posljedica nagle promjene napona u sustavu koji mogu nastati izvan-faznom sinkronizacijom generatora, vanjskim kvarovima i popravkom istih na samom transformatoru. Prilikom napajanja transformatora u najgorim slučajevima, uklopna struja i magnetski tok u jezgri mogu dostići dva do tri puta veću vrijednost od nazivnih vrijednosti kako teorija nalaže. Slika 3.1. prikazuje kako struja ovisi o toku. Krivulja zasićenja za dva magnetska toka koji su na slici prikazani kao λ i $\lambda+\lambda_0$. λ je nazivni magnetski tok, dok je λ_0 iznos magnetskog toka sa remanentnim magnetizmom. Promjena u zasićenju magnetske jezgre odnosno razini magnetizma u jezgri ima velik utjecaj na struju zbog različitih vršnih vrijednosti, Struja prati tu promjenu te dolazi do skoka struje između dvije različite vrste tokova [5].



Slika 3.1. Kvalitativni prikaz uklopne struje i učinak zaostalog magnetizma [5].

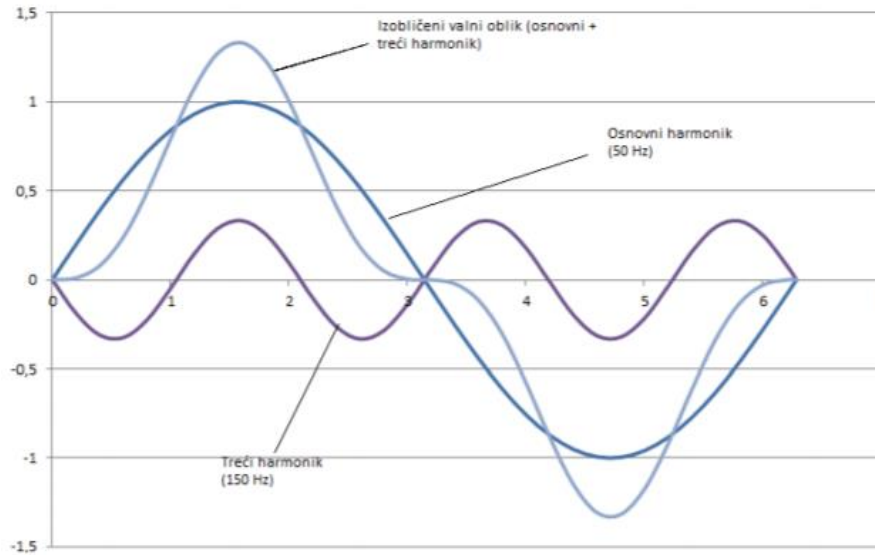
Ne postoji direktna veza koja uključivanjem transformatora dovodi do trenutne smetnje zbog pojave uklopne struje. Kvarovi na izolaciji su usko povezani pojavom viših harmonika u energetske transformatorima koji nisu opterećeni na sekundarnoj strani. Te pojave imaju opasan utjecaj na mrežu i kvalitetu električne energije [5].

3.1. Transformatorska relejna zaštita i viši harmonici

Releji su uređaji koji štite sve elemente elektroenergetskog sustava kao što su transformatori, vodovi, generatori i sl. od svih vrsta kvarova. Neki od kvarova nastaju zbog starenja, atmosferskih pražnjenja, vandalizma, opadanje grana sa stabala i dr. Ipak, najčešća pojava kvarova je prolaznog karaktera kao što su jednopolni kratkotrajni kratki spojevi u prijenosnoj i distribucijskoj mreži. Takvi uređaji nemaju funkciju potpunog gašenja elektroenergetskog sustava, već selektiraju određeno mjesto kvara i isključuju određeni element koji je u kvaru. Koordinacijom relejne zaštite postiže se maksimalna sigurnost elemenata u elektroenergetskom sustavu [6].

Struja uklopa može izazvati krivo djelovanje rada relejne zaštite zbog toga što ona ima veliku udarnu vrijednost. Stoga je važno projektirati relejnu zaštitu koja će biti neosjetljiva na utjecaj iste.

Kada u strujnom krugu nema reaktivnih komponenti, valni oblici napona i struje su sinusnog oblika (nulti harmonik napona i struje). Međutim, uvođenjem drugih reaktivnih i nelinearnih elemenata u mrežu, odnosno u krug, dolazi do promjene sinusnog oblika napona i struje. Takva izobličenja mogu se manifestirati kao višekratnici nultog harmonika, a oni se nazivaju višim harmonicima što prikazuje slika 3.2 [7].



Slika 3.2. Prikaz osnovnog i trećeg harmonika [7].

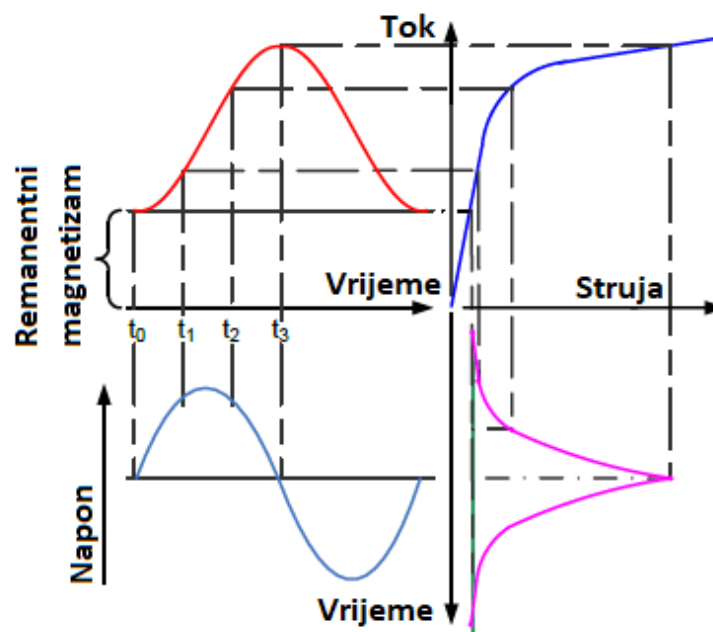
Kod uklopne struje najdominantniji harmonik (osim prvog harmonika) je drugi harmonik zbog njegove izražene istosmjernje komponente. Postoje slučajevi gdje drugi harmonik može opasti na 20% nultog harmonika. Kako bi se pri radu transformatora postigla potrebna zaštita i sigurnost, posebna se pažnja usmjerava na drugi i peti harmonik jer se zaštitni releji postavljaju na vrijednosti tih harmonika [8].

Drugi harmonik ovisi o magnetskoj karakteristici jezgre i o stupnju zasićenja jezgre. U normalnom radu transformatora ne pojavljuju se parni harmonici, već samo neparni. Međutim nesimetričnim zasićenjem jezgre odnosno transformator je zasićen prijelaznom komponentom struje kvara pojaviti će se parni harmonik kao rezultat toga. Projektiranjem novih i modernijih transformatora, odnosno korištenjem novih materijala i različitim izvedbom, karakteristika se može prilagoditi tako da se drugi harmonik očituje u puno manjem intenzitetu [9].

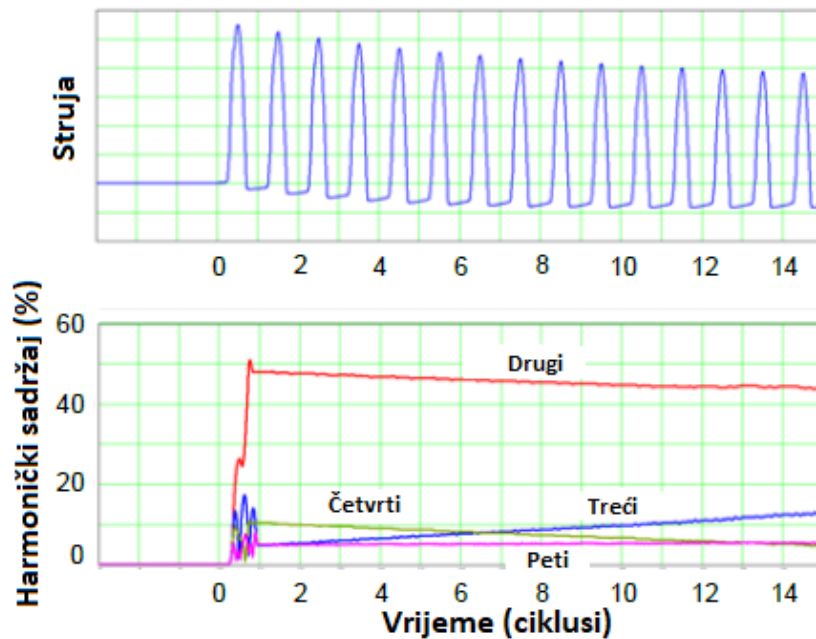
Važno je napomenuti kako viši harmonici ne znače pojavu uklopne struje. Naime, relej može „lažno“ djelovati zbog petog harmonika koji nastaje prekomjernom uzbuđenjem jezgre. Releji mora u prvom ciklusu prepoznati radi li se o uklopnoj struji ili o greški nekog drugog izvora. Također,

poznavanjem amplituda uklopnih struja i pojavom viših harmonika na distribucijskim i prijenosnim transformatorima zaštitni releji se mogu projektirati za točnije i sigurnije trenutke djelovanja samih releja ovisno o tome radi li se o uklopnoj struji, prekomjernoj uzbuđi jezgre ili o nekim unutarnje ili vanjskim greškama [8].

Unipolarni oblik struje napajanja sa slike 3.3. očekivano je bogat harmonicima. Struja napajanja sa slike 3.4. rastavljena je na harmonike. Prilikom uklapanja trofaznog transformatora drugi harmonik je najutjecajniji, a treći, četvrti i peti harmonik su također prisutni [16].



Slika 3.3. Odnosi napona magnetiziranja, magnetskog toka jezgre i struje magnetiziranja [16].



Slika 3.4. Struja faze transformatora (gore). Prikaz harmonika faze u periodu izraženi u postotcima (dolje) [16].

3.2. Matematički i grafički prikazi remanentnog magnetizma

Kada je transformator u praznom hodu, odnosno kada je u ustaljenom stanju praznog hoda, struja praznog hoda je gotovo jednaka struji magnetiziranja kada transformator pravilno funkcionira.

Naime, za vrijeme trajanja prijelazne pojave od trenutka uključivanja transformatora u praznom hodu do njegovog ustaljenog stanja, struja magnetiziranja naglo poraste u kratkom periodu te prelazi nominalnu vrijednost struje magnetiziranja [8]. Sl. 3.5. prikazuje jednofazni transformator koji ima primarni namot sa N' namotaja, induktivnost L_l i omski otpor R' , a stezaljke sekundarnog namota su slobodne. Transformator je tada neopterećen. Trenutni napon ovisan o faznom kutu ρ u trenutku uključivanja u mrežu glasi [3]:

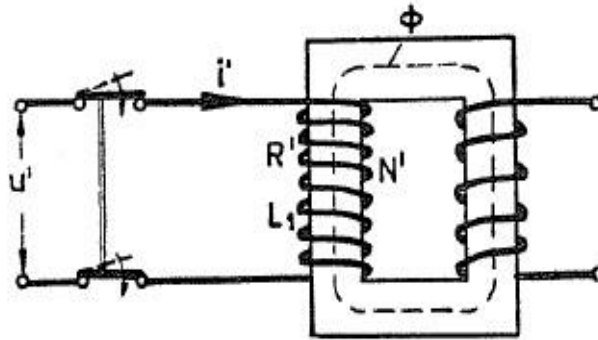
$$u' = U_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (3-1)$$

Trenutnim vrijednostima izražava se ravnoteža električnih sila koja mora postojati u svakom trenutku prilikom uključivanja transformatora [3]:

$$u' = R'i + N' \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3-2)$$

Jednadžba (3-2) nije linearna pa se stoga pretpostavlja da postoji linearna zavisnost između magnetskog toka i primarne struje [3]:

$$i = \frac{N'\Phi}{L_1} \quad (3-3)$$



Slika 3.5. Prikaz jednofaznog transformatora [3].

Izjednačavanjem gore spomenutih jednadžbi, dobiva se [3]:

$$\frac{d\Phi}{dt} + \frac{R'}{L_1} \Phi = \frac{u'}{N'} = \frac{U_m}{N'} \sin(\omega t + \varphi). \quad (3-4)$$

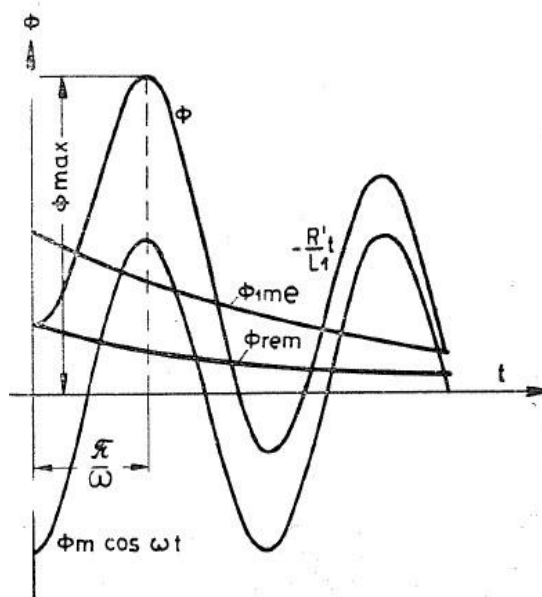
Ovo je nehomogena diferencijalna jednadžba prvog reda. Rješavanjem jednadžbe i usporedbom sa jednadžbom (3-4) ukupni magnetski tok bit će rastavljen na dvije komponente.

Komponenta Φ_1 je funkcija vremena koja kazuje da je to dio magnetskog toka u ustaljenog stanja, dok je komponenta Φ_2 eksponencijalna funkcija koja opisuje prijelaznu pojavu od trenutka uključenja pa sve do ustaljenog stanja što prikazuje jednadžba [3]:

$$\Phi = \int \frac{u'}{N'} dt + Ke^{-\frac{R't}{L_1}} = \Phi_1 + \Phi_2. \quad (3-5)$$

U slučaju da u jezgri transformatora ne postoji neki zaostali magnetizam, odnosno kada transformator prethodno nije bio priključen na mrežu ($\Phi=0$). S druge strane, ako je transformator bio već u nekom zadanom pogonu, u njemu će se zadržati zaostali (remanentni) magnetizam. Za oba slučaja vrijedi jednadžba [3]:

$$\Phi = \Phi_{1m} [\cos\varphi \cdot e^{-\frac{R't}{L_1}} - \cos(\omega t + \varphi)] \pm \Phi_{rem} \cdot e^{-\frac{R't}{L_1}}. \quad (3-6)$$



Slika 3.6. Prikaz utjecaja remanentnog magnetizma na ukupni magnetski tok [3].

Iz slike 3.6. jasno je vidljivo kako je najpogodniji uvjet uključenja transformatora u trenutku kada je $\varphi = \frac{\pi}{2}$ jer je tada remanentni magnetizam jednak nuli [3]:

$$\Phi = \Phi_{1m} \sin \omega t. \quad (3-7)$$

Najnepogodniji uvjet je kada postoji remanentni magnetizam, odnosno kada je $\varphi = 0$, što je vidljivo iz jednadžbe (3-6) [3]:

$$\Phi = \Phi_{1m} [e^{\frac{R't}{L_1}} - \cos(\omega t)] \pm \Phi_{rem} \cdot e^{\frac{R't}{L_1}}. \quad (3-8)$$

3.3. Aproximacija uklopne struje

Uklopna struja jednofaznog transformatora dogodi se u trenutku za koji je teško načiniti siguran i precizan model. Razlog tomu je sama priroda uklopne koja nije linearna pa je stoga teško napraviti sustav koji će uzeti u obzir njen eksponencijalni pad uz ovisnost remanentnog magnetizma i promjene napona u sustavu. Standardni izrazi omogućuju analizu uklopne struje transformatora, a oni su proizašli iz teorije i izračuna vršne vrijednosti i brzine opadanja jednofaznog transformatora. Proračuni za trofazni transformator mogu se analitički usporediti sa izračunima dobivenim za jednofazni transformator uz faktor empirijskog skaliranja. Faktor će ovisiti o broju faza, izvedenosti jezgre i satnom broju [5].

Vršna vrijednost uklopne struje, kao i vrijeme opadanja uklopne struje računa se analitičkim formulama koje se formuliraju teorijom jednofaznog transformatora. Za rješavanje istih parametara u trofaznom transformatoru ne mogu se koristiti jednake formule kao za jednofazni transformator. Prema sustavnom opadanju uklopne struje Bertagnolli je osmislio jednostavnu formulu za brzo i efikasno računanje [5]:

$$\hat{i}(n) = \frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{R_W^2 + \omega^2 L_{air-core}^2}} \left(\frac{2 \cdot B_N + B_R - B_S}{B_N} \right) e^{-\frac{tn}{\tau}}, \quad (3-9)$$

$$\tau = \frac{2 \cdot L_{air-core}}{R_W}, \quad (3-10)$$

Naime, Specht predlaže precizniju formulu koja uzima u obzir opadanje istosmjerne komponente toka (B_R) kada dolazi do zasićenja [5]:

$$i(n) = \frac{\sqrt{2} U}{\omega L_{air-core}} \left(1 - \frac{2 \cdot B_S + B_N - B_R^{\sim}(n)}{B_N} \right), \quad (3-11)$$

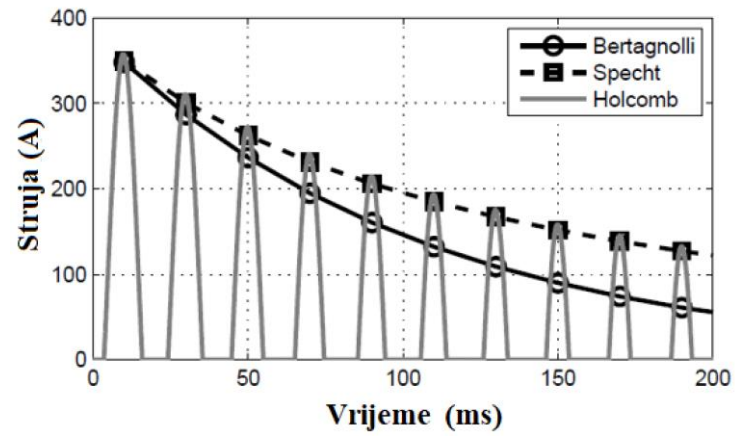
$$B_R^{\sim}(n) = B_R^{\sim}(n-1) - B_N \cdot \frac{R_W}{\omega L_{air-core}} \cdot 2(\sin\theta - \cos\theta). \quad (3-12)$$

Prethodne jednadžbe 3-9 i 3-11 ne opisuju stvarni valni oblik uklopne struje, zato Holcomb predlaže poboljšanu analitičku jednadžbu (3-13) kojom je moguće aproksimativno odrediti oblik uklopne struje. Uz pretpostavku da je između t_0 i t_s uklopna struja različita od nule, gdje je t_s vrijeme kada se jezgra počinje zasićivati, a vrijeme t_0 kada uklopna struja dostiže vrijednost nula za svaki ciklus [5].

$$i(t) = \frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{R_W^2 + \omega^2 L_{air-core}^2}} (\sin(\omega t - \phi) \cdot e^{-\frac{R_W}{\omega L_{air-core}}(t-t_s)} \sin(\omega t_s - \phi)) \quad (3-13)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega \cdot L_{air-core}}{R_W} \quad (3-14)$$

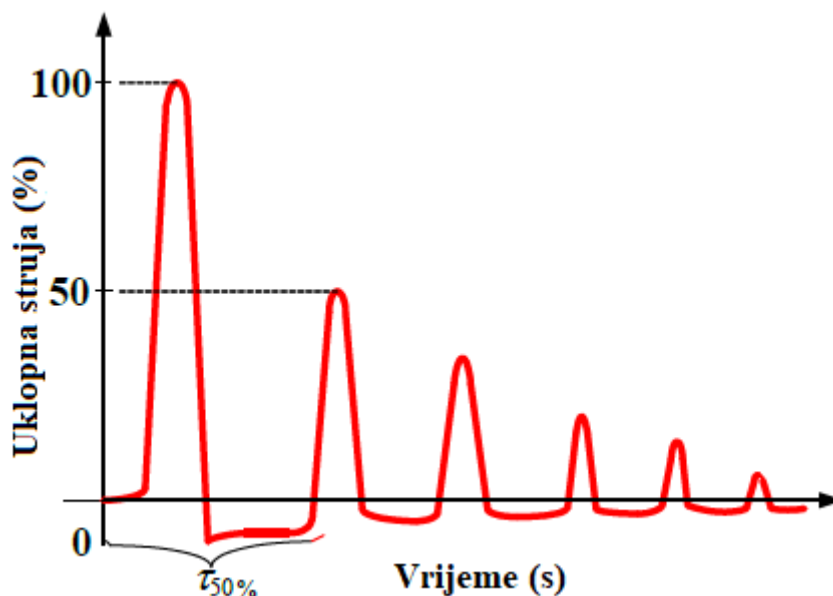
Ove tri spomenute jednadžbe se mogu predočiti slikom 3.7. [5].



Slika 3.7. Analitička procjena uklopne struje za svaku jednadžbu za iste parametre [5].

4. UTJECAJ UKLOPNE STRUJE

Fenomen uklopne struje poznat je još od početka dvadesetog stoljeća, ali korištenjem primitivnih instrumenata nije bilo moguće bolje odrediti količinu struje koja se pojavljuje u tom trenutku. Također, njezina valovitost ostala je nepoznanica. Uklopna struja je struja magnetiziranja koja se pojavljuje prilikom uključivanja neopterećenog transformatora na električnu mrežu, a ona može nadmašiti amplitudom tri do četrdeset puta veću vrijednost od nominalne vrijednosti [10].



Slika 4.1. Prikaz valnog oblika uklopne struje [8].

Prigušeni oblik struje kakav možemo zamijetiti na slici 4.1. može uzrokovati mnogo poteškoća. Primjerice, dolazi do proboja izolacije prilikom čestog ukapčanja ili iskapčanja transformatora. Slučajan uklop može pogoditi točan trenutak kada je struja najveća. Najveća šteta proizlazi iz viših harmonika prilikom stvaranja valovitosti struje. Harmonici mogu uzrokovati prenapone koji, kao i rezonantni nastup koji se pojavljuje, mogu utjecati na ostale transformatore i uređaje u mreži. Uređaji u elektroenergetskom sustavu zahtijevaju konstantno i neprekinuto napajanje, stoga u nužnim slučajevima kada sve transformatore treba isključiti zbog kvara na mreži ili kvara u samom transformatoru, doći će do pojave viših harmonika koji loše utječu na relejnu nadstrujnu zaštitu. Dodatno, u 6 kV mrežama industrijskih postrojenja viši harmonici mogu uzrokovati slučajne reakcije zaštita te zaustaviti cijeli pogon. Naposljetku, kada više transformatora radi u paraleli, uključivanje dodatnog transformatora može narušiti rad ostalih [10]. Poznavanjem ovih problema postoji mogućnost reduciranja struje uklopa.

Kod manjih transformatora vršna vrijednost struje uklopa je puno veća nego kod onih većih dimenzija, ali je zato trajanje prijelazne pojave u kojoj se pojavljuje struja uklopa i do 50% kraće. Trajanje uklopne struje može ovisiti o lokaciji u elektroenergetskom sustavu. Naime, ako je transformator bliže elektrani, uklopna struja i njen utjecaj traju duže u odnosu kada je on na nekom udaljenijem mjestu, npr. u trafostanici. Velik utjecaj ima i magnetsko svojstvo materijala koji se koristi za izradu jezgre transformatora. Gustoća magnetskog toka (vrijednosti između 1.5 i 1.75T) u niskim zasićenjima uzrokuje ozbiljniji magnetski utjecaj na uklop transformatora [8].

Slika 3.1. prikazuje kako je uklopna strogo nesinusna sa visokim harmonicima, a parametar $\tau_{50\%}$ označava trajanje uklopne struje, odnosno vrijeme za koje će uklopna struja pasti ispod 50% svoje maksimalne vrijednosti. Tablica 4.1. je prikaz maksimalnih vrijednosti struja uklopa u različitim transformatorima različitih snaga, u odnosu na parametar $\tau_{50\%}$ i nazivne vrijednosti. Kako se nazivna snaga transformatora povećava, vrijeme za koje je potrebno da uklopna struja padne ispod 50% u odnosu na svoju vršnu vrijednost je duže [8].

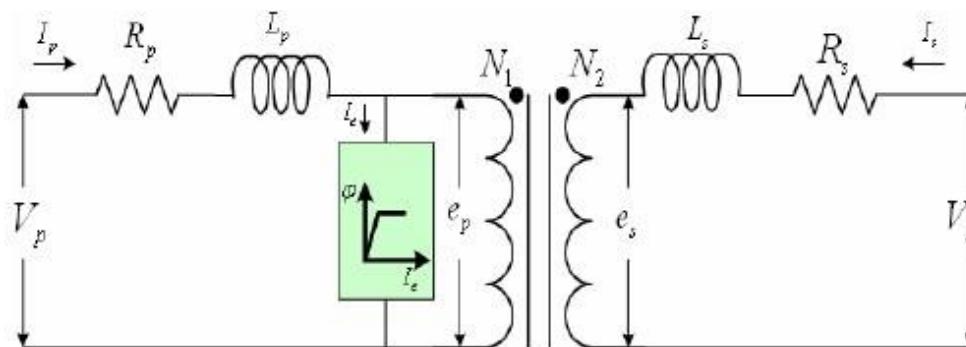
Tablica 4.1. Vrijednosti uklopnih struja za različite transformatore [8].

| | | | | | |
|--|------|-----|-----|----|----|
| Nazivna snaga transformatora (MVA) | 0.5 | 1 | 5 | 10 | 50 |
| Omjer amplitude uklopne i nazivne struje (%) | 15 | 14 | 10 | 10 | 9 |
| $\tau_{50\%}$ (s) | 0.16 | 0.2 | 1.2 | 5 | 72 |

4.1. Analiza utjecaja uklopne struje na zaštitu transformatora

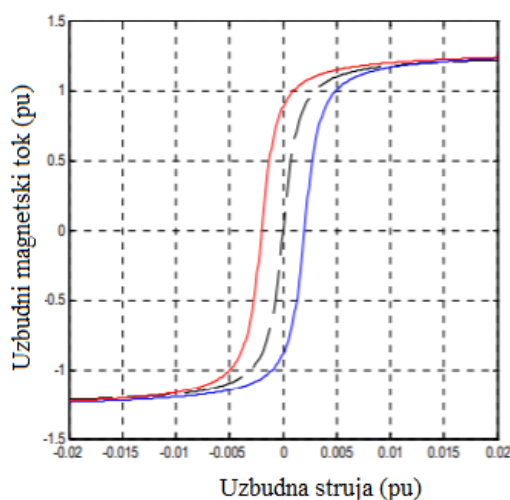
U postrojenjima instalirane snage većih od 10 MVA za zaštitu transformatora koristi se diferencijalna zaštita, dok se u postrojenjima snaga manjih od 10 MVA koriste nadstrujne zaštite. Visoke uklopne struje se pojavljuju kada se transformator uključuje u radu praznog hoda.

Slučajno izbacivanje transformatora iz mreže uzrokuje diferencijalna zaštita koja okida zbog neravnoteže u strujnom krugu. Sprječavanjem nastanka lažnog isklopa potrebno je promatrati harmonički sadržaj uklopne struje, naročito njezin drugi harmonik u prijelaznoj pojavi uklopne struje.



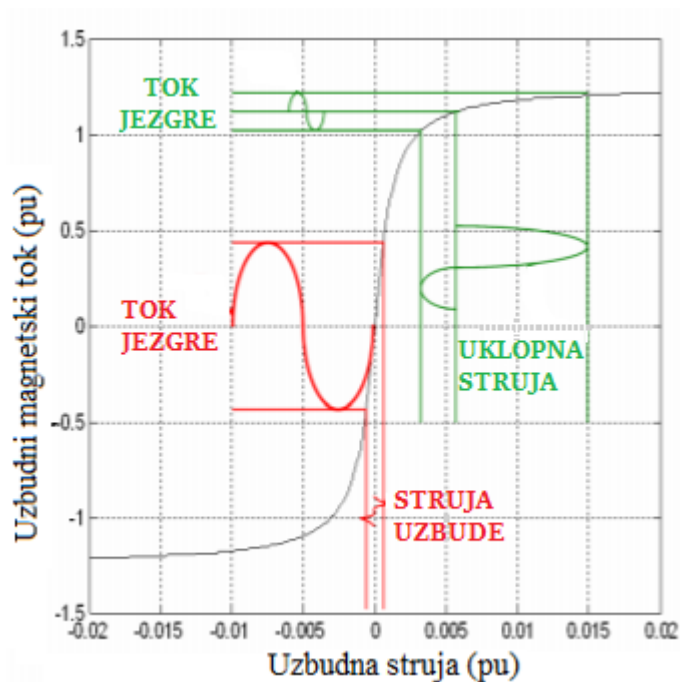
Slika 4.2. Ekvivalentni krug dvonamotnog transformatora [11].

Sl. 4.2. prikazuje model transformatora. Model uzima u obzir omjer $N_1:N_2$ s parametrima elemenata, toplinske gubitke u namotima (R_P , R_S), rasipni induktivitet (L_P , L_S) i uzбудnu karakteristiku željezne jezgre. Uzбудnu karakteristiku transformatora možemo prikazati kao nelinearnu krivulju na slici 4.3. Nelinearnost ukazuje na probleme uzbuđivanja i zasićenja jezgre transformatora [11].



Slika 4.3. Petlja histereze transformatora [11].

U različitim slučajevima rada transformatora kao što je prikazano na slici 4.4. struja rezultira različitim vrijednostima na transformatoru. Transformator bez opterećenja će raditi u području zasićenja uzbudne krivulje što rezultira radom asimetrične struje visoke amplitude i velike istosmjerne komponente sa izraženim visokim harmonicima [11].



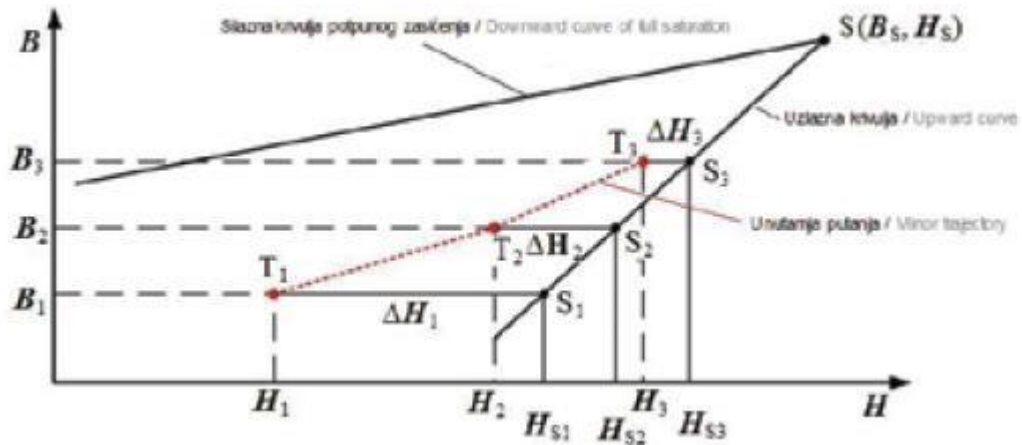
Slika 4.4. Prikaz utjecaja različitih iznosa remanentnog magnetizma u jezgri transformatora na iznos i valni oblik struje [11].

Ovo može prouzročiti nestabilan rad diferencijalne i nadstrujne zaštite. Kada je transformator u ustaljenom stanju rada, struja pobude je nešto manja (obično 5% više od nazivne) što se također vidi prema grafu 4.4. [11]

U praksi, magnituda i trajanje uklopne struje najčešće ovise o kutu upada kada je transformator pod naponom, vrijednosti i smjeru zaostalog magnetskog toka, karakteristici zasićenja transformatorske jezgre te impedanciji izvora [11].

4.2. Unutarnje putanje magnetiziranja

Iz funkcije $\Delta H = f(B)$ (gdje je ΔH magnetsko polje, a B magnetska indukcija), uz zaključak da se unutarnja putanja magnetiziranja formira po vanjskom dijelu te funkcije koja je kvadratna. Opis kako iz jedne točke putanje doći u drugu grafički se može prikazati na slici 4.5. [4].



Slika 4.5. Shematski prikaz algoritma za određivanje unutarnjih putanja [4].

Tjeme kvadratne funkcije nalazi se u točki $S(B_s, H_s)$. U toj točki se spajaju grane petlje histereze potpunog zasićenja. Uz pretpostavku da su poznate koordinate točke $T_1(B_1, H_1)$ i u kojem je točka $S_1(B_1, H_{S1})$ na točnom položaju petlje potpunog zasićenja, vrijednost ΔH prema relaciji (4-1) će tada predstavljati udaljenost između te dvije točke [4] :

$$\Delta H_1 = a(B_1 - B_s)^2. \quad (4-1)$$

$$\Delta H_2 = a(B_2 - B_s)^2, \quad (4-2)$$

za vrijednost u točki $B_2 = B_1 + \Delta B$ dobiva se iz iste kvadratne funkcije relacijom (3-2). Tako će na mjestu B_2 magnetske indukcije doseći novu vrijednost u relaciji (4-3) [4] :

$$\Delta H_2 = \Delta H_1 \frac{(B_2 - B_s)^2}{(B_1 - B_s)^2} = \Delta H_1 \frac{(B_1 + \Delta B - B_s)^2}{(B_1 - B_s)^2}. \quad (4-3)$$

pa se onda nova jakost magnetskog polja na mjestu B_2 računa kao $H_2 = H_{S2} - \Delta H_2$ [4].

Ovim načinom unutarnja putanja se beskonačno približava odgovarajućoj krivulji zasićenja, ali je nikad ne dostiže zbog promjene predznaka prirasta magnetske indukcije. Referentna krivulja tada postaje silazna krivulja. Također, ovaj postupak vrijedi i za suprotan smjer. Potrebno je poznavati petlju histereze potpunog zasićenja za upotrebu ovog algoritma [4].

Vežu između magnetskog polja $H(t)$ i magnetske indukcije $B(t)$ kada je transformator u stacionarnom stanju opisuje određena petlja histereze koja pripada određenom naponu napajanja. U promatranom transformatoru moguće je izmjeriti struju magnetiziranja $i(t)$ i inducirani napon

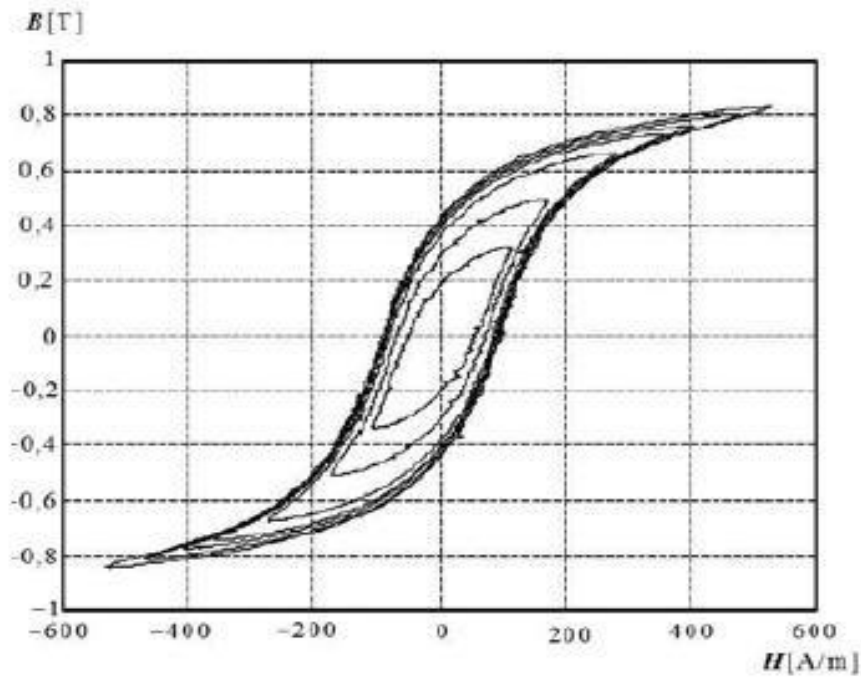
na sekundaru $u_2(t)$. Uz poznati broj zavoja na primaru N_1 i srednju duljinu l_{sr} magnetskog puta dobiva se magnetsko polje relacijom (4-3) [4]:

$$H(t) = \frac{N_1 i(t)}{l_{sr}}, \quad (4-4)$$

a uz poznatu površinu magnetskog presjeka S i broja namota na sekundaru N_2 otvara se mogućnost računanja magnetske indukcije (4-5):

$$B(t) = \frac{1}{N_2 S} \int_0^t u_2(t) + B_0. \quad (4-5)$$

Različitim iznosima struje magnetiziranja moguće je nacrtati graf u ovisnosti magnetske indukcije $B(t)$ o magnetskom polju $H(t)$, sl. 4.6.



Slika 4.6. Izmjerene petlje histereze za različite struje magnetiziranja [4].

5. METODE UBLAŽAVANJA DJELOVANJA STRUJE UKLOPA

Postoji nekoliko načina ublažavanja djelovanja struje uklopa. Najčešće metode koje postoje u praksi su neutralni otpornici velike otpornosti koji su spojeni paralelno na glavni prekidač. Struja uklopa se najčešće pojavljuje ako je transformator slabo opterećen ili nije uopće. Sekvencijalno uklapanje faza transformatora je također jedno od rješenja za umanjenje struje uklopa (detaljnije u poglavlju 5.2.).

5.1. PWM (Pulse-Width Modulation, Pulsno širinska modulacija)

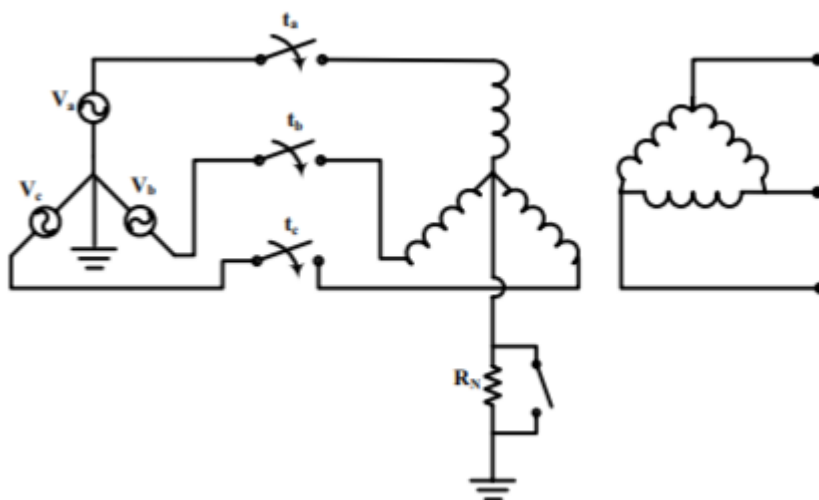
Pulsno širinska modulacija zadnjih se godina više koristi jer postoje algoritmi koji na osnovu parametara određuju kada će se transformator uklopiti, dok je kod neutralnog otpornika potrebno izabrati adekvatan otpornik za određenu snagu transformatora. Još se pojavljuje i pitanje isplativosti otpornika pa je pulsno širinska modulacija svakako bolje ekonomično rješenje. Ovaj način koristi se pri uklapanju transformatora kako bi se reducirao iznos uklopne struje te kako bi se izbjeglo narušavanje kvalitete električne energije u mreži, lažno djelovanje releja te kako bi se ograničila unutarnja mehanička naprezanja. Prilikom uključivanja trofaznog transformatora u mrežu, pulsno širinska modulacija djeluje tako da prvu fazu napaja do vršnog naponskog iznosa, a u ostale dvije faze odgodi napajanje u prvoj četvrtini periode. Primjerice, na frekvenciji od 50 Hz to bi bilo prvih 5 ms. Glavni parametri koji utječu na magnetiziranje ukopne struje su geometrija transformatorske jezgre, induktivnost izvora, induktivnost između namota i jezgre, radni otpor namotaja, vršna vrijednost napona prilikom uklapanja, vrijednost i polaritet remanentnog magnetizma te najveća vrijednost magnetskog toka koju jezgra može podnijeti [5].

Zapostavljanje remanentnog magnetizma omogućuje se pretvaračem napona s promjenjivom širinom impulsa. Cilj je modificirati napon u vrijednost nula, a to nam omogućuju serijski naponski kompenzatori. Oni se koriste za smanjivanje reaktivne snage trošila pri njihovim uklopima. Smanjivanjem reaktivne snage u transformatoru pomoću serijski naponskih kompenzatora smanjuje se zaostali magnetizam. Kompenzator je u funkciji dok se struja i napon ne priguše na svoje nominalne vrijednosti. Remanentni magnetski tok se potom izjednači sa magnetskim tokom koji se dobiva pomoću kompenzatora te slijedi propuštanje nemodificiranog napona koji struju uklopa svodi na mala harmonička izobličenja. Dakle, preciznim upravljanjem napona kontrolira se struja uklopa [12].

5.2. Sekvencijalno uklapanje faza transformatora

Za transformator spojen u zvijezdu struje uklopa su neuravnotežene kroz sve tri faze, te se zbog toga može očekivati da će u uzemljenom zvijezdištu nula također nositi teret uklopne struje. Dodavanjem otpornika u nulište transformatora kao što je prikazano na slici 5.1. omogućuje se reduciranje amplitude uklopne struje. Princip rada sekvencijalnog uklapanja faze ukazuje slika 5.1. V_a , V_b i V_c su faze napajanja, R_n je uzemljeni otpornik ili neutralni otpornik. t_a , t_b i t_c su intervali vremena gdje će neka od sklopki uklopiti, ujedno je to $t_c > t_b > t_a$. Uz određena kašnjenja prilikom uklopa pojedinih faza prekidačima može se smanjiti utjecaj uklopne struje, ali istovremeno gašenje prekidača ne smanjuje utjecaj uklopnih struja [13].

Ova metoda je vrlo efektivna te može smanjiti struju uklopa od 80% do 90%. Biranjem optimalnog neutralnog otpornika koji se ponaša kao serijski umetnuti otpornik i napajanjem svake faze u određenoj sekvenci, omogućava se smanjenje udarne struje. Međutim, u nelinearnim sustavima neutralni otpornik je teško odabrati zbog manjka istraživanja istog. Razlog tome su potencijalne poteškoće u provođenju prijelaznih analiza [14].

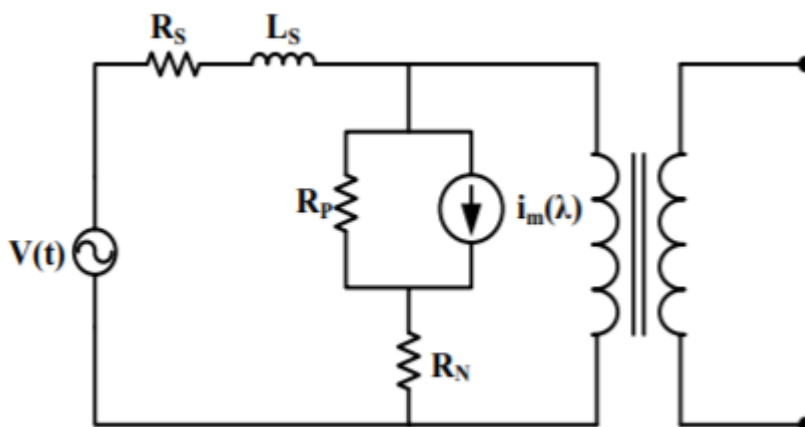


Slika 5.1. Sekvencijalni uklop faza sa uzemljenim otpornikom [13].

Pri uklopu prve faze često se pojavljuje najveća struja uklopa s obzirom na sve tri faze. Stoga se zbog toga neutralni otpornik mora optimizirati prema učinku koji ima pri uklopu te prve faze. Analiza prijelaznih pojava objašnjava kako se otpornikom manjih otpora postiže jednako dobar učinak direktnog smanjivanja vršne vrijednosti stvarne uklopne struje. Samo dimenzioniranje neutralnog otpornika se određuje teorijom stacionarnih stanja koja pojednostavljuje rješavanje nelinearne diferencijalne jednačbe s više varijabli [14].

5.2.1. Proračun uklopne struje s neutralnim otpornikom

Vršna vrijednost uklopne struje prve faze je veća nego u preostale dvije. Taj podatak je ključan u određivanju snage i otpora neutralnog otpornika te kojim će se omjerom struje smanjiti. Ekvivalentnom shemom transformatora (Slika 5.2.) može se prikazati proračun uklapanja prve faze. Na slici je vidljivo kako je magnetska grana transformatora prikazana sa $i_m(\lambda)$, gdje je λ vezani magnetski tok. Također, elementi na shemi su prikazani tako da je R_n – neutralni otpor, R_s – serijski otpor, R_p – gubici jezgre, L_s – serijska indukcija dok je napon napajanja prikazan kao $V(t)$ [13].



Slika 5.2. Shema transformatora s neutralnim otpornikom [13].

Jednadžba koja opisuje prikazanu shemu:

$$V(t) = R_s i(t) + L_s \frac{di(t)}{dt} + \frac{d\lambda(t)}{dt} + R_N i(t), \quad (5-1)$$

$$i(t) = \frac{1}{R_p} \frac{d\lambda(t)}{dt} + i_m(\lambda). \quad (5-2)$$

Jednadžbe (5-1) i (5-2) rezultiraju nelinearnim diferencijalnim jednadžbama jer je u stvarnom transformatoru $i_m(\lambda)$ nelinearna. Kako bi jednadžbe mogle biti rješive, diskretno vrijeme t postavljamo u j intervale. Integriranjem jednadžbi postavljaju se granice integrala od $t=0$ do $t=j\Delta t$ uz pretpostavku da je $i_m(\lambda)$ konstantan u svakom intervalu Δt . Nadalje, integriranjem jednadžbi (5-1) i (5-2) u intervalima kada je t_{j-1} i t ($t_{j-1} < t < t_j$), transformiraju se u jednadžbe (5-3) i (5-4) gdje je $\alpha \equiv (R_p + R_s + R_N)/L_s$, a $\beta \equiv R_p/L_s$ [10]:

$$i(t) = i(t_{j-1})e^{-\alpha(t-t_{j-1})} + e^{-\alpha t} \int_{t_{j-1}}^t e^{\alpha\tau} \left(\frac{v(\tau)}{L_s} + \beta i_m(\tau) \right) d\tau, \quad (5-3)$$

$$\lambda(t) = \lambda(t_{j-1}) + \int_{t_{j-1}}^t v(\tau) d\tau - (R_s + R_N) \int_{t_{j-1}}^t i(\tau) d\tau - L_s [i(t) - i(t_{j-1})]. \quad (5-4)$$

Uzimajući u obzir $V(t)=V_m \sin(\omega t+\theta)$, mogu se postići rekurzivne jednadžbe kako bi izračun struje i toka transformatora bio moguć :

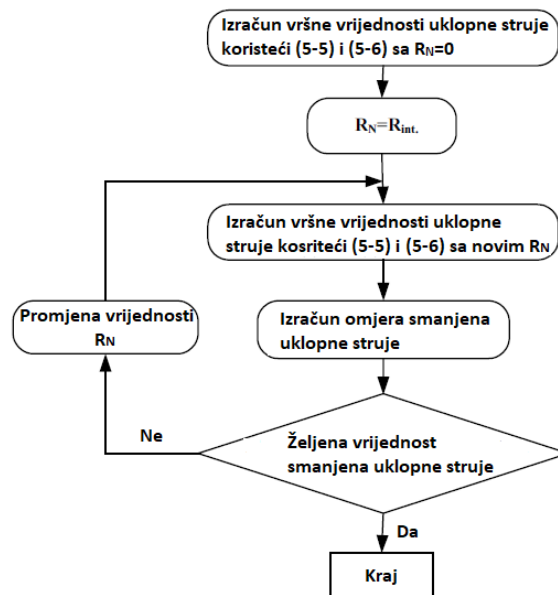
$$i(t_j) = i(t_{j-1})e^{-\alpha \Delta t} + \frac{V_m}{L_s \sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \cdot \left[\sin(\omega t_{j-1} + \theta - \varphi) e^{-\alpha \Delta t} \right] + \frac{\beta}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \Delta t}) i_m(t_{j-1}), \quad (5-5)$$

$$\begin{aligned} \lambda(t_j) = & \lambda(t_{j-1}) - \frac{V_m}{\omega} \left[\cos(\omega t_j + \theta) - \cos(\omega t_{j-1} + \theta) \right] + \\ & + \frac{(R_s + R_N)}{\alpha} i(t_{j-1})(e^{-\alpha \Delta t} - 1) + \frac{(R_s + R_N) V_m}{L_s \sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \\ & \cdot \left[\frac{\cos(\omega t_j + \theta - \varphi)}{\omega} - \frac{\cos(\omega t_{j-1} + \theta - \varphi)}{\omega} - \sin(\omega t_{j-1} + \theta - \varphi) \cdot \frac{(e^{-\alpha \Delta t} - 1)}{\alpha} \right] - \\ & - \frac{(R_s - R_N) \beta i_m(t_{j-1})}{\alpha} \cdot \left[\Delta t + \frac{(e^{-\alpha \Delta t} - 1)}{\alpha} \right] - L_s [i(t) - i(t_{j-1})]. \end{aligned} \quad (5-6)$$

Gdje je $\Delta t = t_j - t_{j-1}$ i $\varphi = \arctg(\omega/\alpha)$.

Izračunom dimenzija neutralnog otpornika jednadžbama (5-5) i (5-6) postignuta je specifična uklopna struja u reduciranom omjeru. Slikom 5.3. logički pojašnjava postupak određivanja reduciranog omjera uklopne struje. Formulom (5-7) računa se omjer uklopne struje [13].

$$\text{Omjerni faktor struje uklopa} = \frac{i_{\text{vršno}, R_N \text{ izračunato}}}{i_{\text{vršno}, R_N=0}}, \quad (5-7)$$



Slika 5.3. Logički prikaz proračuna specifičnog omjera smanjenja struje uklopa [13].

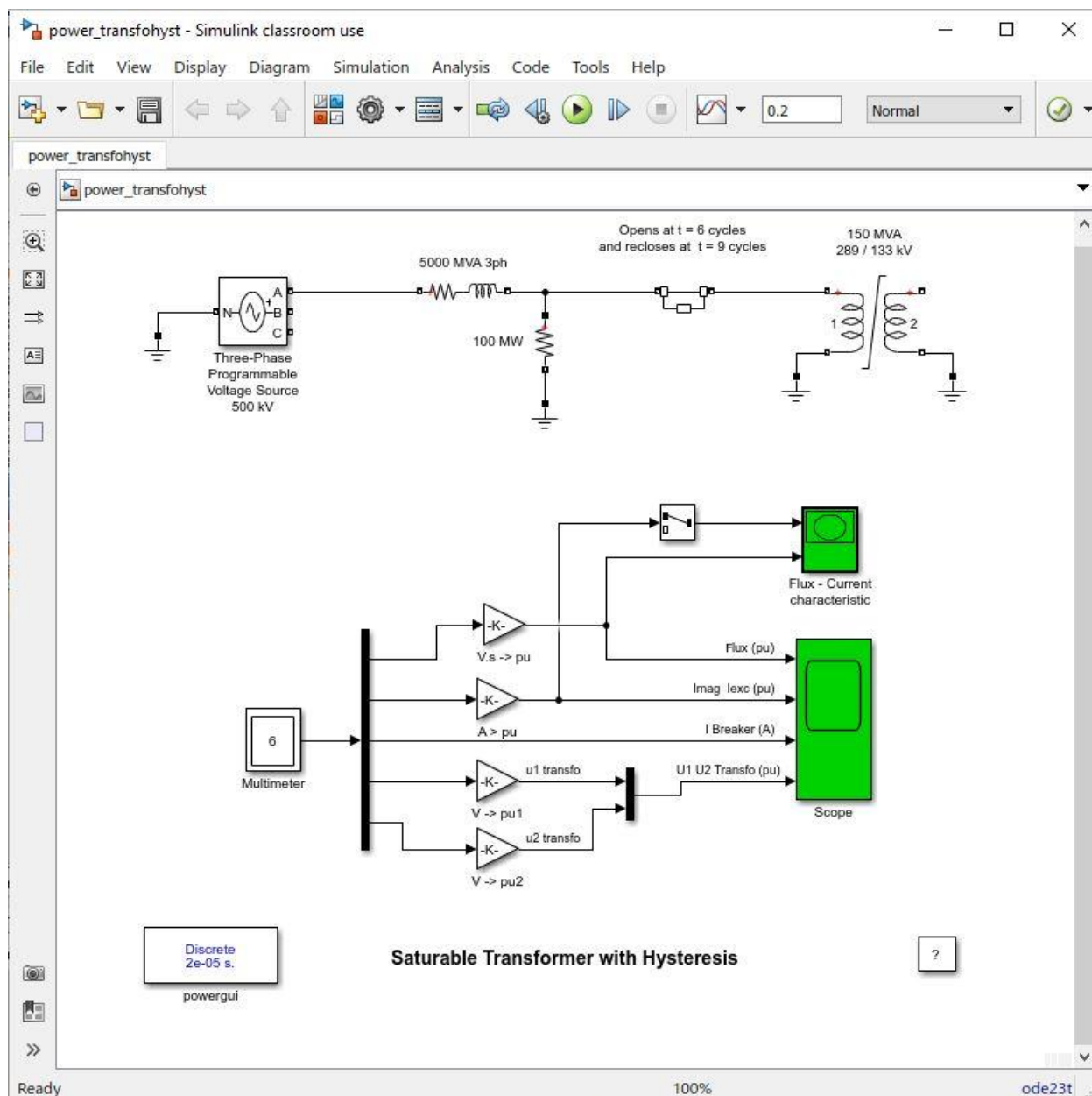
6. SIMULACIJA UKLOPNE STRUJE TRANSFORMATORA

U ovom radu prikazat će se kako struja uklopa ovisi o remanentnom magnetizmu. Simulacija se izvodi putem programa MATLAB i Simulink. MATLAB omogućuje simuliranje i analiziranje projekata iz svih područja znanosti. Ključno je odrediti model koji je replika onoga što se ispituje u stvarnom svijetu. Model mora sadržavati sve varijable, smetnje i parametre. U slučaju ovog rada model je već definiran u samom programskom paketu MATLAB.

Na slici 6.1. spojena je jedna faza trofaznog transformatora na mrežu napona 500 kV i snage 5000 MVA. Jedna faza transformatora ima snagu od 150 MVA, što znači da je transformator ukupne snage 450 MVA. Prijenosni omjer transformatora je 500 kV/230 kV. Osciloskopom i mjernim uređajem prati se nastanak valovitih funkcija struje magnetiziranja, remanentnog magnetizma te mjerenje napona i struje koji ulaze na primar transformatora [15].

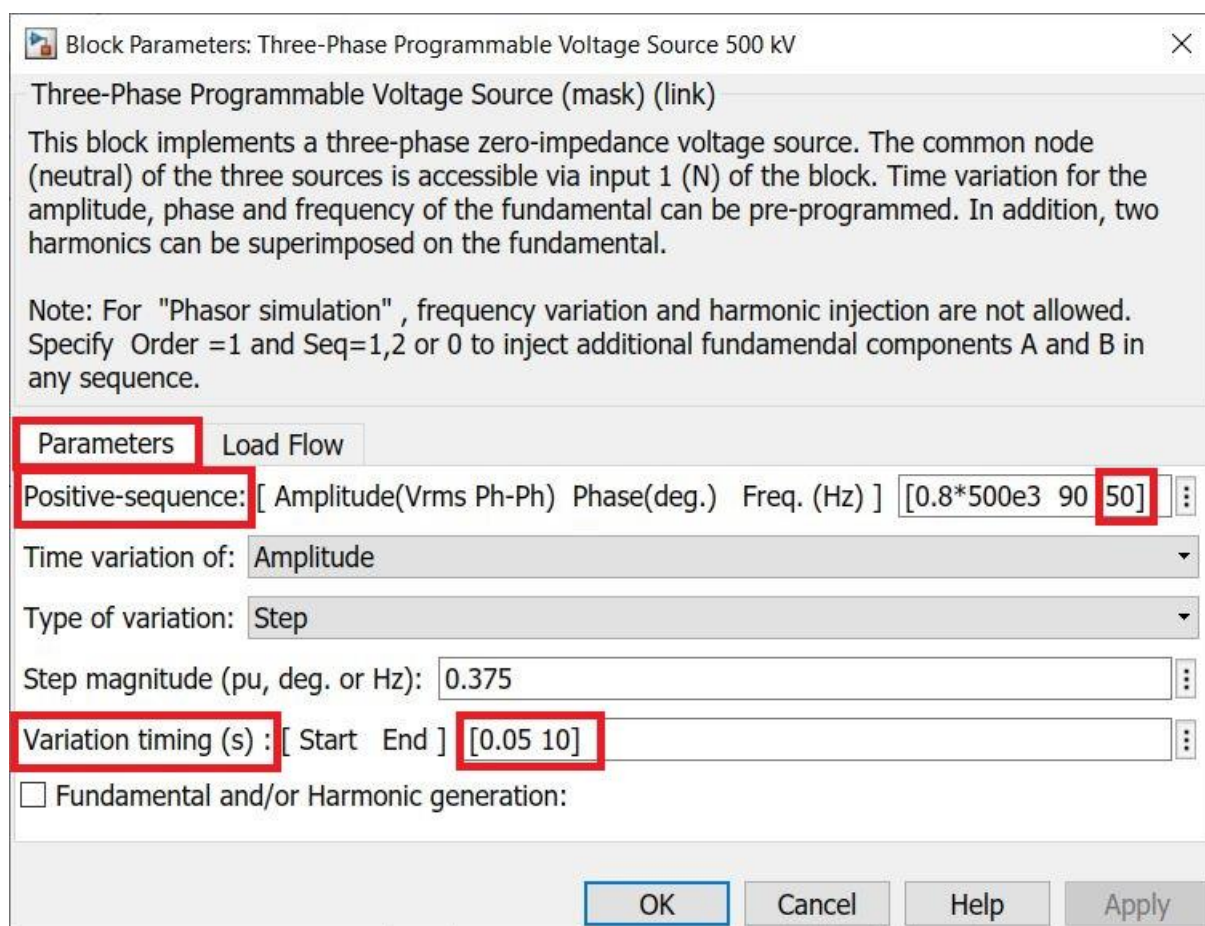
Za promjenu unutarnjeg napona koristi se trofazni programibilni izvor napona ekvivalentne 500 kV mreže. Napon izvora je programiran na 0,8 p.u. („*per units*“) nakon $t = 3$ ciklusa (0,05 s) te se nakon toga povećava za 37,5 % odnosno na 1,1 p.u. U svrhu vizualnog prikaza zaostalog toka i uklopne struje, prekidač koji je u početku bio zatvoren pri uključivanju, najprije se otvara pri $t = 6$ ciklusa (0,1 s), a potom se ponovno uključuje pri $t = 9$ ciklusa (0,15 s). Za praćenje magnetskog toka, struje magnetiziranja, napona i struje koji protječu primarnim namotom transformatora koriste se multimetarski i Scope blok [15].

Kako ova shema simulacije nije predviđena za određivanje struje uklopa, potrebno je modificirati shemu, parametre na modelu transformatora i svih ostalih elemenata. Ova simulacija je predviđena za crtanje petlje histereze zasićenog trofaznog transformatora. Naime, za ove svrhe u shemu će se dodati blok *Scope* kojim će se pratiti i na kraju ocrtati oblik uklopne struje.



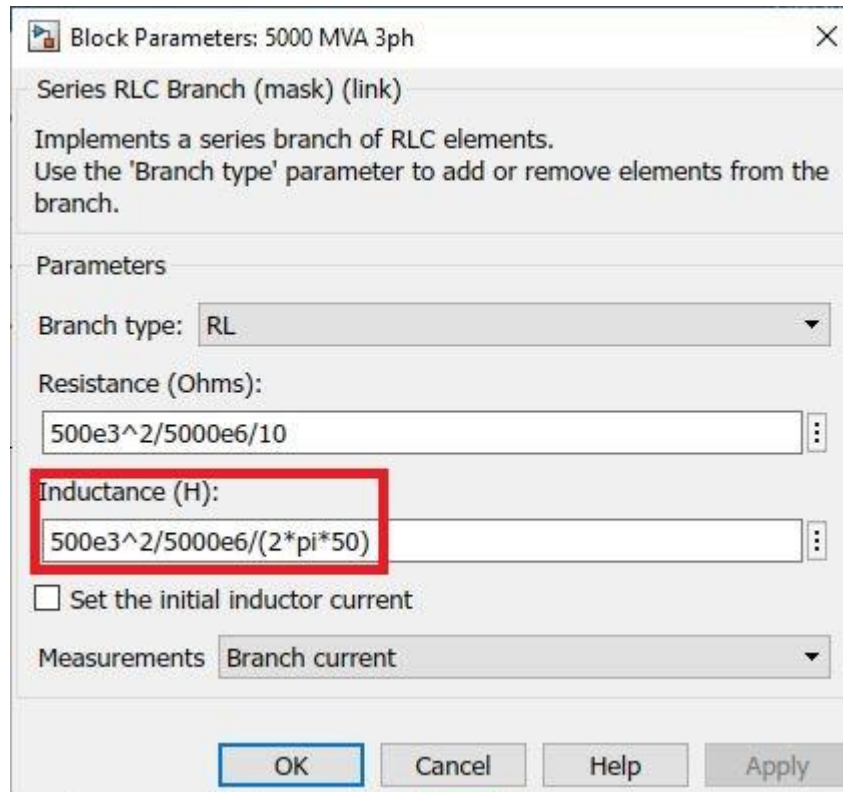
Slika 6.1. Shema spoja trofaznog transformatora (Simulink model zasićenog transformatora).

Trofazni 500 kV programibilni naponski izvor bez impedancije prethodno je namješten na 60 Hz po američkom standardu. Naime, potrebno ga je namjestiti na 50 Hz (po europskom standardu). Dvostrukim klikom na izvor otvara se prozor (Slika 6.2.). Pod karticom *Parameters*, u retku *Positive-sequence* namješta se frekvencija izvora na 50 Hz, dok se u retku *Variation timing (s)* postavlja interval puštanja signala. Najbolje je pustiti signal što duže kako bi se, u ovom slučaju, ocrtała cijela karakteristika uklopne struje.



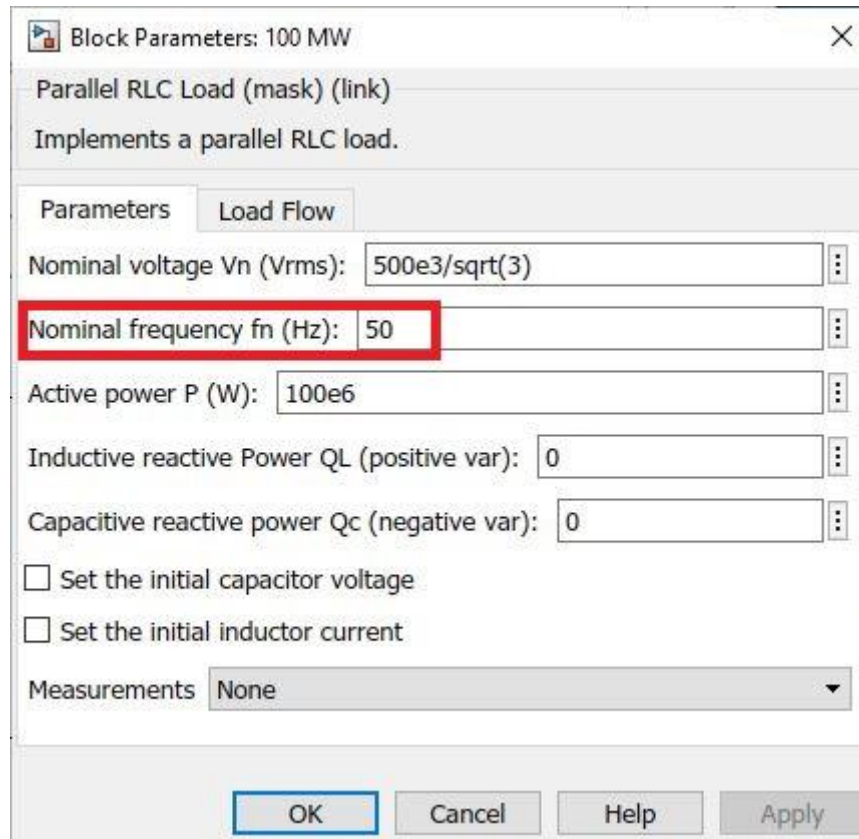
Slika 6.2. Prozor trofaznog naponskog izvora.

Element sa slike 6.1. koji prikazuje otpornik i zavojnicu spojene u seriju, predstavlja RL serijsku granu kojoj je u samoj shemi već određen iznos otpora i indukcije. Kako se reaktivni element po frekvenciji ne smije razlikovati od izvora, frekvencija se mora namjestiti na 50 Hz kao što je prikazano na slici 6.3.



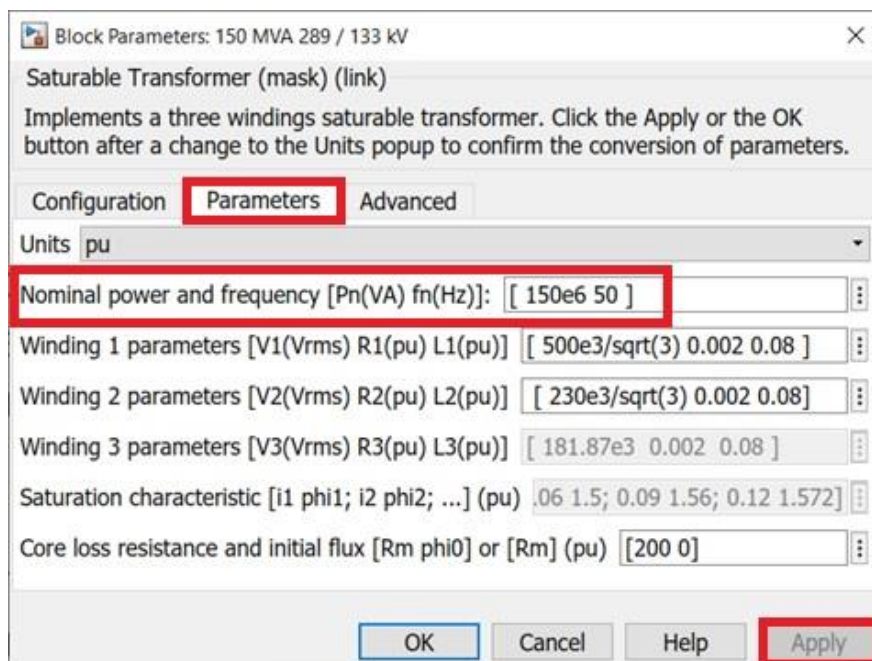
Slika 6.3. Prozor RL serijske grane.

Paralelno spojeni teret sa slike 6.1. je radnog karaktera i iznosi 100 MW, a predstavljen je kao otpornik. U ovom slučaju reaktivne snage su iznosa 0 var, ali mogu se podesiti u prozoru kao što je naznačeno na slici 6.4. Frekvencija se također i u ovom prozoru mijenja na 50 Hz.



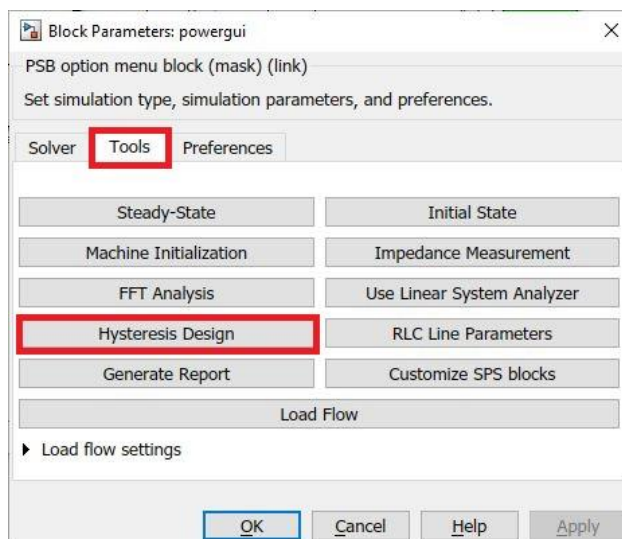
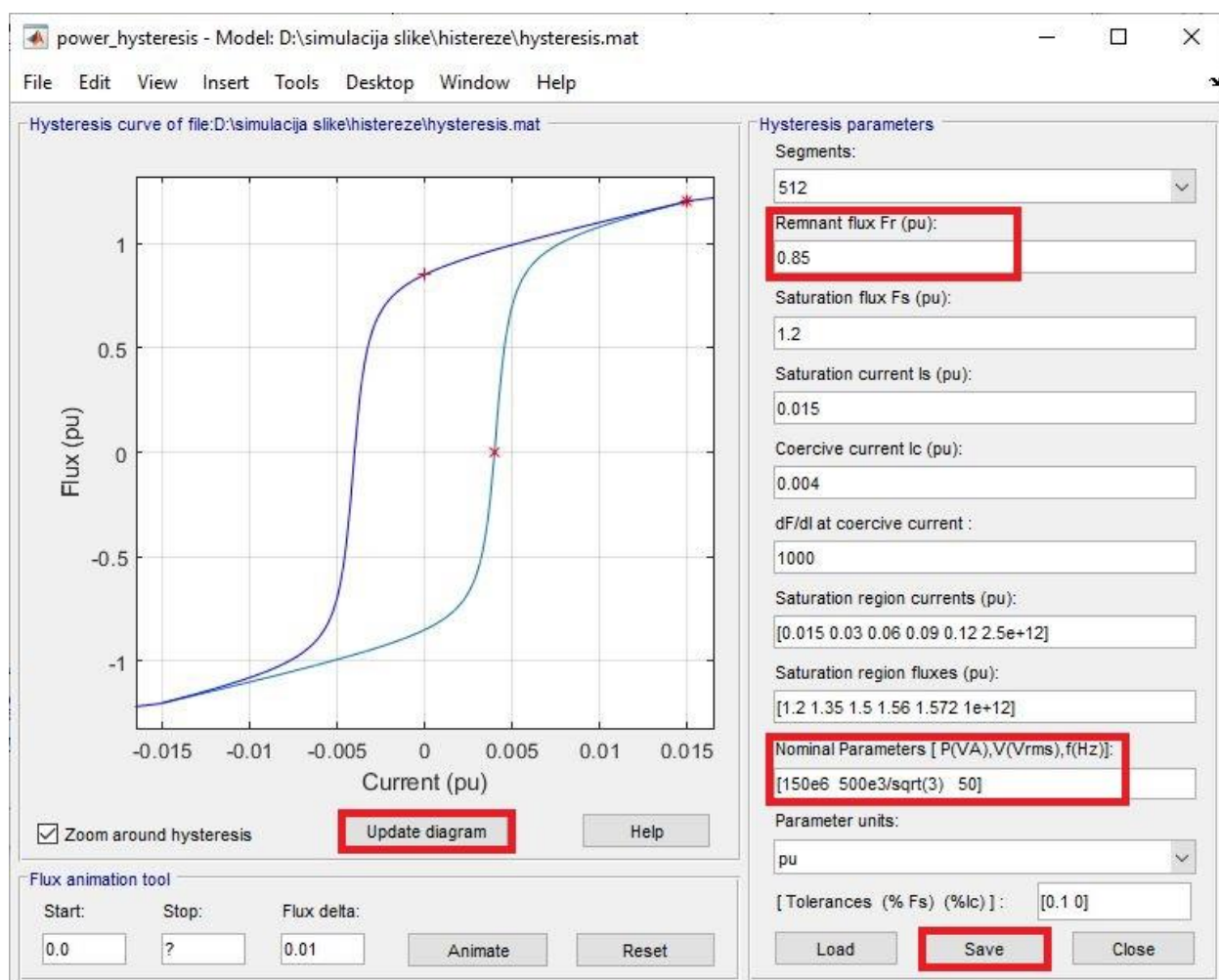
Slika 6.4. Prozor paralelnog spojenog tereta.

Nadalje, blok transformatora prikazuje zasićeni tronamotni transformator. Dvostrukim klikom na blok otvara se prozor sa slike 6.5. te se pod karticom *Parameters* mijenjaju parametri transformatora. U sučelju za pisanje *Nominal power and frequency* frekvencija se mijenja na 50 Hz. Potvrdom na tipku *Apply* uspješno se mijenjaju parametri transformatora.



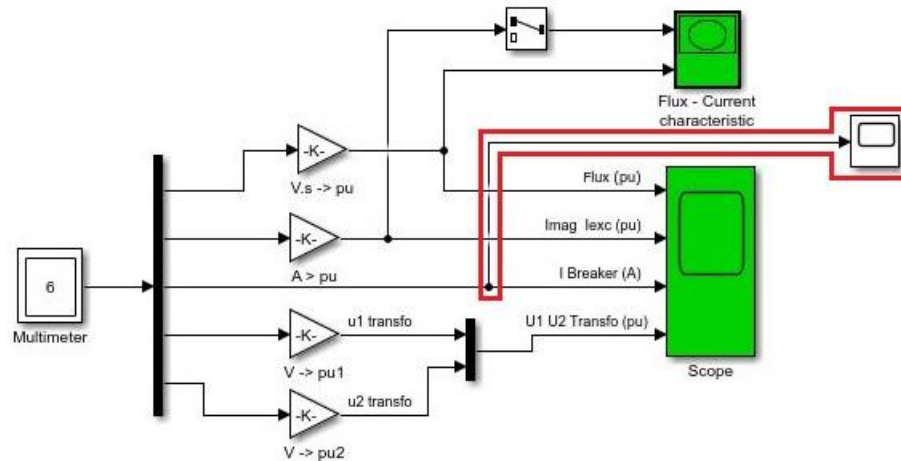
Slika 6.5. Prozor bloka tronamotnog transformatora.

Dvostrukim klikom na blok *powergui* sa sheme na slici 6.1. otvara se prozor (Slika 6.6) koji omogućuje postavljanje vrste simulacije, parametre simulacije i postavke. Pod karticom *Tools* odabire se jednostrukim klikom *Hysteresis Design* koji otvara prozor sa slike 6.7. u kojem se oblikuje petlja histereze. U ovoj je simulaciji ključno promijeniti iznos remanentnog magnetizma izraženog u postotcima i frekvenciju podesiti na 50 Hz. Pritiskom na tipku *Save* spremaju su parametri potrebni za provedbu ove simulacije koji definiraju oblik histereze. Klikom na *Update diagram*, na koordinatnom sustavu u prozoru 6.7., petlja histereze poprima oblik koji je definiran mijenjanjem pojedinih parametara.

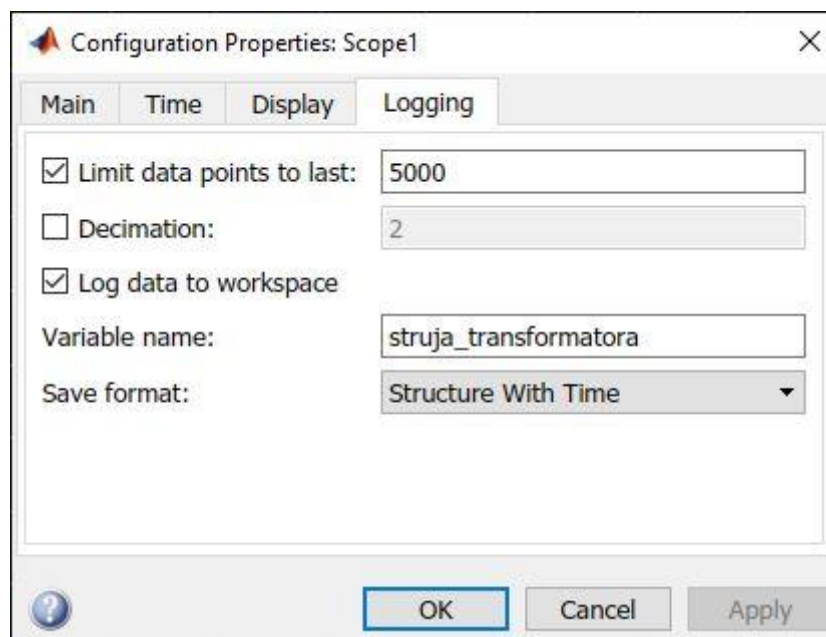
Slika 6.6. Prozor bloka *powergui* na kartici *Tools*.

Slika 6.7. Oblikovanje petlje histereze.

U *Simulation tab* (Slika 6.1.) desnim klikom na ikonicu koja prikazuje sinusni val otvara se prozor *Library Browser* koji omogućuje dodavanje blokova. Dodaje se blok *Scope* (osciloskop) u granu *I Breaker (A)* mjernog dijela sheme sa slike 6.8. označen crvenom bojom. Kako bi se ostvarila karakteristika uklopne struje transformatora na kojem se izvodi simulacija, potrebno je u skočnom prozoru *Scope*-a podesiti konfiguracijska svojstva kao što to prikazuje slika 6.9.

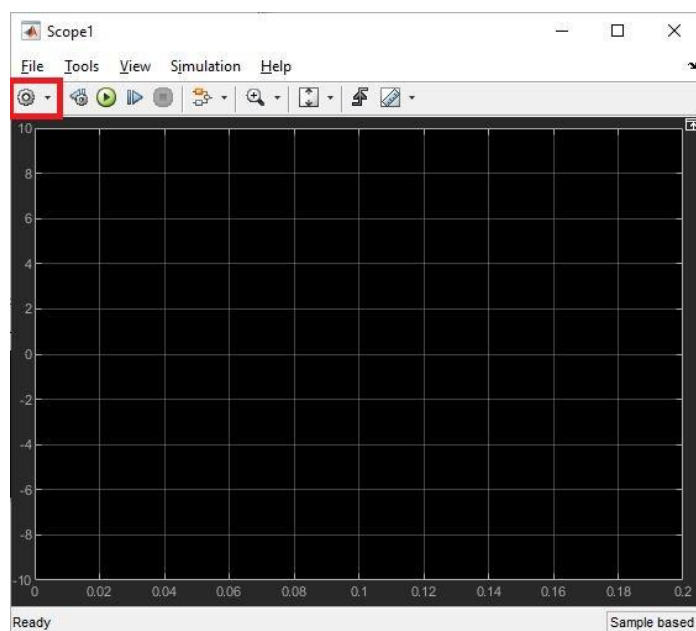


Slika 6.8. Dodavanje bloka *Scope*.



Slika 6.9. Konfiguracijska svojstva dodanog bloka *Scope*.

No, podešavanje konfiguracijskih svojstava postiže se pritiskom na ikonu za postavke (označeno crvenim kvadratićem) u prozoru nakon dvostrukog desnog klika na sami blok (Slika 6.10.).



Slika 6.10. Prozor bloka *Scope* u kojemu se ocrtavaju karakteristike.

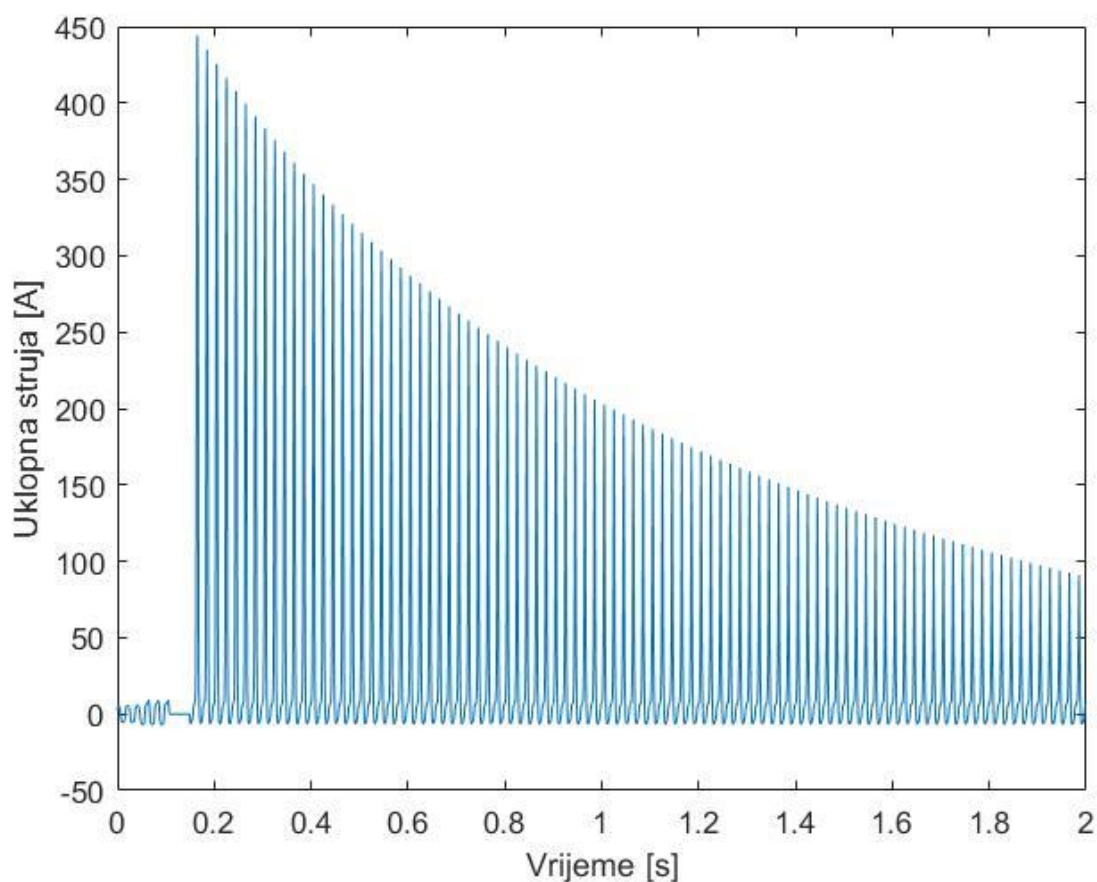
Kako bi se dobila preglednija slika, na alatnoj traci *Simulation tab* upisuje se trajanje simulacije (u ovom slučaju 2 s kao što je na slici 6.12. zbog preglednosti ili na 5 s zbog potrebe ove simulacije slika 6.13.) i to definira koliko perioda će simulacija odraditi. Simulacija se pokreće klikom na zeleni gumb (tipka *compiling*). Nakon *compiling*-a u glavnom sučelju (*Command Window*) Matlab-a, upisuje se niz naredbi za crtanje karakteristike struje uklopa (Slika 6.11.). Kao rezultat toga otvara se slika koja je rezultat naredbe *plot* (Slika 6.12.).

```
Command Window

Classroom License -- for classroom instructional use only.

>> plot(struja_transformatora.time, struja_transformatora.signals.values); xlabel("Vrijeme (s)"); ylabel("Uklopna struja [A]");
fx >> |
```

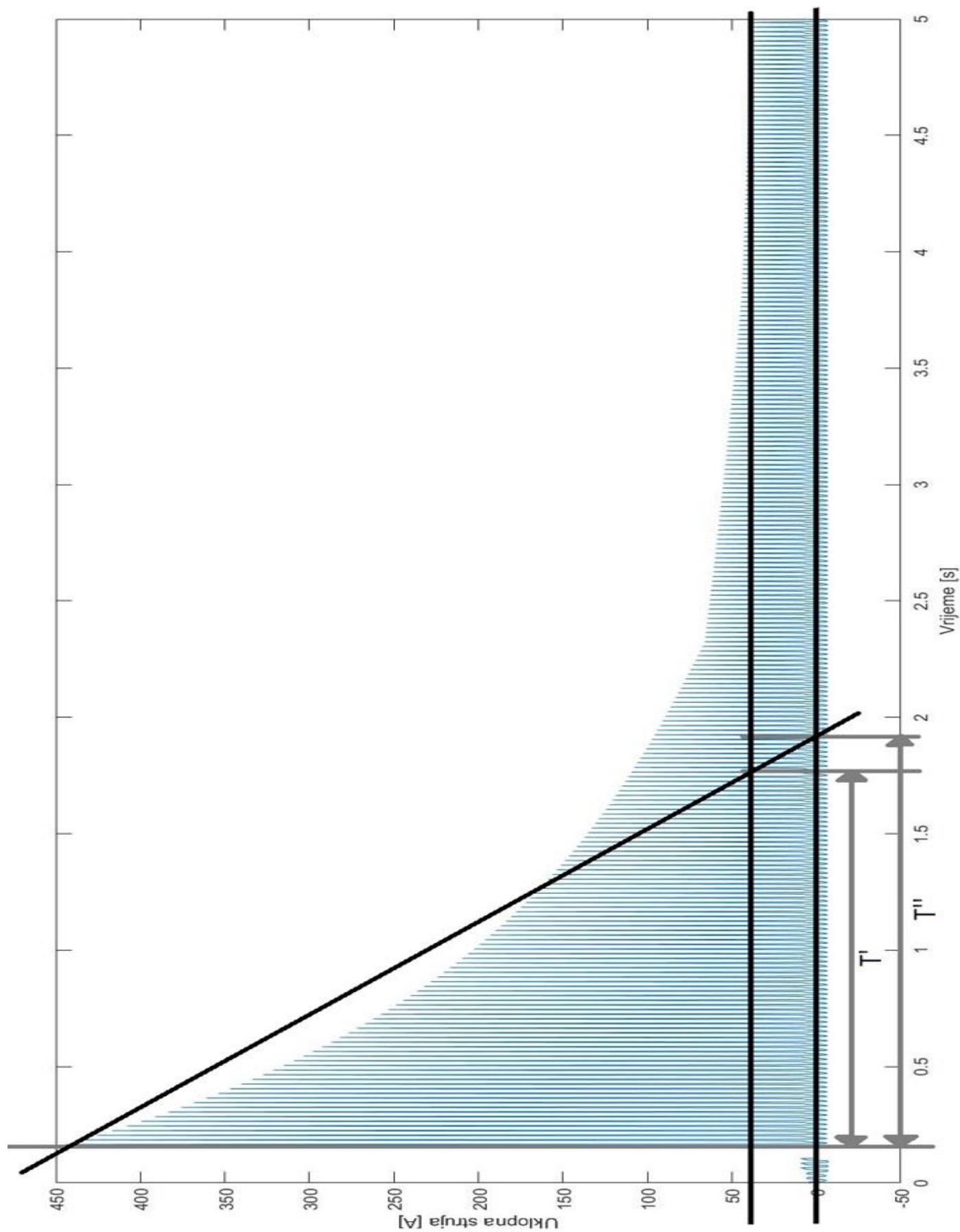
Slika 6.11. Naredba *plot* u *Command Window*-u i imenovanje osi pomoću naredbi *xlabel* i *ylabel*.



Slika 6.12. Rezultat naredbe *plot* (zbog preglednosti postavljeno vrijeme trajanja 2 s).

6.1. Rezultat simulacije

Pretpostavka je da trofazni transformator snage 150 MVA nije prethodno magnetiziran, odnosno da u njegovoj jezgri nema nikakvog zaostalog magnetizma. Kako bi se dobila karakteristika uklopne struje u odnosu sa vremenom, potrebno je transformator prvo namagnetizirati i pustiti ga da dođe u radno stanje (interval od 0 do 0,18 s). Transformator nakon toga u sebi zadržava magnetizam (remanentni magnetizam koji je definiran na 85 %) te ponovnim uključanjem dolazi do skoka struje (uklopna struja) koja se može očitati sa slike 6.13. i njena vršna vrijednost iznosi $\hat{I} = 447 \text{ A}$. Vrijeme T' označava vrijeme kada će struja uklopa doći na 50 % svoje vršne vrijednosti u odnosu na vršne vrijednosti ustaljenog stanja. T'' je vrijeme kada će uklopna struja dostići 50 % svoje vršne vrijednosti u odnosu na apscisu ($T' = 1,58 \text{ s}$; $T'' = 1,73 \text{ s}$).



Slika 6.13. Karakteristika uklopne struje u ovisnosti o vremenu ($t = 5$ s).

7. ZAKLJUČAK

Transformator je električni stroj koji je na međi svakog glavnog dijela elektroenergetskog sustava. Pretvara napone kako bi omogućio jeftinu i brzu distribuciju električne energije. Pažljivim projektiranjem relejnih zaštita za svaki određeni transformator za određenu snagu, smanjuju se gubici svih onih koji se tom električnom energijom služe. Uklopna struja je smetnja za relejnu zaštitu, a neispravan rad zaštite znači nestanak električne energije. Njena vršna vrijednost poziva loše projektiranu relejnu zaštitu na iskapčanje transformatora. No kako se vidi u simulaciji ovog rada, ta prijelazna pojava traje samo trenutno te potrebno je svega nekoliko sekundi kako bi došlo do ustaljenog stanja. Zato zaštita u sebi mora otkriti pojavu drugog i petog harmonika o kojem se govori u poglavlju 3.1. Odabirom modela transformatora matematički se određuje vršna vrijednost uklopne struje, uzimajući u obzir sve parametre koje se očitavaju na natpisnoj pločici transformatora. Neki od parametra su: vrsta materijala od kojeg je izrađena jezgra, nazivni naponi primara i sekundara, broj zavoja, odnosno namota, gubici u bakru i željezu. Na uklopnu struju može se utjecati te postoje načini smanjivanja struje uklopa. Kako se sve više u praksi spominju i koriste energetske pretvarači, najučinkovitija metoda je metoda pulsne kodne modulacije opisana u poglavlju 5.1.

8. LITERATURA

- [1] M. Pužar, I. Mandić, Transformatori i električni rotacijski strojevi, Predavanja, Osijek, 2007.
- [2] Z. Maljković, Transformatori, Predavanja, Zagreb, 2010.
- [3] B. Mitraković, Transformatori, Naučna knjiga, Beograd, 1968.
- [4] O. Bego, G. Petrović, T. Kilić, Smanjenje udarnih struja uklopa trofaznog energetskog transformatora, Energija, No. 3, Vol. 57, str. 350-367, 2008.
- [5] N. Chiesa, Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation, Doctoral thesis.
- [6] P. Sarajčev, R. Kosor, Zaštita u elektroenergetskom sustavu, Predavanja, Split, dostupno na: https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file_attach/Zaštita%20u%20elektroenergetskom%20sustavu%20-%20Robert%20Kosor.pdf (31.8.2021.)
- [7] D. Galzina, Harmonici u visokonaponskoj mreži, HEP – operator prijenosnog sustava.
- [8] Ž. Hederić, V. Jerković Stil, K. Miklošević, Ž. Špoljarić, Transformer Inrush Current Problems and Solutions, Department of Electromechanical Engineering University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering Osijek HR-31000, Croatia.
- [9] K. Bardač, Relejna zaštita transformatora, dostupno na : <https://pdfcoffee.com/relejnazatita-transformatora-barda-kreimir-1800-pdf-free.html> (30.08.2021.)
- [10] Ž. Špoljarić, V. Jerković, M. Stojkov, Measurement System for Transformer Inrush Current Higher Harmonics Determination, DAAAM International, No. 1, Vol. 23, str. 0617 – 0622, 2012.
- [11] L. Wu, S. Chien, C. Liu, C. Chen, The Effect of Inrush Current on Transformer Protection, Department of Electrical Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 2012.
- [12] M. Hok, Načini smanjenja struje uklopa trofaznih transformatora, Završni rad, Osijek, 2017.
- [13] M. Jamali, M. Mirzaie, S. Asghar-Gholamian, Mitigation of Magnetizing Inrush Current using Sequential Phase Energization Technique, Electronics and Eletrical Engineering, No. 2, Vol. 108, str. 67-69, 2011.

- [14] S. G. Abdulsalam i W. Xu, A Sequential Phase Energization Method for Transformer Inrush Current Reduction-Transient Performance and Practical Considerations, IEEE, No. 1, Vol. 2, str. 208-216, 2007.
- [15] MathWorks, Help Center, dostupno na :
https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/saturable-transformer-with-hysteresis.html?s_tid=srchtitle_inrush%20current_28 (16.04.2021.)
- [16] B. Kasztenny, N. Fischer, Y. Xia, Low Second-Harmonic Content in Transformer Inrush Currents – Analysis and Practical Solutions for Protection Security, IEEE, str. 705-722, 2014.

SAŽETAK

U ovome radu razrađen je utjecaj uklopne struje o remanentnom magnetizmu u transformatoru. Opisana je važnost uklopa u određenom trenutku kako ne bi došlo do „lažnog“ djelovanja relejne zaštite. Kod relejne zaštite važno je reći kako uklopna struja nije kvar, već smetnja koja je uzrokovana drugim i petim harmonikom. Navedeno je kako struja magnetiziranja ovisi o količini zasićenja same jezgre te kakav to utjecaj ima po sami transformator. Definiranjem modela transformatora odnosno postavljanjem ekvivalentne sheme, postavljene su jednadžbe za izračun uklopne struje u trofaznim transformatorima ili samo po jednoj fazi transformatora. Prikazano je kako uklopna struja ovisi o magnetskoj indukciji i magnetskom polju odnosno kako oblik petlje histereze ima veze sa zasićenjem jezgre te što to ima za posljedicu. Uža krivulja rezultira većom uklopnom strujom zbog većeg zasićenja jezgre te pojavom viših harmonika. Pojašnjeno je koji su načini ublažavanja struje uklopa te na koji način relejna zaštita ima svoju zaštitu od prepoznavanja kratkog spoja u odnosu na uklopnu struju. Kako su danas sve više zastupljeni energetske pretvarači, posebna pažnja je obraćena na pulsnu širinsku modulaciju. Rezultat ovog rada je prikaz u programu Matlab kako izgleda ta struja u simulacijskom obliku.

Ključne riječi: uklopna struja, transformator, viši harmonici, relejna zaštita, remanentni magnetizam

ABSTRACT

In this paper, the influence of the remanent magnetism on the inrush current in a transformer is elaborated. The importance of switching on a certain moment in order to avoid "false" action of relay protection is described. With relay protection, it is important to say that the inrush current is not a fault, but a interference caused by the second and fifth harmonics. It is stated that the magnetizing current depends on the amount of saturation of the core itself and what effect it has on the transformer. By defining the model of the transformer, and by setting the equivalent scheme, the equations for calculating the inrush current in three-phase transformers or only for one phase of the transformer are set. It is shown how the inrush current depends on the magnetic induction and the magnetic field, and how the shape of the hysteresis loop has to do with the saturation of the core and what this results in. The wider curve results in a higher inrush current due to higher core saturation and the appearance of higher harmonics. It is explained what are the ways to mitigate the inrush current and how the relay protection has an integrated precaution against detecting a short circuit in relation to the inrush current. As power converters are increasingly represented today, special attention is paid to pulse-width modulation. The result of this work is displayed in the Matlab program of what the inrush current looks like in simulation form.

Keywords: inrush current, transformer, higher harmonics, relay protection, remanent magnetism

ŽIVOTOPIS

Dominik Živković rođen je 21.05.1996. u Veroni. Obrazovanje započinje u Osnovnoj školi Matija Petar Katančić u Valpovu te 2011. godine upisuje Srednju školu Valpovo za zanimanje elektrotehničar. Školske godine 2014./2015. završava srednju školu obranom rada "Svjetleća reklama". Stručnu praksu tijekom srednje škole obavlja u HEP d.d. u Valpovu. Odmah nakon završetka srednje škole, 2015. godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Na drugoj godini studija odabire studijski blok elektroenergetika. Tijekom studiranja obavlja brojne studentske poslove kao i posao na ugovor u trajanju od godinu dana u TEO Belišće gdje stječe prvo radno iskustvo u struci. Trenutno je student u statusu dovršetka studija.

U Osijeku, 8.10.2021.

Dominik Živković
