

Uključivanje transformatora na mrežu

Vodolšak, Goran

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:754538>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

UKLJUČIVANJE TRANSFORMATORA NA MREŽU

Rijeka, kolovoz 2022.

Goran Vodolšak

0069081570

SVEUČILIŠTE RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

UKLJUČIVANJE TRANSFORMATORA NA MREŽU

Mentor: doc. dr. sc. Rene Prenc

Rijeka, kolovoz 2022.

Goran Vodolšak

0069081570

Rijeka, 21. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**
Predmet: **Električni strojevi**
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Goran Vodolišak (0069081570)**
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike**

Zadatak: **Uključivanje transformatora na mrežu / Inrush magnetizing currents of a transformer**

Opis zadatka:

U radu će se najprije opisati općenit princip rada transformatora. Opisat će mu se gubici i karakteristična pogonska stanja. Prilikom toga proučit će se potrebne zaštite koje omogućuju siguran i trajan rad transformatora. Uz sve navedeno spomenuti će se i posebne izvedbe transformatora. Konačno, simulacijom u programskom paketu MATLAB obradit će se uključenje transformatora na mrežu u praznom hodu. Pri tome će se poseban osvrt dati na iznos i valni oblik struje uključjenja 3. harmonika.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

G. Vodolišak

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Doc. dr. sc. Rene Prenc

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



Prof. dr. sc. Viktor Sučić

IZJAVA

Ja, Goran Vodolšak izjavlujem da je moj završni rad "Uključivanje transformatora na mrežu" izrađen samostalno pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Rene Prenca prema članku 8. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija.

G. Vodolšak

Sadržaj

1. UVOD	1
2. TRANSFORMATOR	2
2.1. Princip rada transformatora	2
2.2. Podjela transformatora	3
2.2.1. Podjela transformatora s obzirom na primjenu.....	3
2.2.2. Podjela transformatora prema načinu hlađenja	6
2.2.3. Podjela transformatora prema vrsti spoja	7
2.3. Konstrukcija transformatora	8
3. KARAKTERISTIČNA POGONSKA STANJA	11
3.1. Prazni hod	11
3.2. Kratki spoj	13
3.3. Opterećenje	14
4. GUBITCI	16
4.1. Magnetski gubici	16
4.1.1. Gubici zbog vrtložnih struja	16
4.1.2. Gubici zbog histereze	18
4.1.3. Gubici rasipnog magnetskog toka	20
4.2. Električni gubici	22
5. ZAŠTITE	24
5.1. Diferencijalna zaštita	25
5.2. Plinska zaštita (Buchholtzov relej)	25
5.3. Zemljospojna / homopolarna zaštita	26
5.4. Niskopodesiva i visokopodesiva nadstrujna zaštita	27
5.5. Distantna zaštita	28
6. UKLAPANJE TRANSFORMATORA NA MREŽU U PRAZKOM HODU	29
6.1. Uklopna struja	30
6.2. Utjecaj uklopne struje na transformator	33
6.3. Pojava viših harmonika	34
6.4. Utjecaj uklopne struje u praznom hodu	35
6.5. Simulacija uključivanja transformatora u praznom hodu	36
7. ZAKLJUČAK	43
8. LITERATURA	44
9. SAŽETAK	45

1.UVOD

Primjena transformatora u današnje vrijeme je široka. Susrećemo ih od pogonima sve do uređaja u svakodnevnoj primjeni. Njihova najveća važnost jest u elektroenergetskim sustavima čija su i ključna komponenta. U samim elektroenergetskim sustavima imamo nekoliko izvedbi transformatora koje primjenjujemo, a to su energetske transformatori za pretvaranje i prijenos energije, mjerni transformatori za razna testiranja, zaštitni transformator kojim se štiti oprema i ljudi kod pojave neželjenih stanja u mreži. Svi navedeni transformatori moraju biti kvalitetno dizajnirani na načina da izdrže naprezanja bila to mehanička, električna ili toplinska.

U ovom završnom radu proučena su područja rada, princip rada, stanja u kojem možemo zateći transformator te opasnosti do kojih može doći prilikom rada. Kao što je vidljivo u drugom poglavlju objašnjen je transformator tj. njegov princip rada, podjela i dijelovi od kojih se sastoji. Ovo poglavlje važno je kako bi kasnije mogli razmatrati ostala poglavlja te objasniti pogonska stanja i gubitka transformatora. Pogonska stanja detaljnije su objašnjena u trećem poglavlju gdje vidimo kako iz svakog stanja možemo saznati neke od parametara transformatora čiji su iznosi važni prilikom odabira i puštanja transformatora u pogon. Četvrto poglavlje ili gubici transformatora sadrži informacije o tome kako napon i struja utječu na gubitke unutar transformatora. Također su spomenuta razna rješenja kako da iznos tih gubitaka zadržimo u prihvatljivim razinama tako da ne utječu na rad i životni vijek transformatora. U petom je poglavlju opisana zaštita transformatora čime se je ponajviše dalo posebnog značaja energetskom transformatoru zbog njegove primjene i rasprostranjenosti u elektroenergetskom sustavu. Kasnije u šestom poglavlju posvećen je poseban osvrt na uključenje transformatora na mrežu te je pomnije proučena struja uključanja 3. harmonika i prikazana je simulacijom u programskom paketu MATLAB.

2. TRANSFORMATOR

Transformatori su temeljni i najrasprostranjeniji elementi elektrotehničkih sustava, a od posebne važnosti je njihova uloga u elektroenergetskom sustavu. Njihov razvoj započinje 1831.godine Faradayevim otkrićem stvaranja električne struje pomoću magnetskog polja. Nastavkom tog razvoja 1885. godine predstavljen je prvi transformator. Transformatori su električni uređaji koji se sastoji od dvije ili više zavojnica koje se koriste za prijenos električne energije pomoću magnetskog polja. Ovisno o njegovom dizajnu može se koristiti za smanjenje ili povećanje amplitude napona. Ne sastoji se od pokretnih dijelova sukladno tome nema mehaničkih gubitaka te mu je zbog toga osiguran dug radni vijek u normalnim uvjetima rada. Iako postoje gubitci oni su relativno mali u normalnom pogonu te je zbog toga transformator veoma ekonomični stroj.[1][2]

2.1. Princip rada transformatora

Princip rada transformatora promatrat ćemo kada se nalazi u osnovnom pogonskom stanju – opterećenje. Kada je transformator pod opterećenjem na sekundarne stezaljke priključeno je trošilo. U ovom je stanju najjednostavnije opisati njegov rad.

Priključimo li stezaljke primarnog namota na izvor izmjeničnog napajanja, a na sekundarne spojimo trošilo kroz primarni namot poteče izmjenična sinusoidalna struja I_1 . Ta struja prolazeći kroz namote stvara izmjenično magnetsko polje. Za to vrijeme smjer silnica se ponaša kao sinusoida tj. kreće od nule raste do maksimalnog broja silnica pa nakon toga pada na nulu raste u suprotnom smjeru do maksimuma zatim pada do nule te se proces ponavlja. Promjenjive silnice prolaze kroz jezgru koja pripada sekundarnima namotima. U njima se prema Faradayu inducira napon koji je sinusoidalan zbog sinusoidalnog magnetskog polja. Jačina magnetskog polja koja prolazi jezgrom ovisi o broju zavoja namota i veličini primarne struje. Iznos induciranog napona na sekundarnim stezaljkama dobijemo preko faradayevog zakona :[3]

$$u = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Iako pomoću transformatora mijenjamo amplitudu napona i struje njihova frekvencija ostaje nepromijenjena.

2.2. Podjela transformatora

Razvojem transformatora uvidjelo se da ne možemo imati jedan univerzalan transformator jer nam je uvijek cilj da odaberemo najekonomičnije rješenje. Stoga su se s vremenom počeli pojavljivati transformatori koji su konstruirani da točno služe određenoj svrsi. Danas imamo nekoliko grupa u koje dijelimo transformatore kao što su prema snazi, vrsti hlađenja, broju faza itd.

2.2.1. Podjela transformatora s obzirom na primjenu

S obzirom na primjenu transformatore konstruiramo prema sljedećim skupinama

- Energetski transformatori
- Mjerni transformatori
- Autotransformatori

Energetski transformatori

Nazivaju se još i učinkivi transformatori te su jedni od najrasprostranjenijih i najpoznatijih tipova transformatora koji se danas koriste. Njihova najznačajnija upotreba vidljiva je u prijenosu i distribuciji električne energije pomoću dalekovoda. Glavna uloga im je spuštanje i podizanje naponske razine. Podizanje naponske razine radi se ukoliko imamo velike daljine prijenosa električne energije kako bi izbjegli velike gubitke električne energije. Kada ta ista električna energija stigne do odredišta (kuće, zgrade...) potrebno ju je smanjiti na propisanu naponsku razinu – 240[V]. Dijelimo ih na male, srednje i velike energetske transformatore. Mali transformator imaju raspon snage od 500 do 7500 [kVA], srednji transformatori od 7500 [kVA] do 100 [MVA], a veliki transformatori su od 100 [MVA] na više.[4]



Slika 2.1. Elektroenergetski transformator

Mjerni transformatori

Mjerni transformatori koriste se za transformiranje mjerenih napona i struja u gotovo stalnom omjeru i s minimalnim ili bez faznog pomaka. Vrijednosti s kojima radimo su one prikladne za napajanje mjernih instrumenata, zaštitnih i regulacijskih uređaja. Sastoje od jezgre izrađene od magnetskog materijala te od primarnog i sekundarnog namota koji su međusobno odvojeni i izolirani prema visini napona u mjerenom krugu. Primarni se namoti priključuju u mjereni krug, a na sekundarne se priključuju mjerni instrumenti ili zaštitni uređaji.[5] Osnovne prednosti ovih transformatora su :

- serijska proizvodnja transformatora jer je broj mjernih, zaštitnih i regulacijskih instrumenata i uređaja smanjen zbog toga što se mjereni naponi i struje različitih nazivnih vrijednosti transformiraju se u uvijek iste nazivne vrijednosti
- koriste se za zaštitu mjernih instrumenata i uređaja od visokih napona
- mogućnost postavljanja mjernih instrumenata i uređaja na najpovoljnije mjesto za upravljanje jer su mjerni instrumenti i uređaji prostorno udaljeni od mjerelog strujnog kruga
- udaljavajući mjerne instrumente i uređaje od mjerelog strujnog kruga sprečava se da na rad instrumenata utječu često snažna magnetska i električna polja mjerelog kruga;
- posebnim izvedbama mjernih transformatora zaštićuju se mjerni instrumenti i uređaji od štetnoga dinamičkog i termičkog učinka struja kratkog spoja u mjerenom strujnom krugu;

Upotrebljavaju se dvije vrste mjernih transformatora: naponski i strujni.



Slika 2.2. Mjerni transformator marke Končar

Autotransformatori (transformator u štednom spoju)

Autotransformatori nisu građeni kao tipični dvonamotni transformatori već su građeni od jednostrukog namota koji je podijeljen na 2 dijela : zajednički i serijski dio. Dijelovi namota su električki povezani pa se energija između osim elektromagnetskim putem prenosi i galvanskim putem. Ovakav se transformator koristi kao regulator napona, gdje su potrebni visoki naponi poput pojačivača ili pojačala, u laboratorijima za kontinuirano dobivanje promjenjivog napona, u elektranama gdje se napon mora smanjiti i pojačati kako bi izjednačio napon na prihvatnom kraju koji je potreban uređaju itd.

Prednosti autotransformatora su :

- Manji su i isplativiji u odnosu na dvonamotni transformator
- Njihova učinkovitost je visoka
- Struja pobude je manja u odnosu na dvonamotni transformator
- Promjena naponske razine odvija se (lako i glatko)
- Manji utrošak bakra, sukladno tome uz veliku učinkovitost i manji gubitci

Nedostatci autotransformatora su :

- Primarni i sekundarni namot ne mogu biti međusobno izolirani
- Primjena ovog transformatora je ograničena u područjima gdje je potrebna mala varijacija izlaznog napona u odnosu na ulazni
- Električna povezanost između primarne i sekundarne strane (u slučaju prekida namota cijeli primarni napon se šalje na sekundar)
- Ne smije se koristiti kao zaštitni transformator



Slika 2.3. Autotransformator

2.2.2. Podjela transformatora prema načinu hlađenja

Uz prolazak struje kroz namote transformatora stvaraju se gubici koji se očituju u obliku topline. Ta disipacija snage odnosno toplina dugotrajnim utjecajem imala bi nepovoljan utjecaj na životni vijek transformatora. Da bi se to spriječilo transformator se mora hladiti odnosno toplina se mora odvest. To se radi na jedan od sljedeća dva načina.

Suhi transformatori

Većina suhih transformatora naziva se još i zračni. Ova vrsta transformatora ima mnoge prednosti, jedna od njih je činjenica da se cijeli magnetski sustav i njegova dva namotaja neće uranjati u kotao s

uljem. Međutim i dalje moramo imati neki proces hlađenja, a u ovom slučaju on se odvija protokom zraka kroz transformator. Kako bi se povećao protok kod ovakvog tipa transformatora se ugrađuju ventilatori što rezultira u povećanom odvođenju topline iz transformatora.[6] Zbog svojih loših izolacijskih svojstava ovim načinom hlađenja se hlade transformatori napona do 10 [kV].

Prednosti suhog transformatora :

- Nema redovitih izmjena ulja
- Jednostavan i siguran uređaj (ne sadrži ulje pa nema opasnosti od curenja ulja i mogućeg zapaljenja istog)
- Ekološka sigurnost - aktivno se koriste u školskim prostorima i raznim poduzećima
- Preopterećenje je moguće, ali na kratko vrijeme

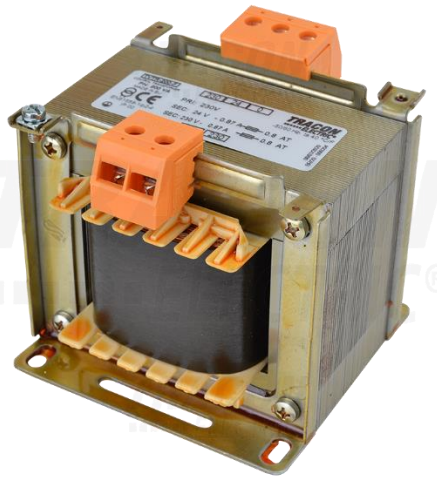
Uljni transformatori

Uljni transformatori za razliku od suhих (zračnih) kao sredstvo hlađenja koriste izolacijsku tekućinu tzv. ulje. Izolacijska tekućina mora biti velikog specifičnog toplinskog kapaciteta. Ovaj način hlađenja prikladan je za hlađenje transformatora velikih snaga i visokih napona. Dimenzionirani su za nazivne snage od 50 [kVA] do 2500 [kVA] te maksimalni pogonski napon od 36 [kV] . Ovisno o konstrukciji ovih transformatori prikladni su za rad u zatvorenom i otvorenom prostoru.

2.2.3. Podjela transformatora prema vrsti spoja

Jednofazni transformatori

Jednofazni transformatori su transformatori koji imaju dva odvojena namota, primarni i sekundarni sa zajedničkom jezgrom. Njihov princip rada objašnjen je u sekciji 2.1. Ova vrsta spoja pogodna je za lakše električne uređaje. Opskrba električnom energijom preko jednofaznih transformatora je jednostavno i preferirano rješenje.



Slika 2.4. Jednofazni transformator

Trofazni transformatori

Pojavom trofazne struje i njenom sve većom primjenom rezultiralo je konstruiranjem trofaznih transformatora. Prva ideja bila je da se koriste tri jednofazna transformatora spojena u trofazni spoj. Ta solucija se koristi i danas najviše u SAD-u. Druga ideja koja je zastupljena u Europi je da koristimo jedan trofazni transformator gdje su tri primarna namotaja povezani zajedno i tri sekundarna namotaja povezana zajedno. Namotaje možemo povezivati tako da napravimo jedan od 3 karakteristična načina povezivanja, a to su trokut, zvijezda ili slomljena zvijezda (cik-cak spoj). Vremenom se pokazalo da je korištenje jednog trofaznog transformatora jeftinije za 20% u odnosu na tri jednofazna transformatora ponajviše zbog cijene konstrukcijskog materijala te zbog dvostrukog broja izolatora. Iako je cijena nešto viša izvedba s 3 jednofazna transformatora se i dalje koristi u SAD-u zbog nekih prednosti.

2.3. Konstrukcija transformatora

Konstrukcija transformatora je važna stavka koja mora biti uzeta u obzir prilikom projektiranja transformatora. Transformator mora biti konstruiran na takav način da kroz rad bude opterećen sa što manje naprezanja, što mehaničkih tako i električnih i toplinskih. Ta naprezanja nastaju prirodnim pojavama ili pri radu kod nastanka električnog luka i slično. Ovisno o zahtjevima, područjima gdje se primjenjuju i zadaćama koje moraju obaviti transformatori su različitih dimenzija i tipova. Što je veća

snaga za koju su projektirani to će transformatori biti veći i robusniji čime povećavamo njihovu površinu, a ujedno i površinu hlađenja.[7]

Dijelovi transformatora :

- Kotao
- Namoti
- Magnetska jezgra
- Konzervator
- VN i NN priključci

Kotao – hermetički zatvoreno kućište čije su stijenke napravljene od čeličnog lima, a služi da se u njega polaže jezgra s namotima kao i ostali dijelovi transformatora. Hermetička zatvorenost kotla mora se osigurati zbog ulja koje se nalazi u njemu.

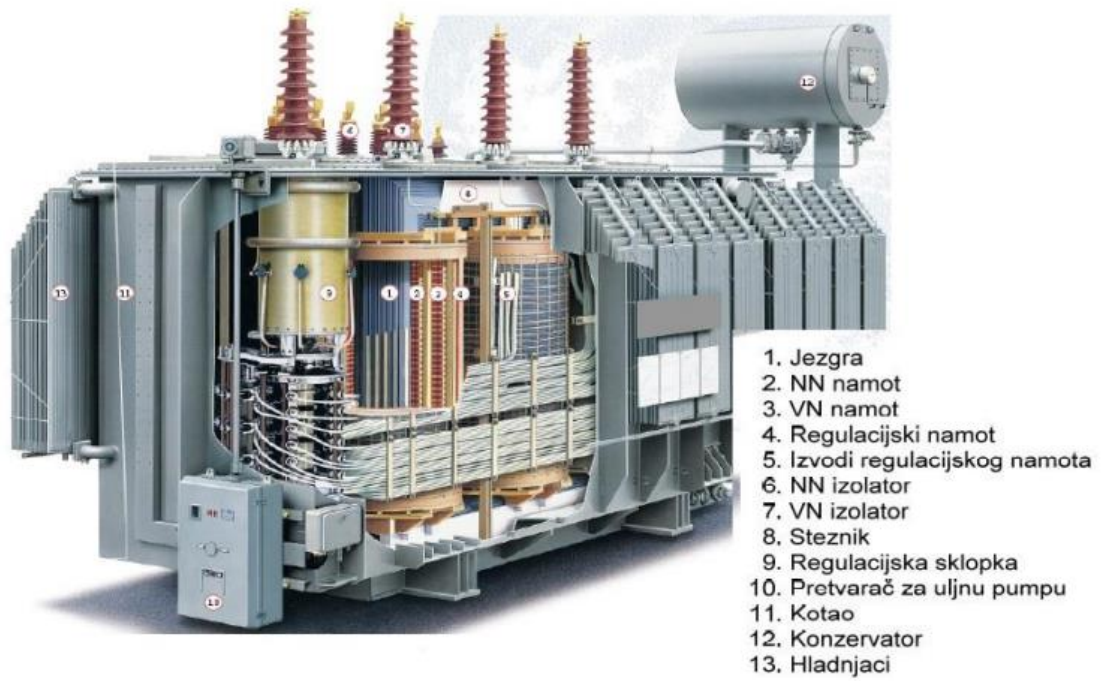
Namoti – međusobno izolirani bakreni vodovi smješteni oko stupova jezgre. Vrsta izolacije ovisi o snazi transformatora; za veće snage koristi se papirnata izolacija, a za manje je dovoljan lak. Postoji više vrsta namota :

- NN (niskonaponski) namot
- VN (visokonaponski) namot
- RN (regulacijski) namot

Magnetska jezgra – sastoji se od stupa, namota koji se nalazi na stupu jezgre te jarma koji povezuje stupove i na taj način zatvara magnetski krug. Služi za prijenos magnetskog toka iz jednog namota na drugi, a sastavljena je od niza pločica međusobno električno izoliranih radi smanjivanja gubitaka odnosno izbjegavanja vrtložnih struja.

Konzervator – je spremnik izrađen od metala smješten na vrhu transformatora, a dio je sustava zaštite. Unutar njega nalazi se određena količina rezervnog ulja i omogućuje da se ulje proširi u njega uslijed naglog povećanja temperature odnosno povećanja volumena. Kada se poveća volumen ulja zrak se odvodi iz konzervatora, a kada se volumen ulja smanji zrak se dovodi. Dovođenje zraka odvija se preko dehidratora koji sakuplja vlagu iz zraka prije ulaska u konzervator. Dehidrator je ispunjen kristalima silicagela koji na sebe sakupljaju vlagu.

VN i NN priključci – to su tzv. provodni izolatori, a oni služe kao izvedeni priključci namota izvan transformatora



Slika 2.5. Detaljan prikaz dijelova transformatora

3. KARAKTERISTIČNA POGONSKA STANJA

Prilikom rada transformator se može naći u jednom od 3 karakteristična pogonska stanja :

- Prazni hod
- Kratki spoj
- Opterećenje

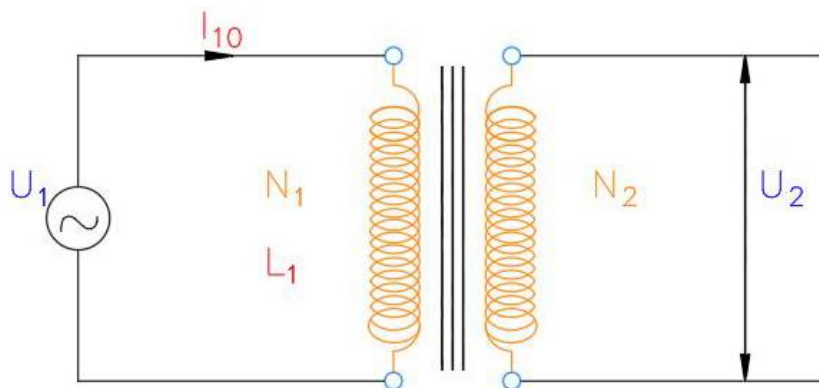
Prije nego što se transformator pusti u rad potrebno ga je provesti kroz sva tri stanja.

3.1. Prazni hod

Prazni hod transformatora postiže se na način da mu se primarne stezaljke spoje na izvor izmjeničnog napona, a sekundarne stezaljke drže otvorenima; nema priključenog trošila. Za to je vrijeme struja u sekundarnom krugu jednaka nuli. Kroz primarni namot tada teče struja koja je potrebna za održanje magnetskog toka i kojom će se u transformator unositi energija potrebna za pokriće gubitaka histereze i vrtložnih struja. Struja koja teče kroz primarni namot za vrijeme praznog hoda iznosi 2-5% nazivne vrijednosti struje.[8]

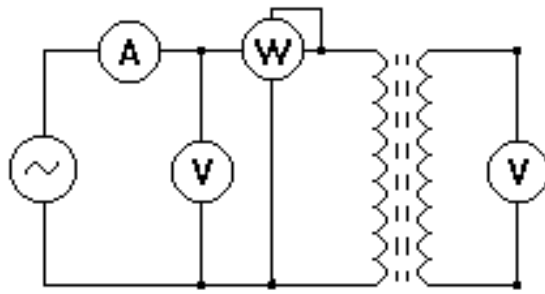
Osnovni ciljevi provođenja praznog hoda su određivanje:

- gubitaka praznog hoda (približno jednaki gubicima u željezu),
- struje praznog hoda,
- parametara ekvivalentne sheme.



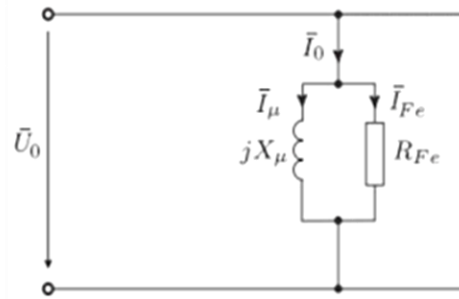
Slika 3.1. Pojednostavljeni prikaz praznog hoda transformatora

Pokus praznog hoda



**POKUS PRAZNOG HODA
TRANSFORMATORA**

a)



b)

Slika 3.2. Prikaz pokusa praznog hoda (a) te pripadajućih relevantnih impedancija (b)

Za pokus praznog hoda (slika 3.2. a) se na transformator priključe mjerni instrumenti koji mjere oba napona, primarnu struju i snagu (na slici to je vatmetar koji mjeri gubitke). Aktivna snaga P_0 koju mjeri vatmetar je snaga gubitaka u željeznoj jezgri. Osim mjerenja magnetskih gubitaka u tom se spoju može izmjeriti prijenosni omjer transformatora. Iz slike 3.2. b uočavamo da su elementi vodoravne grane R_1 i $X_{1\sigma}$ zanemareni, a razlog tome je da su gubitci u bakru pri uobičajenim strujama praznog hoda $I_0 = 0.15 \cdot I_n$ (3.1) vrlo mali.[7]

Možemo ju iskazati postotno :

$$i_{0\%} = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Jedna od najvažnijih veličina jest struja magnetiziranja I_μ koja nam govori kolika je struja potrebna za magnetiziranje jezgre, a ona sa strujom gubitaka u željezu I_{Fe} čini struju praznog hoda I_0 .

Struju magnetiziranja možemo prikazati izrazom :

$$I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_{Fe}^2} \quad (3.3)$$

Gubitke u željeznoj jezgri (snaga koju mjeri vatmetar) dobiti ćemo umnoškom napona praznog hoda i struje praznog hoda :

$$P_0 = P_{Fe} = U_0 \cdot I_0 \quad (3.4)$$

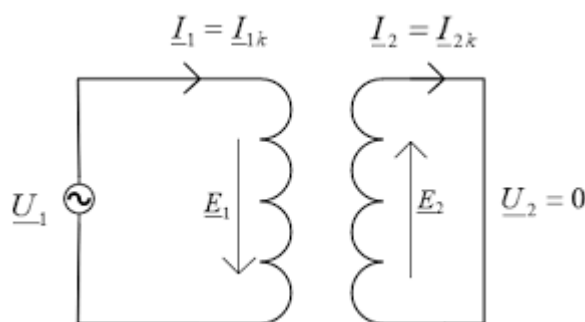
Faktor snage praznog hoda dobivamo iz izraza :

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_0 \cdot I_0} \quad (3.5)$$

Potrebno je napomenuti da se, kod transformatora koji na sekundaru imaju niži napon nego na primaru, pokus praznog hoda provodi priključenjem sekundarnog namota na izvor napona, dok su priključne stezaljke na primarnoj strani otvorene.

3.2. Kratki spoj

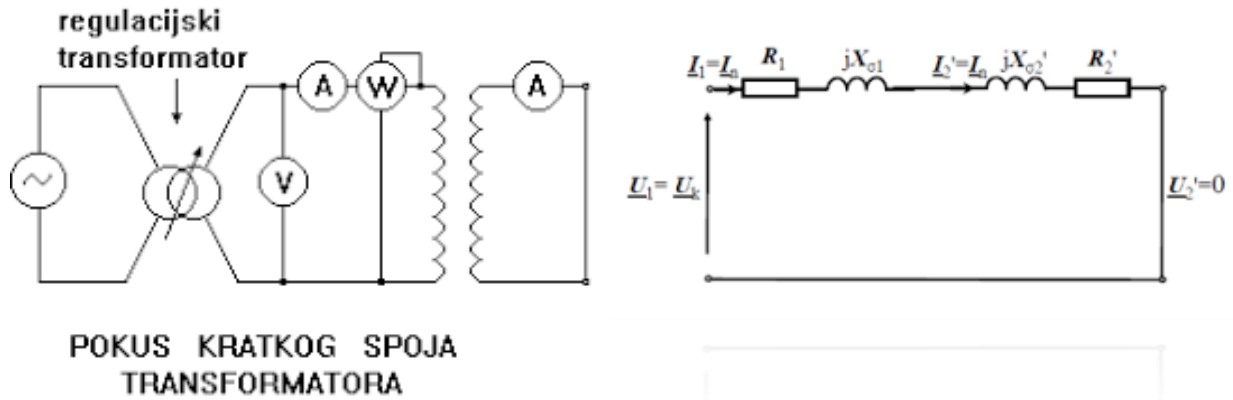
Transformator je u pogonskom stanju kratkog spoja ukoliko mu su mu primarni namoti spojeni na izvor izmjeničnog napajanja, a stezaljke sekundarnog namota kratko spojene. Za vrijeme pogonskog kratkog spoja napon na sekundaru jednak je nuli, a struja koja teče kroz sekundar je od 10 do 25 puta veća od nazivne. Zbog tako velikog iznosa struje dolazi do zagrijavanja, a struja koja teče kroz poprečne elemente je zanemariva. Struja i napon kratkog spoja važne su stavke čije veličine treba znati prilikom projektiranja transformatora. Pojava struje kratkog spoja svojom veličinom može dovesti do uništenja transformatora pa odgovarajućom zaštitom i relejima treba osigurati da ne dođe do toga.[8]



Slika 3.3. Pojednostavljeni prikaz kratkog spoja

Pokus kratkog spoja

Pokus kratkog spoja transformatora provodi se u sigurnom okruženju u laboratorijima. Kao što je objašnjeno u uvodu kratkog spoja, sekundarne stezaljke su mu kratko spojene, a primarne su spojene na regulacijski transformator. Regulacijski transformator se koristi kako bi mogli postepeno povećavati napon na primaru. Kako povećavamo napon istovremeno mjerimo struju. Taj proces traje sve dok ne očitamo nazivnu struju. Napon pri kojem smo očitali nazivnu struju nazivamo napon kratkog spoja, a njegov iznos je oko dvadeset puta manji od nazivnog.[7]



3.4. Prikaz kratkog spoja te pripadajućih relevantnih impedancija

Najvažnija stavka u pokusu kratkog spoja je napon kratkog spoja, a njega možemo izraziti kao postotak nazivnog napona primara :

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1n}} \cdot 100\% = \frac{I_{1n} Z_k}{U_{1n}} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

Aktivna snaga koju mjeri vatmetar predstavlja toplinske gubitke na radnim otporima primarnog i sekundarnog namota i dobiva se preko izraza :

$$P_k = U_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k \quad (3.7)$$

Faktor snage u slučaju kratkog spoja dobivamo :

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_k \cdot I_k} \quad (3.7)$$

Impedancija kratkog spoja Z_k može se izračunati kao :

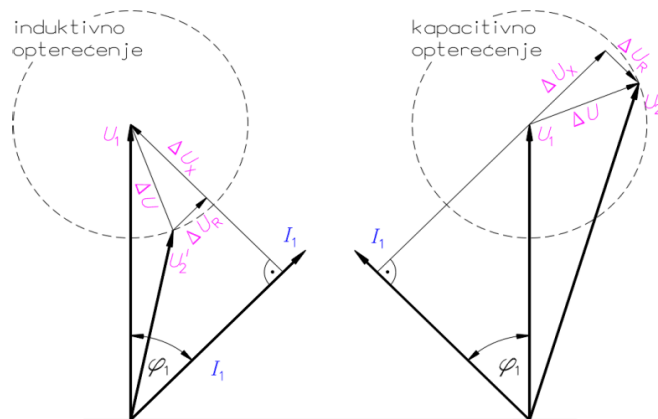
$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} \quad (3.8)$$

3.3. Opterećenje

Najčešće pogonsko stanje transformatora je upravo opterećenje odnosno kada je na sekundarnim stezaljkama priključeno trošilo.[8] Prilikom praktičnog razmatranja opterećenja transformatora, često se umjesto cijele nadomjesne sheme koristi pojednostavljena shema koja ne sadrži poprečnu granu. Pojednostavljena shema se koristi jer nas više zanima kakvog je karaktera trošilo priključeno na sekundar. Napon na sekundaru uvelike ovisi o karakteru trošila, a ono može biti u rasponu od induktivnog do kapacitivnog. Njegov karakter određen je faktorom snage $\cos \varphi$. Na slici prikazana su 2 slučaja opterećenja :

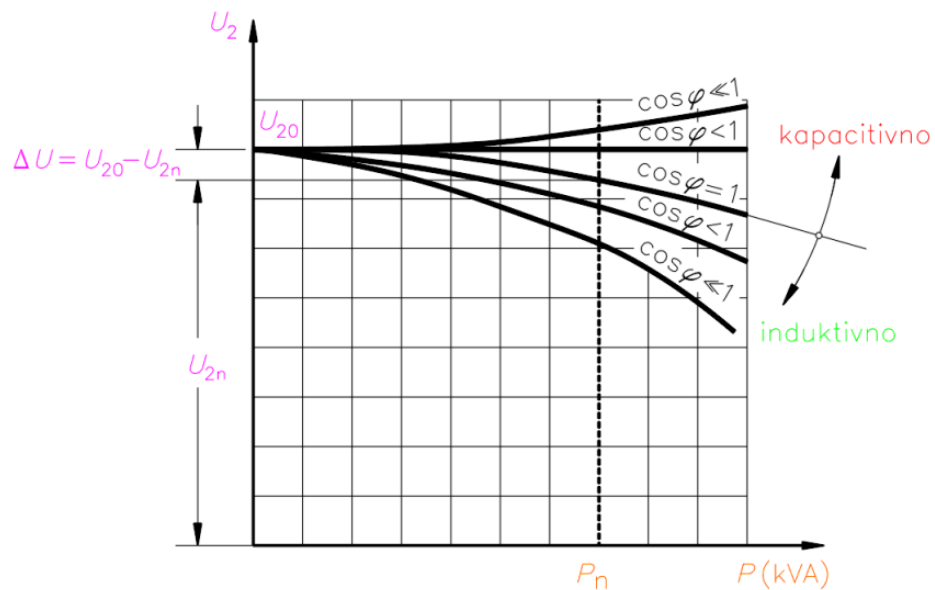
- Induktivno $U_1 > U'_2$

- kapacitivno $U_1 < U'_2$



Slika 3.5. Vektorski prikaz napona pri induktivnom i kapacitivnom opterećenju

Na slici 3.6. prikazano je kako karakter trošila utječe na pad napona sekundara. Pri induktivnom trošilu imamo najveći pad napona, pri djelatnom nešto manji dok kod kapacitivnog napon raste.



Slika 3.6. Grafički prikaz opadanja sekundarnog napona ovisno o karakteru trošila

4. GUBITCI

Kao i svaki realni stroj tako i transformator tijekom svog rada radi sa gubitcima. To znači da ulazna snaga u transformator neće biti jednaka izlaznoj snazi već će ona biti umanjena za gubitke. Za razliku od drugih strojeva transformator nema pokretnih dijelova pa sukladno tome nema trenja i ne obavlja se mehanički rad pa nema mehaničkih gubitaka. Gubici unutar transformatora direktno su vezani sa zagrijavanjem pa određenim načinima namatanja namota, hlađenja transformatora, odabirom ispravnog transformatora itd. ih smanjujemo odnosno držimo u nekih prihvatljivim granicama. Iako su gubici manji u odnosu na druge strojeve njih ne možemo zanemariti. Dijelimo ih na magnetske i električne.

4.1. Magnetski gubici

Magnetski gubici, gubici praznog hoda ili gubici u željezu su gubici koji nastaju u željeznoj jezgri transformatora, a zaslužni su za zagrijavanje jezgre. Razmatranje ovih gubitaka vrlo je važno ukoliko želimo optimizirati učinkovitost transformatora. Njihov nastanak vezan je isključivo za napon, s kojim su i proporcionalni, dok je jakost struje u namotajima nevezana za magnetske gubitke. Ukoliko imamo viši napon i gubici će biti veći. Budući da je transformator stalno pod naponom jezgra će trošiti znatnu količinu energije. Dijele se na gubitke vrtložnih struja, gubitke petlje histereze i na gubitke rasipnog toka.[9]

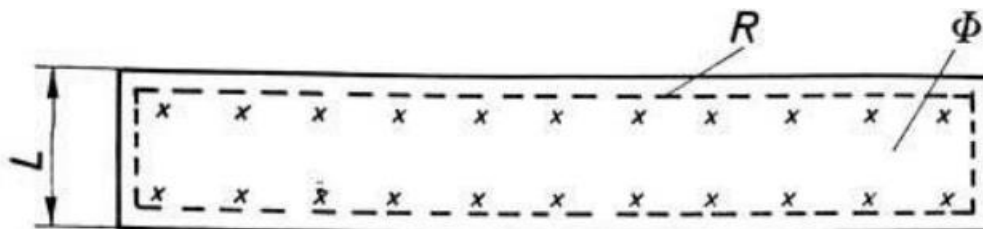
4.1.1. Gubici zbog vrtložnih struja

Kako bi bolje shvatili gubitke vrtložnih struja najprije treba objasniti što su vrtložne struje. Vrtložne struje su kratko spojene strujne petlje koje su nastale zbog promjenjivog magnetskog polja u vodiču. Unutar vodiča teku u zatvorenim petljama, po ravninama okomitim na magnetsko polje. Jačina vrtložne struje određena je jačinom magnetskog polja, brzinom promjene magnetskog toka i površinom petlji. Vrtložne struje također stvaraju svoje magnetsko polje, a ono se suprotstavlja polju od kojeg su nastale. Kod transformatora vrtložne struje su nepovoljne jer one prolazeći kroz jezgru zagrijavaju je.

Gubitke u željeznoj jezgri možemo prikazati :

$$P_1 = \frac{E^2}{R} = k \frac{(\Phi \cdot f)^2}{R} \quad (4.1)$$

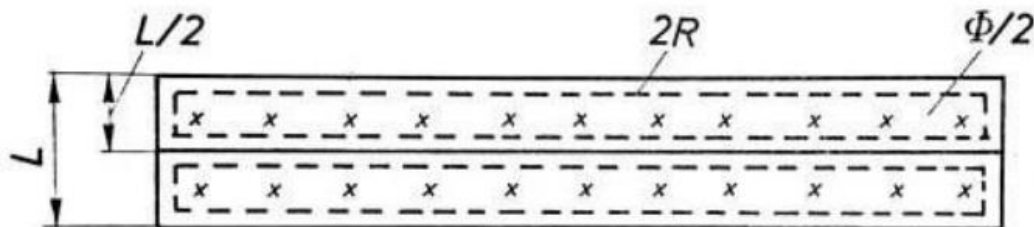
pri čemu je f frekvencija čijom promjenom u zavoju koji je obuhvaćen magnetskim tokom inducira se napon. Snaga P_1 će biti pretvorena u toplinu. Izraz za snagu dobiven je iz presjeka željeza.



Slika 4.1. Prikaz jezgre transformatora

Ako jezgru podijelimo na 2 jednaka dijela (slika 4.2.) primjećujemo značajno smanjenje u snazi. Razdjeljivanjem jezgre na 2 dijela magnetski tok Φ u jednom dijelu iznosi $\Phi/2$, a njegovim smanjivanjem smanjio se i inducirani napon. Kako snaga direktno ovisi o naponu tako se i ona smanjuje. Smanjivanjem presjeka za pola otpor se povećava 2 puta jer su presjek i otpor obrnuto proporcionalni. U ovom trenutku snaga (gubitci) iznosi :

$$P_2 = 2 \frac{(E/2)^2}{2R} = \frac{E^2}{4R} = \frac{P_1}{4} \quad (4.2)$$



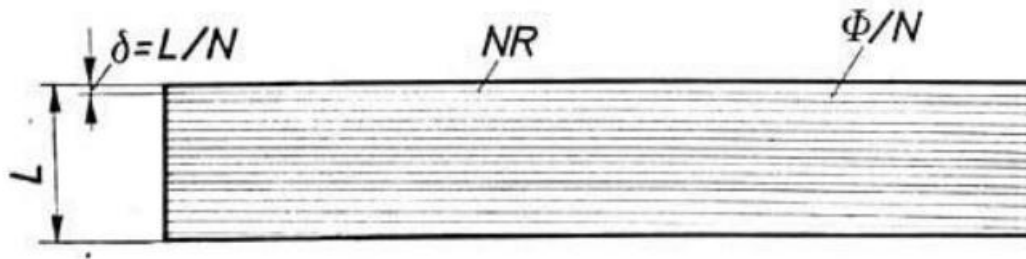
Slika 4.2. Prikaz jezgre transformatora podijeljene na 2 jednaka dijela

Ovaj proces možemo nastaviti dalje pa jezgru podijelimo na N jednakih dijelova (slika 4.3.). Uočavamo da se snaga smanjuje s kvadratom dijelova na koje smo podijelili jezgru. Pri tome debljina jednog dijela iznosi :

$$\delta = \frac{L}{N} \quad (4.3)$$

To nam daje mnogo efikasniju jezgru jer možemo kontrolirati njene gubitke. Snaga kod jezgre sastavljene od N jednakih dijelova iznosi :

$$P_N = N \frac{(E/N)^2}{N \cdot R} = \frac{P_1}{N^2} \quad (4.4)$$

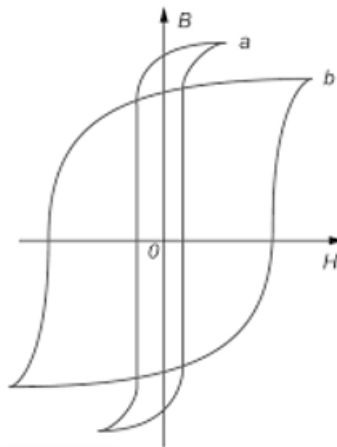


Slika 4.3. Prikaz jezgre transformatora podijeljene na N jednakih dijelova

Gubitci vrtložnih struja sada će nastati zbog induciranja napona u svakom dijelu jezgre. Ti dijelovi napravljeni su od limova. Pošto želimo svesti gubitke na minimum odnosno na zanemarivu veličinu limovi se izrađuju reda veličine μm te se još međusobno izoliraju. Kako bi se još dodatno smanjili utjecaji vrtložnih struja žice od kojih je napravljena zavojnica izrađuju se s manjim poprečnim presjekom (smanjivanje omskog otpora). Sa ovim metodama utjecaj vrtložnih struja smanjen je na takvu razinu da prilikom razmatranja transformatora možemo koristiti jednadžbe idealnog transformatora.

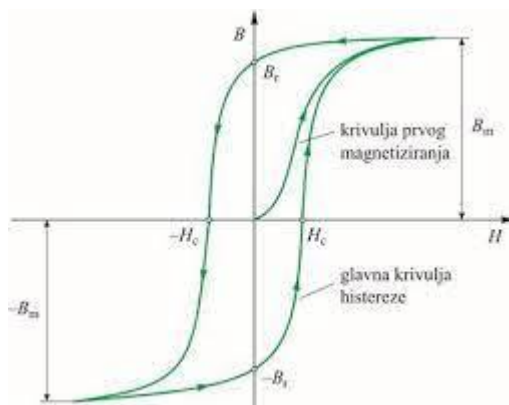
4.1.2. Gubitci zbog histereze

Histereza ili magnetska histereza je pojava koja opisuje kašnjenje magnetske indukcije u ovisnosti promjene jakosti magnetskog polja. Do njene pojave dolazi u materijalima u kojima se inducira magnetsko polje. To su feromagnetski materijali i ovisno o vrsti histereza je veća ili manja (veća za tvrdo željezo, a manja za meko željezo slika 4.4).



Slika 4.4. Grafički prikaz petlje histereze kod a) mekog željeza, b) tvrdog željeza

Gubitci histereze nastaju prilikom magnetiziranja željeza. Glavni uzrok njihovog nastanka jest pojava trenja između čestica željeza koje neprestano titraju odnosno zbog frekvencije mijenjaj svoj smjer (za frekvenciju od 50Hz mijenjaju usmjerenje 50 puta u sekundi). Željezu se dovodi i odvodi određena količina energije, no uvijek je manja ona odvedena. Taj umanjeni dio upravo je jednak površini petlje histereze. Krivulju prvog magnetiziranja dobivamo ukoliko povećavamo jakost magnetskog polja H do njegove maksimalne vrijednosti H_m . Nakon toga postepeno smanjujemo struju smanjuje se i jakost magnetskog polja H , dok se magnetska indukcija B ne mijenja tom brzinom tj. zaostaje. Kada jakost magnetskog polja H iznosi 0 magnetska indukcija poprima vrijednost B_r . Tu indukciju nazivamo još remanentna ili zaostala magnetska indukcija. Nakon toga počnemo povećavati struju ali u suprotnom smjeru te primjećujemo da magnetska indukcija smanjuje ali uz zadržavanje istog smjera. Smanjivanje se događa sve dok indukcija ne padne na nulu odnosno do trenutka kada magnetsko polje ima vrijednost $-H_c$. To polje nazivamo koercitivno polje. Jakost magnetskog polja nakon te točke opet počinje rasti, dok indukcija mijenja smjer i raste sve dok ne postigne iznos $-B_m$. Ponavljamo postupak u suprotnom smjeru, opet smanjujemo struju, a magnetska indukcija zaostaje te za vrijeme dok je jakost polja H jednaka nuli vrijednost magnetske indukcije biti će $-B_r$. Povećavanjem jakosti polja dobiva se koercitivno polje H_c na pozitivnoj stani. U toj točki vrijednost magnetske indukcije iznosi 0. Krivulja se nastavlja sve do točke H_m gdje se i zatvara. Ovaj postupak se ponavlja više puta sve dok ne dobijemo zatvorenu petlju koju nazivamo petlja histereza.



Slika 4.5. Petlja histereza s pripadajućom krivuljom prvog magnetiziranja

Kod transformatora petlja histereza očituje se zagrijavanjem željezne jezgre i na taj način stvaraju se gubitci. Ovisno o veličini maksimalne magnetske indukcije B_m i maksimalne jakosti polja H_m sukladno njima povećat će se ili smanjiti površina petlje histereze i to u ovisnosti kvadrata maksimalne magnetske indukcije. Relativne gubitke ćemo tada dobiti iz izraza :

$$p_{Fe,h} = k_h \cdot B_m^2 \cdot f \quad (4.5)$$

pri čemu je f frekvencija kojom je magnetizirano željezo, a k_h konstanta materijala.

Ne smije se zaboraviti da i masa željezne jezgre igra ulogu kod gubitaka histereze pa ćemo ukupne gubitke dobiti ako izraz za relativne $p_{Fe,h}$ pomnožimo sa masom željezne jezgre m_{Fe} .

$$P_{Fe,h} = p_{Fe,h} \cdot m_{Fe} \quad (4.6)$$

Kao i kod vrtložnih struja, tako i kod gubitaka histereze nastojimo da su oni što manji, a umanjujemo ih na način da se jezgra izrađuje od posebnih magnetskih vrsta željeza. Na taj način značajno se umanjuje magnetsko trenje sukladno tome i gubitci histereze.

4.1.3. Gubitci rasipnog magnetskog toka

Kao što je objašnjeno u ovom radu princip rada transformatora temelji se na prenošenju magnetskog toka stvorenog primarnim namotajima na sekundarne namotaje. U idealnom slučaju ovaj proces se

odvija bez gubitaka no u praksi je to malo drugačije. Uz glavni magnetski tok (onaj koji se prenosi) imamo i rasipni magnetski tok. Rasipni magnetski tok obuhvaća samo zavoje primara i sekundara. Taj tok je također promjenjivi magnetski top pa i on inducira napon u zavojima. Te napone predstavljamo kao padove napona te su nepoželjni jer smanjuju korisnost transformatora. Dobivamo ih ako pomnožimo rasipnu reaktanciju sa pripadajućom strujom. Reaktancije su određene jednadžbama :

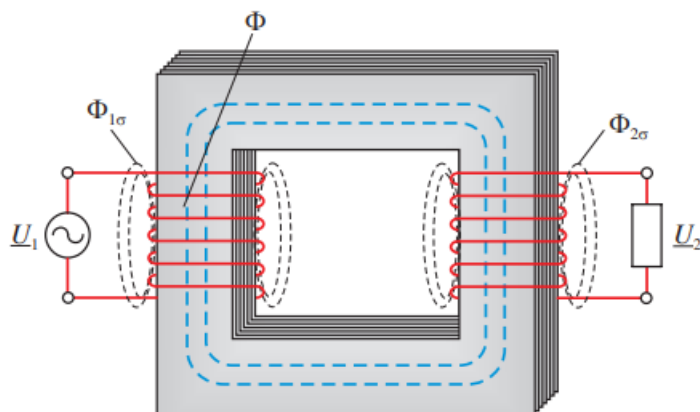
$$X_{\sigma_1} = \omega \cdot L_{\sigma_1} \quad (4.7)$$

$$X_{\sigma_2} = \omega \cdot L_{\sigma_2} \quad (4.8)$$

a naponi jednadžbama :

$$U_{x_1} = I_1 \cdot x_{\sigma_1} \quad (4.9)$$

$$U_{x_2} = I_2 \cdot x_{\sigma_2} \quad (4.10)$$



Slika 4.6. Prikaz glavnog i rasipnog magnetskog toka u željeznoj jezgri

Ovi gubici nemaju ni približan utjecaj kao oni zbog vrtložnih struja ili histereze pa ih najčešće kod izračuna zanemarujemo. Ukoliko ipak želimo znati kojeg su reda veličine ti gubici koristimo tzv. Blondelov faktor rasipanja. To je faktor koji karakterizira ukupno rasipanje transformatora, a prikazujemo ga izrazom :

$$\sigma = \frac{(L_1 \cdot L_2) - M^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{M^2}{L_1 \cdot L_2} \quad (4.11)$$

4.2. Električni gubitci

Električni gubitci koji se još nazivaju i gubitci u namotima ili gubitci kratkog spoja nastaju zbog zagrijavanja bakrenih namota. Do zagrijavanja namota dolazi zbog prolaska struje kroz njih, te su ovi gubitci za razliku od magnetski potpuno neovisni o naponu kojim se napajaju. Njihov iznos određujemo iz pokusa kratkog spoja. Veličine koje nas pri tome zanimaju su napon kratkog spoja U_k , struja kratkog spoja I_k i snaga u kratkom spoju P_k . Ove veličine (ponajviše struja) govore nam o maksimalnim slučajevima električnih gubitaka pa iz ovog pokusa poduzimamo odgovarajuće mjere kako bi se njihov utjecaj smanjio. Ukupne električne gubitke dobivamo iz zbroja gubitaka u namotajima primara i gubitaka u namotajima sekundara. Ukupni gubitci dobivaju se iz izraza :

$$P_{cu} = P_{cu_1} + P_{cu_2} \quad (4.12)$$

pri čemu su P_{cu_1} gubitci na primaru, a P_{cu_2} gubitci na sekundaru

Gubitke primara i sekundara dobivamo iz direktne ovisnosti o kvadratu njihove struje i radnog otpora bakra.

$$P_{cu_1} = I_1^2 \cdot R_1 \quad (4.13)$$

$$P_{cu_2} = I_2^2 \cdot R_2 \quad (4.14)$$

Iz ovih jednadžbi možemo zaključiti da ukoliko želimo smanjiti snagu koja otpada na gubitke moramo smanjiti ili struju ili otpor. Struja je veličina koju ne želimo mijenjati jer se žele zadržati podatci natpisne pločice transformatora, dok je otpor stavka koju možemo mijenjati. Ako znamo relaciju po kojoj dobivamo otpor lako možemo utjecat na njegovu veličinu.

$$R = \rho \frac{l_{cu}}{q} \quad (4.15)$$

l_{cu} – duljina vodiča

ρ – specifični otpor bakra

q – presjek vodiča

To ćemo napraviti tako da povećamo presjek vodiča. Iako razumno rješenje ono nije prihvaćeno u praksi jer i dalje imamo problem zagrijavanja tih namota. Praksa je pokazala da je najbolje rješenje hlađenje. Hlađenju se pristupa na način da ulje struji kroz namote, ali kao bi se povećala efikasnost

hlađenja povećava se razmak između namotaja. Postavljanje dovoljno velikog razmaka između namotaja omogućava dobro cirkuliranje ulja i brže odvođenja topline sa bakrenih namotaja. Prednost ovakvog pristupa je eliminacija negativnih utjecaja nastalih porastom temperature iako i dalje imamo neke manje električne gubitke. Dokazano je da ti manji gubici ne predstavljaju problem nego negativan utjecaj topline na životni vijek transformatora.

5. ZAŠTITE

Zaštita transformatora predstavlja vrlo važnu ulogu u njegovom radu te njena kvaliteta direktno ovisi o životnom vijeku transformatora. Ne postoji jedna univerzalna zaštita, nego se koristi više vrsta koje zajedničkim radom osiguravaju neometan i siguran rad transformatora.

Zaštita energetskog transformatora

Energetski transformator je jedna od najzastupljenijih transformatora čiju primjenu vidimo u trafostanicama, elektranama energetskog sustava i kao element rasklopnih postrojenja. Zbog njegove važnosti i rasprostranjenosti, a i visoke cijene od iznimne je važnosti da njegova zaštita bude što učinkovitija i da osigurava siguran rad cijelog energetskog sustava ukoliko dođe do kvara. Jedna od ranjivijih komponenti u energetskom sustavu je izolacija samog transformatora. Najčešći kvarovi koji se javljaju su upravo na samoj izolaciji jer je ona izložena kako pogonskom naponu tako i djelovanju privremenih sklopnih i atmosferskih prenapona. Također treba voditi računa o starenju izolacije koja se događa kada je izložena procesu starenja, te mehaničkim naprezanjima. Do mehaničkih naprezanja dolazi kod pojave kratkih spojeva jer tada na izolaciju djeluju dinamičke sile. Uz sve navedeno postoje nekoliko karakterističnih kvarova transformatora :

- međufazni kratki spojevi u transformatoru ili na njegovim izvodima,
- kratki spojevi između zavoja iste faze,
- kratki spojevi sa zemljom (ili kotlom) namota transformatora ili njegovih izvoda.

U samom pogonu najčešće vidimo kvarove kao što su preskoci na izvodima iz samog transformatora (električni luk) ili preskoci prema uzemljenim dijelovima transformatora.[10]

Zaštite koje koristimo kod ovih kvarova su :

- diferencijalna zaštita,
- plinska zaštita (Buchholtzov relej),
- zemljospojna / homopolarna zaštita,
- niskopodesiva i visokopodesiva nadstrujna zaštita,
- distantna zaštita

5.1. Diferencijalna zaštita

Diferencijalna zaštita jedna je od najraširenijih tipova zaštite koja se danas koristi. Ova zaštita ima toliku primjenu zbog svoje brzine i konzistentnosti. Jedan od najgorih kvarova koji se javljaju u mrežama jesu upravo jednofazni kvarovi. Te kvarove uz uvjet da sustavi koriste uzemljenu neutralnu, diferencijalna zaštita će ih spriječiti. Primjenu ove zaštite uočavamo kod osiguranja vodova, motora s velikim pogonom, transformatora, generatora. Dvije osnovne vrste diferencijalne zaštite su :

- S naponima koji uravnotežuju jedan drugog.
- S kružnom strujom

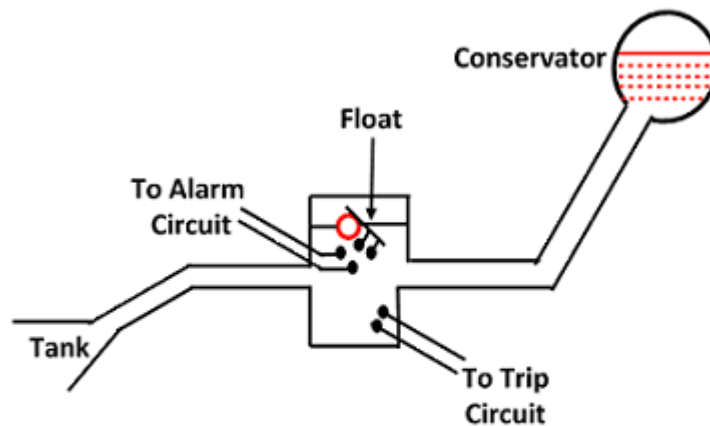
Za naše razmatranje važniji tip je diferencijalna zaštita pomoću kružnom strujom. Ova vrsta zaštite zasniva se na uspoređivanju struja. Parametri koji se uspoređuju su oni na početku i na kraju voda. Ovakav tip diferencijalne zaštite koristi se i kod uzdužnog i kod poprečnog tipa. Uzdužni tip zaštite ima veliku primjenu u osiguravanju jednog dalekovoda, elektromotora, generatora i transformatora. U današnjoj „modernoj“ elektroenergetici sve veću ulogu ima ovaj tip zaštite. S druge strane poprečni tip ima primjenu kod paralelnog spoja električnih vodova. Glavni nedostatak im je nemogućnost zaštite strujnog kruga kada je izložen kratkim spojevima izvana i nemogućnost otvoriti strujni krug kada je izložen jakom preopterećenju.

5.2. Plinska zaštita (Buchholtzov relej)

Plinska zaštita ili Buchholtzov relej (slika 5.2.) vrsta je zaštite koja štiti transformator od unutarnjih smetnji. Glavna uloga mu je dojava kvara. Koristimo ga za transformatore čija je nazivna snaga veća od 500 [KVA] jer je njegova implementacija skupa. Princip rada Buchholtzovog releja najlakše možemo shvatiti za vrijeme kvara unutar transformatora. Za vrijeme kvara transformator se zagrijava (namoti ili jezgra). Ukoliko je kvar jači ulje ne može ohladiti transformator te se zagrijava i kreće isparavati. Ulje se u svom plinovitom stanju pomiče prema gore. Razina ulja počinje opadati, a živin prekidač unutar metalne komore se aktivira te relej uključuje alarm. Napajanje transformatora se prekida i transformator se šalje na održavanje. Relej ima ispitni ventil koji se koristi za otpuštanje tlaka komore. U slučaju jakih smetnji donji živin prekidač smješten unutar metalne komore naginje

se čime se prekida strujni krug i transformator se odvaja iz glavnog strujnog kruga. Ugrađuje se između konzervatora i glavnog kotla. Nedostatci su mu :

- Releji se koristi samo u transformatoru uronjenom u ulje.
- Može detektirati samo kvar ispod razine ulja.
- Taj relej ne štiti priključne kabele. Stoga se za kabele koristi zasebna zaštita.
- Vrijeme odziva releja je visoko.



Arrangement of Buchholz Relay

Circuit Globe

Slika 5.2. Buchholtzov relej

5.3. Zemljospojna / homopolarna zaštita

Ova vrsta zaštite koristi se u svrhu sprječavanja proboja srednjenaponskog namota na metalno kućište transformatora. Struje koje se javljaju pri probodu mogu biti od nekoliko do cca. 300 ampera na mjestu zemljospoja, a njihov iznos ovisi o načinu uzemljenja zvjezdišta u srednjenaponskoj stanici te prijelaznom otporu kvara. Ovu zaštitu možemo nazvati “grubom“ zaštitom jer će onda raditi ako je kvar negdje u srednjenaponskoj mreži nevažno u kojem dijelu. Izborom tzv. proradne struje ili struju ne kojoj će djelovati zaštita možemo kontrolirati ovu zaštitu. Veličina proradne struje biti će za toliko viša da onemogućiti proradu zaštite zbog kapacitivne struje u transformatora. U praksi se pokazalo da je dovoljan iznos od nekoliko ampera tako da ne proradi relej. Ta kapacitivna struja napaja kvar u mreži, a njen iznos ne prelazi 2 ampera.

Novije zemljospojne zaštite kako što su WIC1-2 (slika 5.3.) zahtijevaju da se kod njih odabere faktor zemljospojne zaštite. Njega možemo definirati kao omjer proradne struje zemljospoja I_{zs} i referentne struje releja te vremena prorade zemljospojne zaštite.[10]



Slika 5.3. Relej za zaštitu od zemljospoja WIC1-2

5.4. Niskopodesiva i visokopodesiva nadstrujna zaštita

Nadstrujna zaštita može se smatrati pričuvnom zaštitom koja se koristi uz temeljnu diferencijalnu zaštitu. Kako je onda pomoćna zaštita najprije će djelovati diferencijalna zaštita koja djeluje trenutno (unutar $100ms$) pa nakon nje nadstrujna zaštita. To se postiže vremenskom odgodom (vremenskim zatezanjem). Kao i svaki element elektroenergetskog sustava tako i diferencijalna zaštita može zakazati, tada nadstrujna zaštita preuzima ulogu i isključuje transformator iz mreže. U tim slučajevima koristimo sljedeće nadstrujne zaštite :

- niskopodesiva nadstrujna zaštita
- visokopodesiva nadstrujna zaštita

Niskopodesivu nadstrujnu zaštitu koristimo u distribucijskim mrežama kada su struje jednopolnog kratkog spoja veće od maksimalne pogonske struje. Ovaj slučaj popraćen je velikim iznosima struja (struje kratkog spoja) te to smatramo jednim od glavnih nedostataka niskopodesive nadstrujne zaštite.

Visokopodesiva nadstrujna zaštita ima za zadaću djelovati kod nastupa međufaznih kvarova unutar zone koje ta zaštita pokriva. Pod tu zonu spada samo transformator te će se ova zaštita koristiti u svrhu zaštite kvarova unutar transformatora. Kako je ovo pomoćna zaštita i glavnu ulogu ima diferencijalna, ona mora imati vremensku odgodu kako bi dopustila diferencijalnoj zaštiti da djeluje.

5.5. Distantna zaštita

Distantna zaštita je još jedan sloj zaštite koja nastupa ukoliko imamo duže vrijeme djelovanja nadstrujnih releja, a da pritom nisu u mogućnosti obavljati svoj zadatak. Do toga dolazi u složenijim mrežama točnije primjena distantne zaštite najuočljivija je u visokonaponskim prijenosnim mrežama. Glavni cilj ove zaštite je uklanjanje kratkog spoja u mreži i to na način da isključi prekidač u vodnom polju u kojemu se nalazi. Jedna od prednosti ove zaštite je brzo isklapanje uslijed kvara i mogućnost međusobnog djelovanja dvije distantne zaštite postavljene na oba kraja voda. To se postiže optičkim vodom ili telekomunikacijskim vodom. Vrijeme koje je potrebno da ova zaštita reagira proporcionalno je razmaku nastanka kratkog spoja i pozicije gdje je ugrađen distantni relej.

6. UKLAPANJE TRANSFORMATORA NA MREŽU U PRAZONOM HODU

Prilikom ukopa transformatora ili bilo kojeg struja u mrežu primjećujemo da dolazi do pojave značajnog iznosa tranzijentne struje. Tu struju koja se pojavljuje u primarnom namotu transformatora nazivamo potezna struja. Ta struja ujedno označava najviši iznos ulazne struje transformatora čiji se red veličine kreće u iznosu od 8 do 10 puta nazivne struje transformatora. Ovo povišenje nije trenutno nego je već potrebno neko vrijeme da struja dosegne taj iznos. Vrijeme potrebno da transformator dođe u željeno stanje iznosi nekoliko perioda izmjenične sinusoidalne struje. Za to vrijeme uočavamo različite prijelazne pojave koje možemo donekle predvidjeti pokusima kratkog spoja i praznog hoda kao što je objašnjeno ranije. Transformator koji promatramo može biti u dva stanja, prvo stanje odnosi se na transformator koji je prvi put uključen u vremenu $t=0$, a drugi slučaj je da je prethodno bio uključen. U prvom slučaju magnetski tok iznosi 0 u trenutku $t=0$ dok u drugom slučaju imamo remanentni ili zaostali magnetizam. Remanentni magnetizam za posljedicu ima nastajanje nesimetrije u magnetskim tokovima u željeznoj jezgri transformatora. Zbog nesimetrije dolazi do izobličenja struje magnetiziranja te visokih iznosa udarne struje koja može izazvati razna oštećenja.

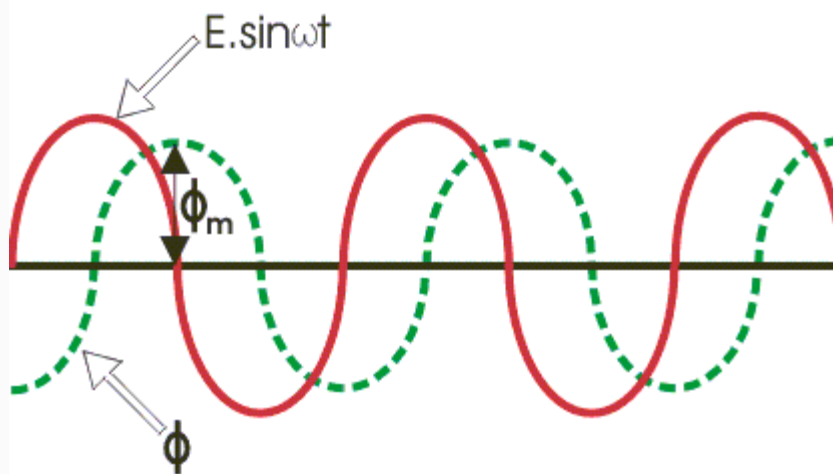
Ovaj slučaj javlja se prilikom neupravljivog uklopa transformatora. Pri takvim uklopima javljaju se velika izobličenja struje magnetiziranja odnosno njenog valnog oblika, visoki iznosi udarnih struja i istosmjernih komponenta struja. Kako je pri tome uklopna struja visoka diferencijalna zaštita bi se aktivirala pa stoga zaštita mora prepoznati razliku između struje uklapanja i struje kratkog spoja tako što relej prepozna pojavu drugog ili petog harmonika i blokira zaštitu. Osim pogrešnog rada osigurača, zaštitnih releja ili drugih zaštita udarna struja može izazvati mnogobrojne kvarove kao i razna mehanička oštećenja. Postoje određene situacije kada maksimalni iznos udarne struje uklopa iznosi do 10 puta nazivne, a moguća je situacija i kada struja uklopa iznosi 90% struje kratkog spoja. Ovaj najnepovoljniji slučaj je dosta čest pa ga možemo očekivati prilikom 10% ukopa transformatora na mrežu. Za posljedicu slučaj naglog rasta struje i izobličenja vala ima oštećenja na pojedinim osjetljivim trošilima. Cilj prijenosa i transformacije energije je imati što manje gubitaka i jalovih komponenti te što veću korisnost, a ove pojave to znatno umanjuju.

6.1. Uklopna struja

U trenutku kada se priključi energetski transformator sa svojom primarnom stranom na mrežu zadržavajući pri tome svoj sekundarni krug otvoren, on djeluje kao jednostavna induktivnost. Kada električni transformator radi normalno, magnetski tok proizveden u jezgri ovisi o kvadratu primijenjenog napona. U trenutku $1/4$ ciklusa ili $\pi / 2$ kuta kasnije magnetski tok doseže svoju maksimalnu vrijednost čime se dostiže i maksimalna vrijednost napona. U trenutku kada je napon nula, odgovarajuća vrijednost stacionarnog stanja magnetskog toka mora biti negativni maksimum (tj. minimalna vrijednost). Ali, praktički nije moguće imati magnetski tok u trenutku uključivanja transformatora. To je zbog toga što prije uključivanja napajanja neće biti povezan s jezgrom. Toku treba neko vrijeme da postigne stalni iznos. To će ovisiti o sposobnosti brzine kruga da uzme energiju. Obavljanje ovog prijenosa ne može biti trenutačno.

Tok u magnetskoj jezgri kreće od vrijednosti nula u trenutku kada uključujemo transformator. Prema Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije napon induciran preko namota možemo dobiti iz izraza $e = \frac{d\phi}{dt}$ gdje ϕ označava magnetski tok jezgre. Stoga možemo reći da će tok biti dio naponskog vala, koji se može izračunati iz sljedeće formule:

$$e = E \cdot \sin \omega t = \frac{d\phi}{dt} = \int e dt = E \int \sin \omega t dt \quad (6.1)$$

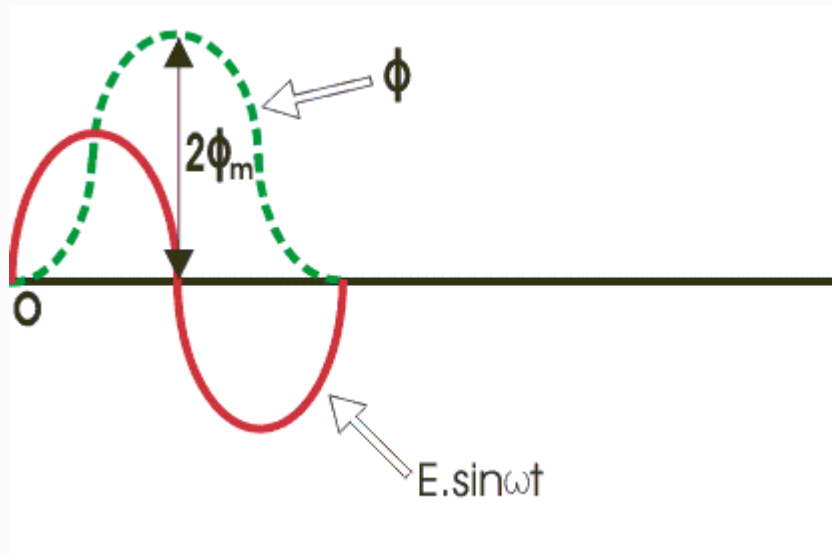


Slika 6.1. Valni oblik napona primara sa njegovim pripadajućim magnetskim tokom

Ako je transformator trenutno uključen na napon koji iznosi nula, valni oblik toka se ponaša kao valni oblik napona, a vrijednost toka na kraju prve poluperiode (slika 6.1.) valnog oblika možemo dobiti pomoću sljedećeg izraza :

$$\phi'_m = \left(\frac{E}{\omega}\right) \int_0^\pi \omega \sin \omega t \, dt = \phi_m \int_0^\pi \sin \omega t \, d(\omega t) = 2\phi_m \quad (6.2)$$

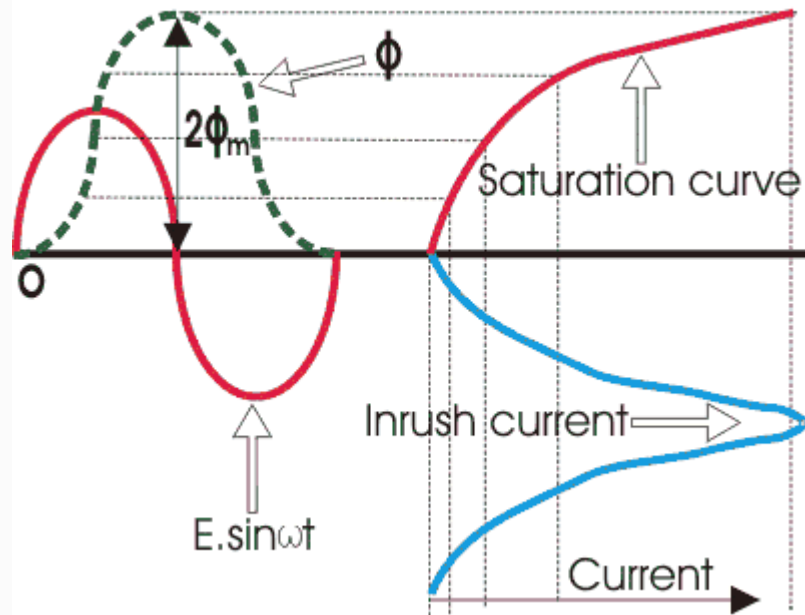
Pri čemu m označava maksimalnu vrijednost statičkog toka



Slika 6.2. Maksimalni iznos magnetskog toka prilikom pokretanja

Zasićenje jezgre transformatora općenito je neposredno iznad maksimalne vrijednosti stalnog stanja magnetskog toka. Na slici 6.2. prikazano je kako je pri uključivanju transformatora maksimalna vrijednost magnetskog toka dvostruka maksimalnoj vrijednosti stabilnog stanja.

U trenutku nakon što je postignuto stabilno stanje maksimalnog iznosa toka jezgra postaje zasićena i tada struja potrebna za proizvodnju ostatka toka visokog je iznosa. Tada će primarni namot povući visok vršni tok iz izvora. Struja koja teče u tom trenutku naziva se transformatorska struja ili struja magnetiziranja.



Slika 6.3. Prikaz valnog oblika napona i magnetskog toka u odnosu na krivulju i struju magnetiziranja

Struja magnetiziranja je struja koja se pojavljuje prilikom uklapanja transformatora na mrežu. Nju nazivamo još i uklopna struja. Po prirodi ta struja je prolazna i njen utjecaj traje nekoliko milisekundi pri čemu može dosegnuti iznose do 10 puta nazivne vrijednosti struje.

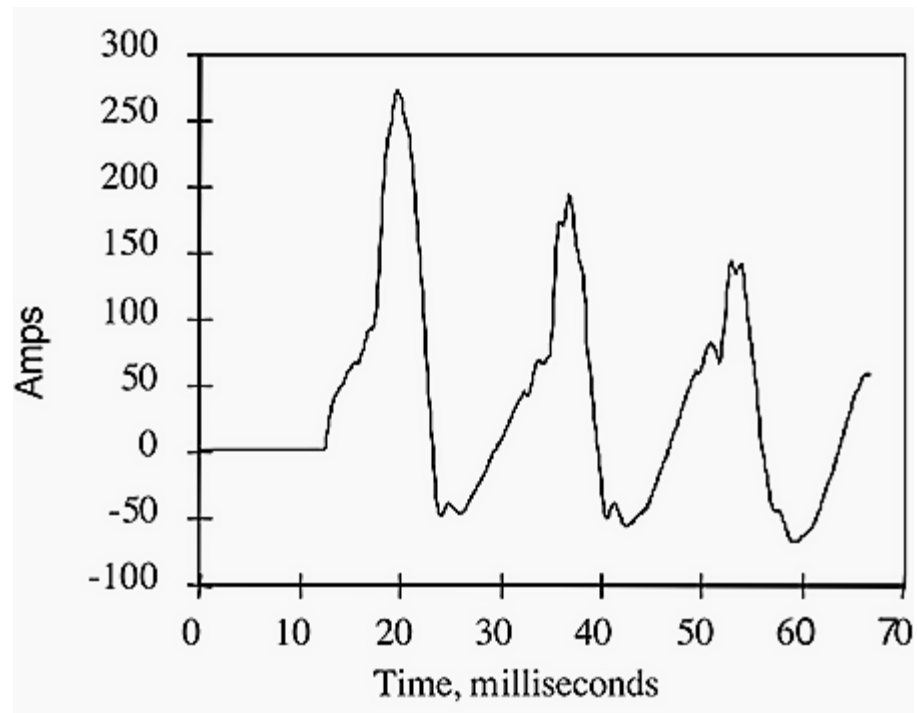
Iako je njena amplituda visoka onda ne stvara trajnu grešku u transformatoru zbog vremena njenog postojanja. Međutim njen utjecaj u energetskom transformatoru predstavlja problem jer omata eklektični krug i njihovu funkciju. Ponekad ova struja zbog visokog udara utječe na osigurače, releje i prekide prekidača te iskrenje i kvar komponenti u primarnom krugu. Svojim iznosom ova struja zahtjeva odabir većih osigurača i prekidača. Drugi problem visokog udara je pojava izobličenja signala koji se šalje nazad u mrežu.

6.2. Utjecaj uklopne struje na transformator

Struja magnetiziranja u transformatorima rezultat je bilo kakve nagle promjene napona magnetizacije. Iako se obično razmatra kao rezultat napajanja transformatora, magnetiziranje može također biti uzrokovano

- Pojava vanjske smetnje
- Oporavak napona nakon uklanjanja vanjske smetnje
- Promjena karaktera kvara (na primjer, kada se pogreška faze-zemlja razvija u fazni kvar)
- Izvanfazna sinkronizacija spojenog generatora

Slika 6.4. pokazuje primjer uklopne struje nakon ponovnog zatvaranja izmjerena na prekidaču distribucijske podstanice.



Slika 6.4. - Primjer ulazne struje izmjerene u podstancici (mnogi distribucijski transformatori zajedno)

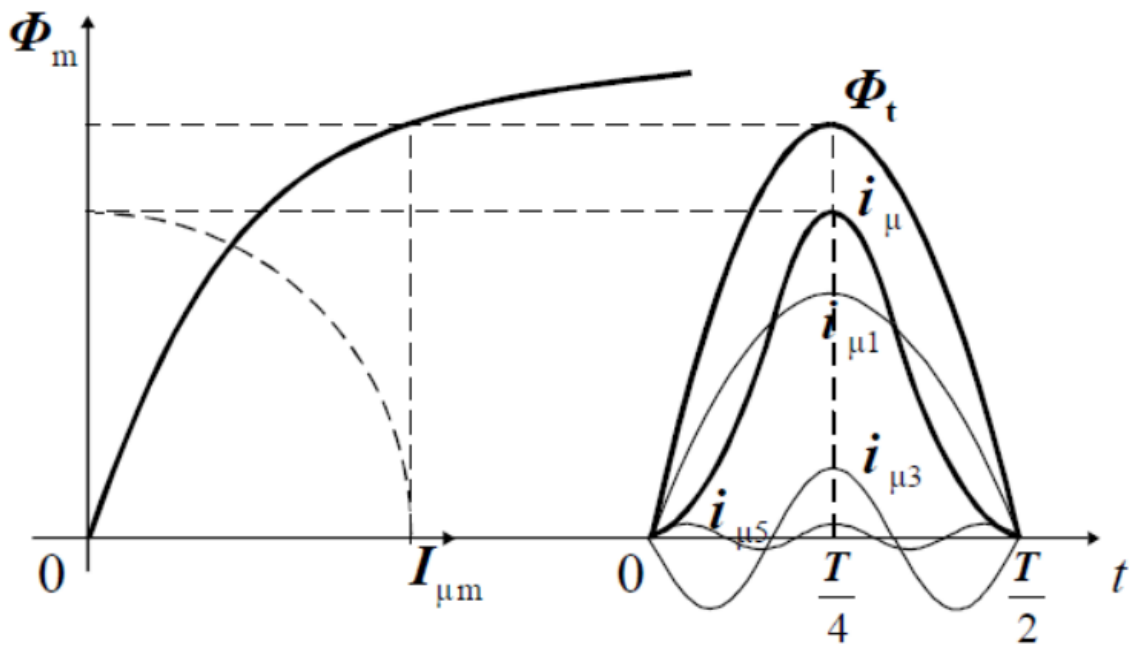
Magnetizirajuća grana predstavlja jezgru kao šant elementu ekvivalentnom krugu transformatora, struja magnetiziranja narušava ravnotežu između struja na terminalima transformatora i stoga se doživljava diferencijalnim relejom kao “lažne” diferencijalne struje.

Releji, međutim, mora ostati stabilan tijekom početnih uvjeta. Osim toga, sa stajališta životnog vijeka transformatora, isklapanje tijekom pokretanja je vrlo nepoželjna situacija. Prekid struje čiste induktivne prirode stvara visok prenapon koji može ugroziti izolaciju transformatora i biti neizravan uzrok unutarnjeg kvara.

6.3. Pojava viših harmonika

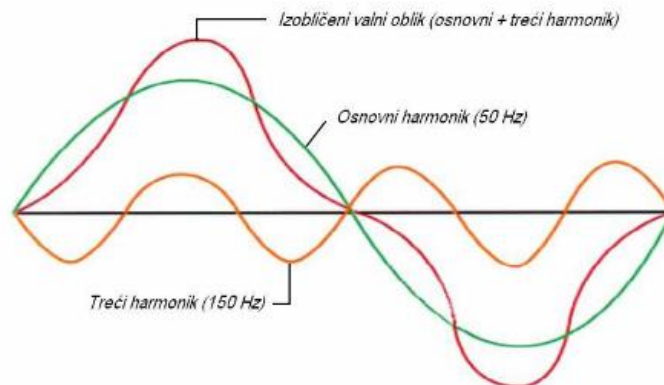
Ukoliko strujni krug ne sadrži nikakve reaktivne komponente tada će valni oblici struje, a tako i napona biti sinusni. U tom slučaju uočavamo samo nulti harmonik. Međutim u realnoj mreži susrećemo različite reaktivne i nelinearne komponente pa se zbog njih mijenjaju izgledi valnih oblika napona i struja. Ta izobličenja najčešće se manifestiraju kao viši harmonici. Viši harmonici su zapravo višekratnici nultog harmonika.

Harmonike zapravo možemo smatrati izobličenim valnim oblicima napona i struje koji svojim djelovanjem povećavaju gubitke u transformatoru te smanjuju njegovu korisnost. Glavni razlog stvaranja viših harmonika je struja magnetiziranja. Kod uklone struje možemo primjeriti da je drugi harmonik dominantan. Njegova manifestacija nastaje zbog izražene istosmjerne strujne komponente čiji iznos može iznositi čak do 20% osnovnog harmonika. Drugi harmonik je ovisan o konstrukciji jezgre točnije njenoj magnetskoj karakteristici i načinu zasićenja. Treći harmonik je se pojavljuje u spojevima gdje postoji povratni vod te je tamo najizraženiji član. Iako očitujemo pojavu viših harmonika to na znači da dolazi do pojave uklopne struje, već postoji mogućnost da ju je zaštita lažno detektirala i reagirala. Način na koji možemo kontrolirati i umanjiti utjecaj struje uklopa i harmonika je pomoću pretvarača sa pulsno širinskom modulacijom. Sa načinom generiranja napona pomoću PWM metode prigušujemo struju ukopa te također djelujemo na smanjenje harmonika. Ova metoda djeluje na način da se smanjuje iznos napona u vremenu sve do trenutka dok se stvoreni magnetski tok ne izjednači sa zaostalim magnetskim tokom. Kada se to postigne kreće propuštanje nemodificiranog napona bez obzira na njegov iznos.



Slika

6.5. Struja magnetiziranja u svom nelinearnom obliku: a) Osnovni harmonik ($i_{\mu 1}$), b) Treći harmonik ($i_{\mu 3}$), c) Peti harmonik ($i_{\mu 5}$), d) Ukupna struja (i_μ)



Slika 6.6. Poblje prikazano djelovanje 3. harmonika

6.4. Utjecaj uklopne struje u praznom hodu

Struja praznog hoda u primarnom namotu sastoji se od struje magnetiziranja i od struje gubitaka u željeznoj jezgri i namotu primara. Kako se velikim dijelom sastoji od struje magnetiziranja važno je

napomenuti kako treći harmonijski član može iznositi do trećine amplitude osnovnog vala struje magnetiziranja. Treći harmonički član u trofaznom sustavu je istofazan jer mu je titrajni period jednak pomaku faza osnovnog harmoničkog člana. Da bi se treći harmonički član struje mogao pojaviti, potreban je povratni vod. Kod trofaznog transformatora koji nema namot spojen u trokut te nema povratnog puta za struju na primarnoj strani, struja magnetiziranja ne sadrži treći harmonički član. U magnetskom toku, kad postoji povratni put za istofazne magnetske tokove (peterostupna jezgra, trofazna skupina jednofaznih transformatora), pojavljuje se treći harmonički član. U linijskom se naponu ne pojavljuje treći harmonički član jer se kao istofazni poništava. [11]

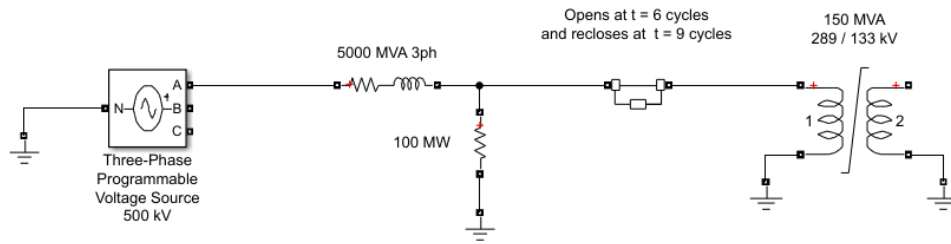
U praznom hodu transformator se ponaša kao jednostavni strujni krug čiji je ukupan otpor sa sastajališta primarnog namota vrlo malen. Zbog niskog iznosa otpora u primarnom krugu transformator prilikom uključivanja može povući značajne struje uklopa. S ovim saznanjima zaključujemo da je važno promatrati struju uklopa pri praznom hodu te sve njene komponente kao što su npr. treći harmonik. Otkrivanje iznosa kako struje uklopa tako i njenih pripadajućih harmonika važno je za projektiranje zaštita transformatora i cijelog elektroenergetskog sustava.

6.5. Simulacija uključivanja transformatora u praznom hodu

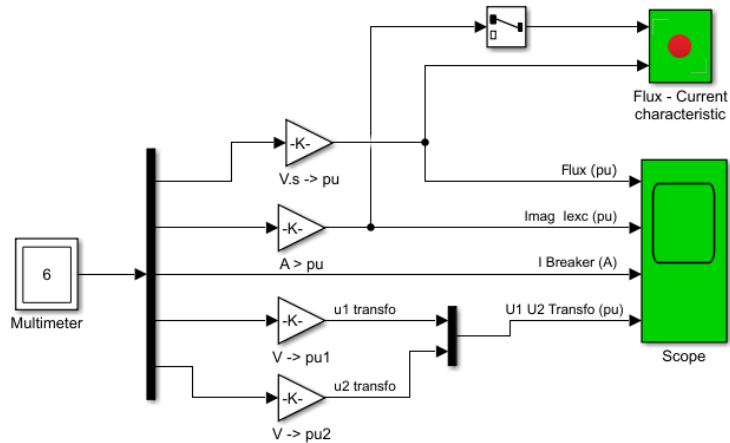
U ovom poglavlju proučit ćemo kako se transformator ponaša prilikom njegovog uključivanja na mrežu u praznom hodu. Poseban osvrt će biti na struju uključena sa pripadajućim harmonicima. Proveden je simulacija pomoću programskog paketa MATLAB. Unutar tog programskog paketa možemo naći mnoge primjere simulacija vezane za razne projekte slične ovima. Ukoliko želimo imati što točniju simulaciju moramo ukomponirati sve utjecaje i smetnje koje vidamo pri radu transformatora.

U ovoj simulaciji korišten je trofazni transformator čija je jedna faza spojena izvor od 500kV sa snagom od 5000MVA. Ukupna snaga transformatora iznosi 450MVA. Prijenosni omjer koji je pri tom korišten je $N1/N2 = 2.17$. Ta shema je provedena kroz simulaciju te se pomoću multimetra i elemenata spojenih na njega mogu promatrati sve veličine koje su nam potrebne. Tako se pomoću scope prikazuju valni oblici napona struja i magnetskog toka.

Sve korišten veličine prilagođene su realnim uvjetima te su svi elementi energetskog kruga podešeni na frekvenciju od 50 Hz. Ovaj primjer zanimljiv je za promatranje jer osim struje ukopa možemo promatrati nastajanje petlje histereze te utjecaj harmonika kod struje magnetiziranja.



Goran Vodolšak



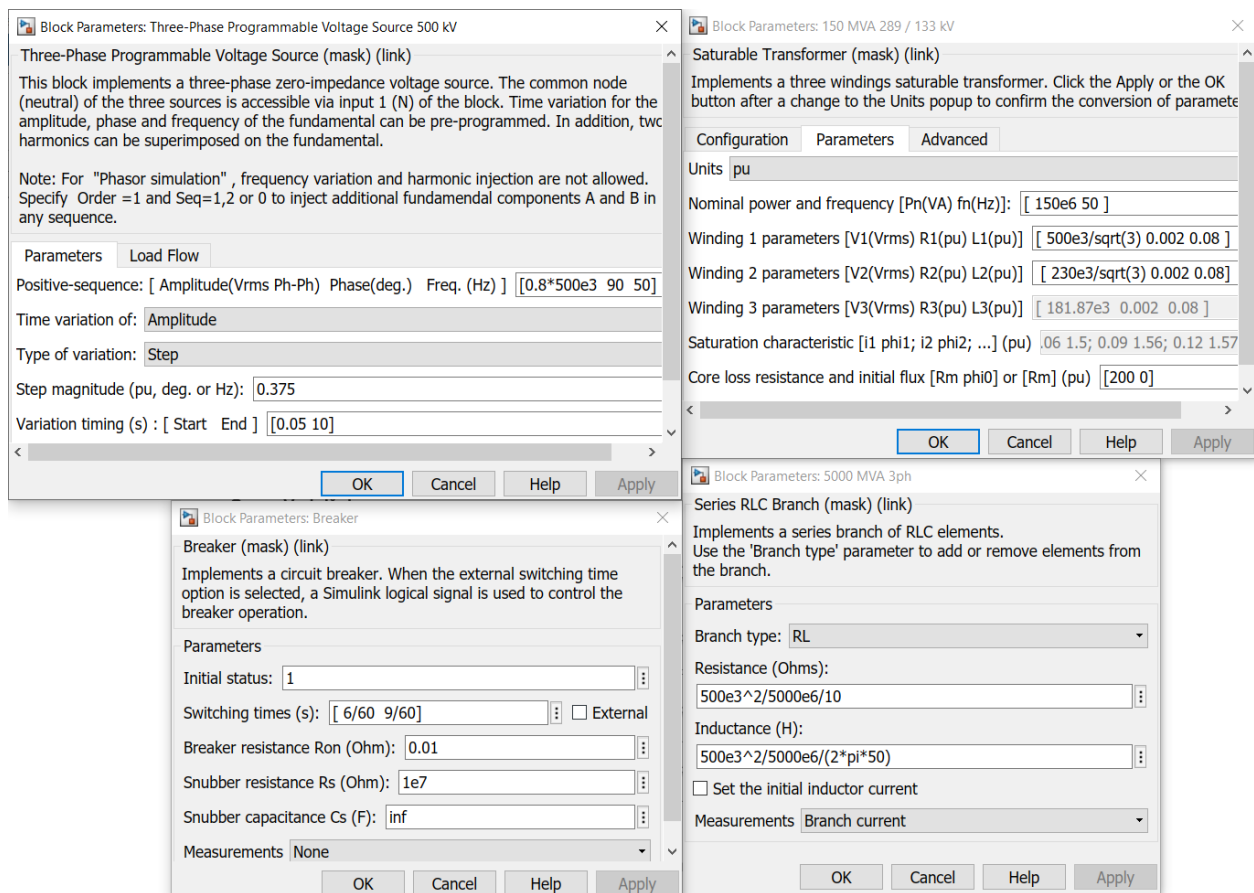
Discrete
2e-05 s.
powergui

Saturable Transformer with Hysteresis

?

Slika 6.7. Shema trofaznog transformatora priključenog na mrežu

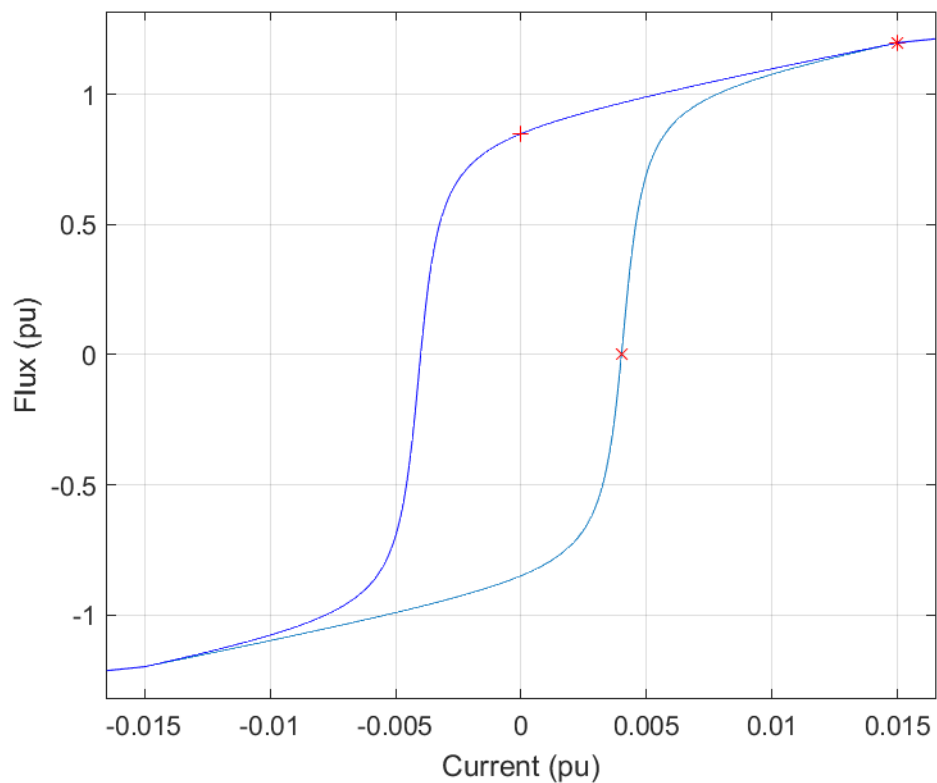
Slika 6.7. prikazuje model koji se koristi prilikom simulacije ovoga tipa. Shema je uzeta iz Matlab Library sustava pod nazivom Saturable Transformer with Hysteresis. Prilikom provjere vrijednosti pojedinih komponenta uočeno je da su rađene za američku mrežu zbog vrijednosti frekvencije od 60 Hz-a. S toga smo prilagodili vrijednosti za europsku mrežu čija frekvencija iznosi 50 Hz-a.



Slika 6.8. Prilagođavanje parametara prema europskom standardu

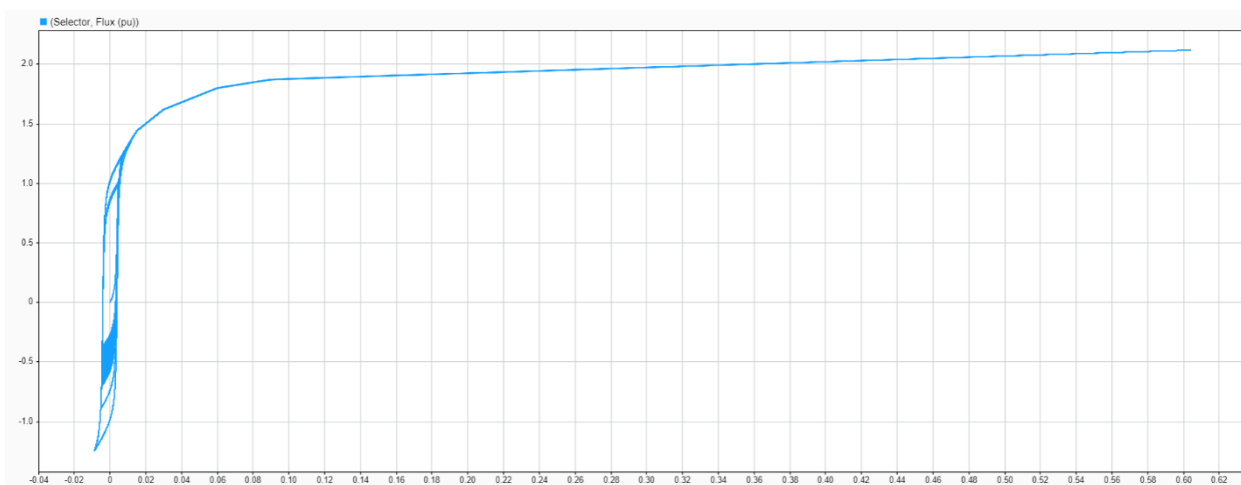
Nakon što smo prilagodili parametre prema europskom standardu (slika 6.8.) možemo provesti simulaciju. Tijekom simulacije kao što je u uvodu objašnjeno možemo osim struje ukopa i njenih harmonika promatrati i nastajanje petlje histereza. Ukoliko nas to zanima možemo pomoću bloka powergui izvući petlju histerezu, a pomoću bloka Flux-current characteristic možemo prikazati njeno nastajanje.

Na slici 6.9. prikazana je petlja histereza jezgre transformatora 450MVA omjera 500/230 kV. Dobivena je iz bloka powergui u kojemu postoji opcija prikazivanja petlje histereze kao i mnogih drugih veličina što će biti objašnjeno kasnije u poglavlju.



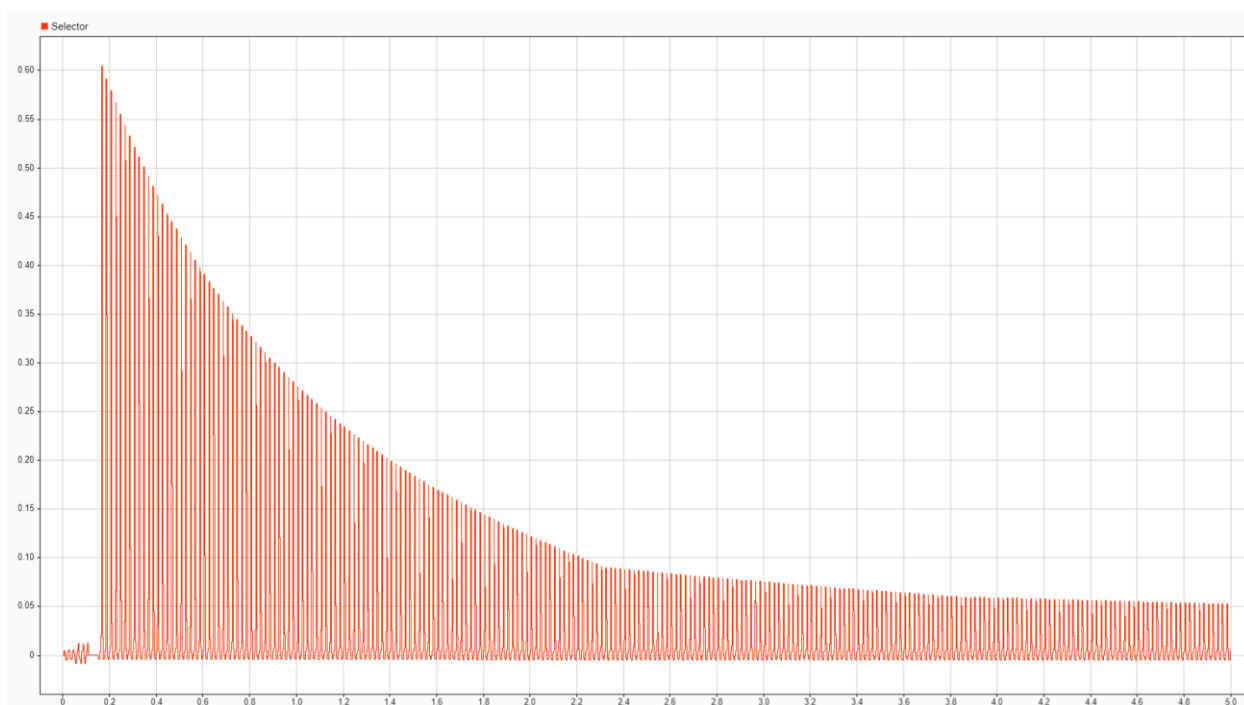
Slika 6.9. Prikaz petlje histereze za transformatorsku jezgru iz simulacije

U poglavlju 4.1.2. objašnjeno je na koji način se formira petlja histereza. Objašnjeno je da se crtanje te petlje ponavlja veliki broj puta dok ne dobijemo potpunu sliku. U ovoj simulaciji to crtanje možemo vidjeti u bloku Flux-current characteristic.



Slika 6.10. Grafičko dobivanje petlje histereze (iscrtavanje)

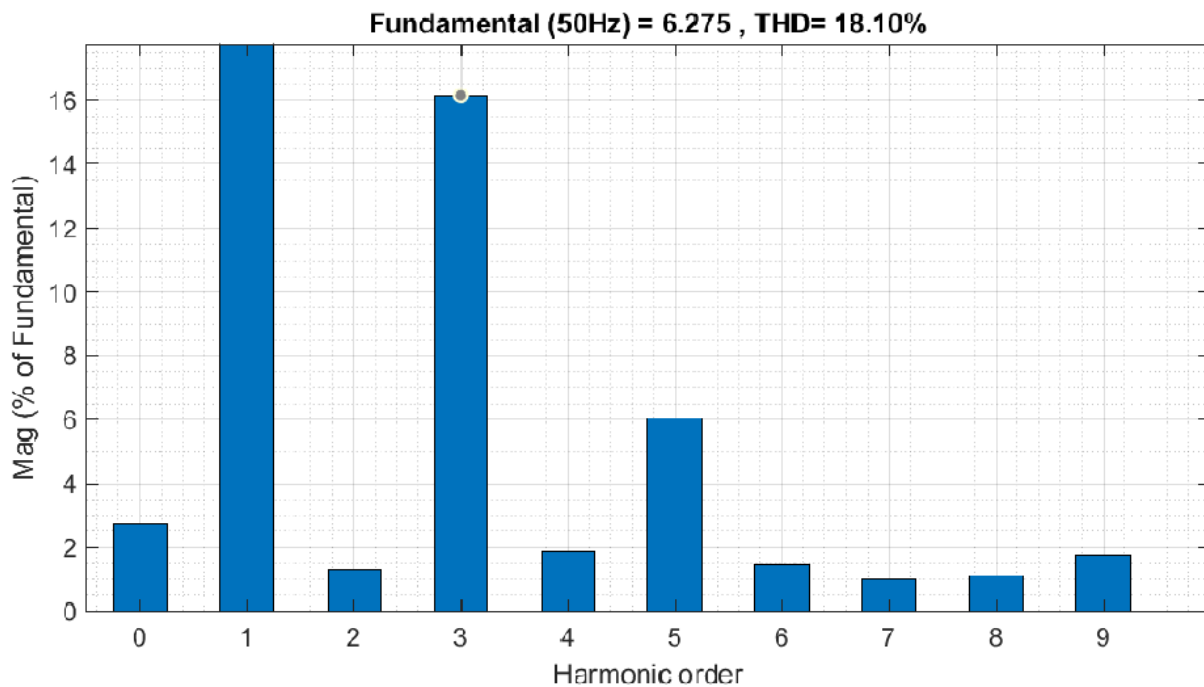
Pomoću opcije data inspector u Matlabu možemo vidjeti struju koja teče prilikom puštanja transformatora u rad u praznom hodu. Način na koji to činimo je da prilikom otvaranja data inspector odaberemo veličinu koju želimo da nam Matlab prikazuje na zaslonu. To su iste veličine koje možemo vidjeti i unutar scopea. Primjećujemo da je struja prilikom pokretanja znatno veća od struje nakon što prođe uklop. Za razliku od običnog rada gdje struja ukopa traje nekoliko milisekundi pri praznom hodu uočavamo da je ta pojava nešto duža te struju treba neko vrijeme da se stabilizira. Ovim putem smo dokazali koliko zapravo iznosi ta struja. Interval koji primjećujemo na slici 6.11. od 0 do 0.18 sekundi je interval u kojemu smo magnetizirali jezgru transformatora. Kako transformator u našem slučaju nema zaostalog magnetizma jezgru smo magnetizirali te nakon toga isključili transformator pa ubrzo ponovno uključili. Na taj način smo dobili slučaj u kojemu se pojavljuje velika uklopna struja pa ju zbog toga možemo bolje analizirati. U teorijskom dijelu objašnjeno je da struja uklopa sa svojim visokim iznosom traje nekoliko milisekundi odnosno nekoliko titraja, ali iz ove simulacije primjećujemo da je potrebno gotovo 2 sekunda se vrati na stabilnu vrijednost. To je zato jer se nalazimo u praznom hodu te kako je objašnjeno u poglavlju 6.4. transformator se ponaša kao jednostavan strujni krug.



Slika 6.11. Grafički prikaz struje transformatora sa njenim uklopom

Pri ovoj struji javljaju se harmonici koje možemo detektirati Fourierovom analizom signala. Pomoću bloka powergui unutar njegovih tools-a odaberemo opciju FFT Analysis kojom modeliramo Fourierovu analizu odabranog signala. Za bilo koji signal možemo napraviti Fourierovu analizu, a

način na koji odaberemo signal je sljedeći. Otvorimo scope stisnemo desni klik na signal koji želimo analizirati te odaberemo opciju Configuration Properties te unutar te opcije kliknemo na Logging. Unutar Logging-a check-iramo log data to workspace uz mijenjanje save formata u format Structure with time. Nakon što smo to napravili otvaramo powergui i te stisnemo na FFT Analysis. Unutar te analize pritisnemo na Structure with time (click to update) što zapravo prikaže signal koji želimo analizirati, a pomoću opcije Compute FFT dobijemo Fourierovu analizu tog signala.



Slika 6.12. Grafički prikaz harmonika promatranog signala

Primjećujemo da iznos 3 harmonika ima znatan utjecaj na iznos udarne struje te da ga je potrebno smanjiti. Ova simulacija također nam je dala jedan važan podatak, a to je THD ili faktor harmonijskog izobličenja. Ovaj faktor govori o utjecaju harmonika na signal. Njegov iznos od 18.10 % je vrlo značajan, a mi nastojimo da on bude što manji. Prilikom proučavanja rađene su i simulacije za više frekvencije te je uočeno da je utjecaj viših harmonika znatno smanjen što zapravo sugerira na PWM metodu smanjenja harmonika.

Sampling time = 2e-05 sec.
 Samples per cycle = 1000
 DC component = 0.1719
 Fundamental = 6.275 peak (4.437 rms)
 THD = 18.10%

0 Hz	DC	2.74%	270.0°
50 Hz	Fnd	100.00%	63.7°
100 Hz	h2	1.29%	217.5°
150 Hz	h3	16.16%	177.2°
200 Hz	h4	1.86%	225.7°
250 Hz	h5	6.03%	-75.0°
300 Hz	h6	1.45%	228.3°
350 Hz	h7	1.02%	101.0°
400 Hz	h8	1.13%	220.5°
450 Hz	h9	1.77%	213.7°

Slika 6.13. Analitički prikaz iznosa pojedinog harmonika

Unutar opcije FFT Analysis također možemo analitički prikazati iznos pojedinog harmonika. Iz ove tabele vidimo da treći harmonik ima značajan utjecaj na promatrani signal struje uklopa.

7. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme postoji sve veća potreba za opskrbljivanjem električnom energijom i što učinkovitijem prijenosom. Najučinkovitije rješenje je slanje energije visokonaponskim putem kako bi imali što manje gubitaka. Kako tu energiju ne možemo koristiti u kućanstvima nju moramo smanjiti na propisane naponske razine. Tu su transformatori pokazali važnu ulogu u elektroenergetskom sustavu. Kako bi osigurali neprekidan rad sustava transformator kao i ostale komponente treba redovito pregledavati i održavati. To je od ključne važnosti ukoliko želimo njihov dugotrajan životni vijek. Iako nisu savršeni kao što je prikazano u ovom radu, njihovi gubitci su sa današnjom tehnologijom smanjeni na razumne razine s kojima možemo unaprijed projektirati cijeli energetska sustav. Ovaj napredak u tehnologiji doveo je ne samo do efikasnijeg transformatora nego i do značajnog utjecaja na uštedu energije i zaštitu okoliša na što se u današnje vrijeme pridodaje poseban značaj. Uz sve navedeno možemo zaključiti da je potražnja za transformatorima visoka pa tvrtke kao što su KONČAR prosperiraju u današnjem konkurentnom svijetu opskrbe električnim strojevima.

8. LITERATURA

- [1] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Transformator> (pristupljeno 28.7.2022.)
- [2] https://sh.wikipedia.org/wiki/Faradayev_zakon_indukcije (pristupljeno 28.7.2022.)
- [3] Viktor Pinter, Osnove elektrotehnike , ITP „Tehnička knjiga“ D.D. – Zagreb 1994
- [4] Moncef Krarti, Energy-Efficient Electrical Systems for Buildings, CRC Press, 2017
- [5] MUE Mjerni Transformatori, Mr.sc. Rajko Židovec
- [6] James H. Harlow, Electric power transformer engineering, 3. Izdanje, CRC press
- [7] A. Dolenc: Transformatori I i II, Interna skripta, ETF, Zagreb, 1989.
- [8] Prenc, R.: “Električni strojevi”, predavanja
- [9] Josip Knezović Završni rad, Simuliranje dinamičkog ponašanja jednofaznog transformatora u simpowersystemu, Završni rad, Osijek, 2016.
- [10] Petar Sarajčev, Robert Kosor, Zaštita u elektroenergetskom sustavu, predavanja, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni studijski centar za stručne studije
- [11] R. Podhorsky, H. Požar, D. Štefanović, Tehnička enciklopedija, dio Transformator, Zagreb: Leksikografski zavod Miroslav Krleža 1997.g

9. SAŽETAK

Ovim završnim radom objašnjen je princip rada transformatora uz uzimanje svih realnih uvjeta koji se mogu pojaviti tijekom njegovog rada. Poseban značaj pridao se uključivanju transformatora na mrežu u praznom hodu te se simulacijom u programskom paketu MATLAB detaljnije proučila struja uključjenja 3. harmonika. Pomoću simulacije objašnjeno je kako se struja ponaša u vremenu te kako uključenje utječe na njen iznos i valni oblik.

Ključne riječi : transformator, prazni hod, elektroenergetski sustav, 3. harmonik

10. ABSTRACT

This work explains the principle of transformer operation, considering all the real conditions that may occur during its operation. Special importance was given to the switching on of the transformer to the network in idle mode, and the switching current of the third harmonic was studied in more detail by simulation in the MATLAB software package. With the help of simulation, it was explained how the current behaves in time and how switching on affects its amount and waveform.

Key words: transformer, idling, power system, third harmonic