Analiza utjecaja harmonijskh članova u struji uklopa trofaznih transformatora

Marciuš, Jurica

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:818870

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURAJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA
Stručni studij

Analiza utjecaja harmonijskh članova u struji uklopa trofaznih transformatora

Završni rad

Jurica Marciuš

Osijek, 2017.

SADRŽAJ

1.UVOD 1

2. STRUJA UKLOPA 2

2.1. Problemi koje uzrokuje struja pri uklopu transformatora 4

3. HARMONICI 10

3.1. Negativan utjecaj harmonika 10

3.2. Viši harmonici 11

3.3. Različiti slučajevi spojeva primarnog namota i tip jezgre transformatora 13

3.3.1. Zvijezda spoj namota s nul-vodom i jezgra s magnetskim povratnim putem 13

3.3.2. Zvijezda spoj namota bez nul-voda i jezgra s magnetskim povratnim putem 15

3.3.3. Zvijezda spoj namota bez nul-voda i jezgra bez magnetskog povratnog puta 16

3.3.4. Zvijezda spoj namota s nul-vodom i jezgra bez magnetskog povratnog puta 16

3.3.5. Trokut spoj namota 18

4. ZAŠTITA TRANSFORMATORA 19

4.1. Zaštitni relej REF54x 19

4.2. Zaštitni relej SEL-351 20

4.3. Zaštitni relej RFD 21

4.4. Zaštitni relej RIUX 24

5. ZAKLJUČAK 27

LITERATURA 28

SAŽETAK 30

ŽIVOTOPIS 31

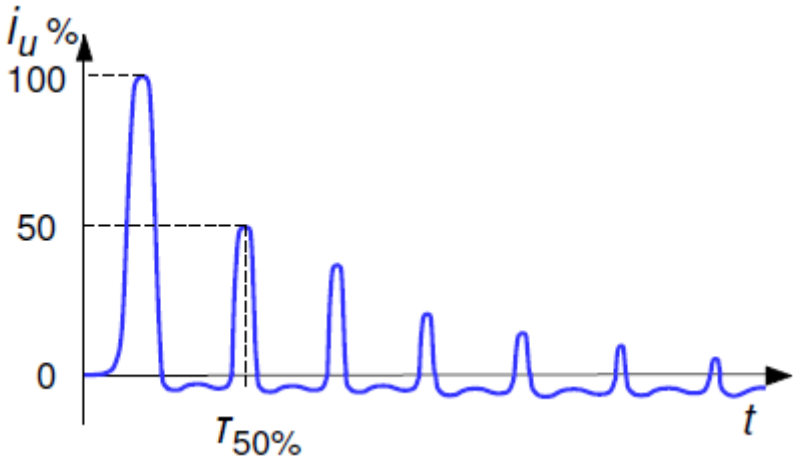
1.UVOD

Pri uklopu trofaznog transforamtora, struje koje se javljaju mogu biti nekoliko puta veće od nazivne vrijednosti struje. Zbog pojave tako velike struje, zaštita transformatora može nepotrebno proraditi jer zaštita zamijeni struju uklopa sa strujom kratkog spoja. Zbog tog problema postoje zaštitni releji koji prepoznaju razliku između struje uklopa i struje kratkog spoja tako što relej prepozna pojavu drugog ili petog harmonika i blokira zaštitu. Harmonici su izobličeni valni oblici struje i napona. Viši harmonici negativno djeluju na elemente u elektroenergetskom sustavu. Povećavaju gubitke u transformatorima te se njihova korisnost se može drastično smanjiti. Struja magnetiziranja je glavni izvor viših harmonika, a treći harmonički član je najizraženiji te se on pojavljuje u spojevima gdje postoji povratni vod. Različiti spojevi namota transformatora blokiraju pojavu nekih harmonika.

U prvom dijelu rada obradit će se struja uklopa, pojave iste u uklapanju transforamtora, problemi koji se mogu javiti i rješenje istih te način na koji se određuje optimalan trenutak uklopa.
U drugom dijelu rada razradit će se nastanak harmonijskih članova i njihov negativan utjecaj na transformatore. Spomenut će se različiti spojevi primarnog namota i kako neki od njih eliminiraju neke harmonijske članove.
U trećem dijelu rada navest će se tri releja koji se koriste za zaštitu i prepoznavanje struje uklopa te će biti opisan njihov princip rada.
Na kraju završnog rada, u petom poglavlju, dan je zaključak.

2. STRUJA UKLOPA

Struja uklapanja je struja magnetiziranja koja nastaje prilikom uklapanja transformatora na mrežu. Amplituda može biti puno veća od amplitude nazivne struje, a u manjim transformatorima može se približiti amplitudi simetrične komponente struje kratkog spoja. Trajanje struje uklapanja karakterizirano je vremenom $\tau_{50\%}$ koje je potrebno da se njezina amplituda smanji na polovicu. To vrijeme raste sa snagom transformatora. Udarna amplituda struje uklapanja ($I_{u\,max}$) izražava se višekratnikom amplitude nazivne struje ($I_{n\,max}$), koji se smanjuje s povećanjem snage transformatora [1].



Slika 2.1. Struja uklapanja [2]

U tablici 2.1. nalaze se neke mjerene vrijednosti višekratnika struje uklapanja ($I_{u\,max}$/ $I_{n\,max}$) i karakterističnog vremena uklapanja ($\tau_{50\%}$) o nazivnoj snazi transformatora.

Tablica 2.1. Vrijednost udarne struje za različite snage transformatora [3]

Nazivna snaga transformatora (MVA)	0.5	1	5	10	50
Omjer između $I_{u\,max}$ / $I_{n\,max}$	15	14	10	10	9
$\tau_{50\%}$ (s)	0.16	0.2	1.2	5	72

Zbog nelinearnosti krivulje magnetiziranja željezne jezgre, remanentni magnetizam može još povećati struju uklapanja. Narinuti sinusni napon zahtijeva sinusnu promjenu toka. Ako se transformator uklopi kad je napon maksimalan te kad stacionarni tok mora biti jednak nuli, struja uklapanja jednaka je stacionarnoj struji praznog hoda. Najveća amplituda struje uklapanja nastaje kad se transformator uklopi u trenutku prolaska napona kroz nulu, ako je tada remanentni tok $\Phi_R$suprotnog predznaka od trenutne vrijednosti. Magnetski tok se u takvim prilikama mijenja od vrijednosti Φ_R do $\Phi_R + \Phi_{max}$. Zbog zasićenja jezgre i velike nazivne magnetske indukcije, tako velika vrijednost toka treba veliku struju magnetiziranja [1].

Remanentni tok raste prema vrijednostima dobivenim integriranjem narinutog napona po vremenu. Ukupna vrijednost toka je zbroj maksimalnog toka nastalog u ustaljenim uvjetima i remanentnog toka nastalog u jezgri [2]:

$$\Phi_e = 2\Phi_m + \Phi_r = A_j\,(2B_m + B_r\,) \tag{2-1}$$

gdje je:

- A_j- površina poprečnog presjeka jezgre,
- B_m- maximalna indukcija,
- B_r- remanentna indukcija,
- Φ_e - ukupna vrijednost toka,
- Φ_m- maksimalni tok,
- Φ_r- remanentni tok.

Maksimalna struja uključenja je određena poprečnim presjekom područja koje se nalazi između jezgre i namota. Što je taj presjek veći, više se toka može zatvoriti tim putem, pa će potrebna

struja magnetiziranja (struja uključenja) biti manja. Ako je ostvarivo, poželjno je uključivanje obavljati preko vanjskog namota jer ima veću površinu A_δ.

Maksimalna vrijednost struje uključenja je [2]:

$$i_m = \frac{1}{\mu_0} \frac{A_j l_\delta}{A_\delta w} (2B_m + B_r - B_j) \quad (2\text{-}2)$$

gdje je:

- A_j- poprečni presjek jezgre,
- A_δ- poprečni presjek između namota i jezgre,
- B_m- normalna indukcija,
- B_r- remanentna indukcija,
- B_j- zasićena indukcija,
- l_δ- duljina silnica kroz zrak i namot,
- w- broj zavoja namota.

2.1. Problemi koje uzrokuje struja pri uklopu transformatora

U niskofrekvencijske prijelazne pojave u transformatorima obično se ubraja uklapanje neopterećenih transformatora. Parametar koji utječe na rezultate prijelaznih pojava je nelinearni induktivitet željezne jezgre transformatora. Kao posljedica nelinearnosti jezgre prilikom uklapanja neopterećenih transformatora, može doći do jakih struja udara. Osnovne karakteristike struja uklopa transformatora su velika amplituda koja može biti i do 10 I_{naz} kao i velika duljina trajanja do postizanja stacionarnog stanja. Takve struje mogu često uzrokovati nepotrebno djelovanje zaštitnih uređaja budući da mogu dostići vrijednosti struja kratkog spoja transformatora. Zbog toga su danas razvijene različite metode za razlikovanje struje uklapanja od struje kratkog spoja transformatora. Najčešće tehnike koje se upotrebljavaju su [4]:

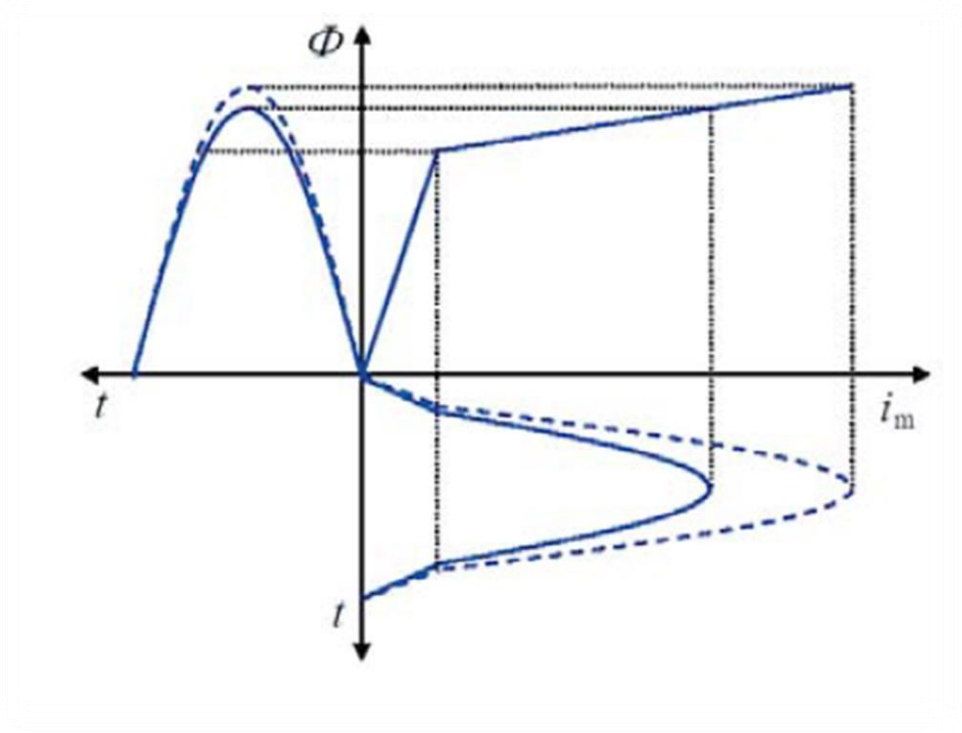
- Harmonijska analiza struje (praćenje drugog harmonika struje),
- Energetske metode i metode magnetskih karakteristika transformatora,
- Suvremene tehnike koje se baziraju na upotrebi wavelet transformacije i neuronskih mreža,
- Suvremenih korelacijskih algoritama.

Kod uklapanja neopterećenih transformatora, posljedice mogu biti privremeni, niskofrekvencijski, nesinusoidalni prenaponi koji mogu značajno energetski preopteretiti

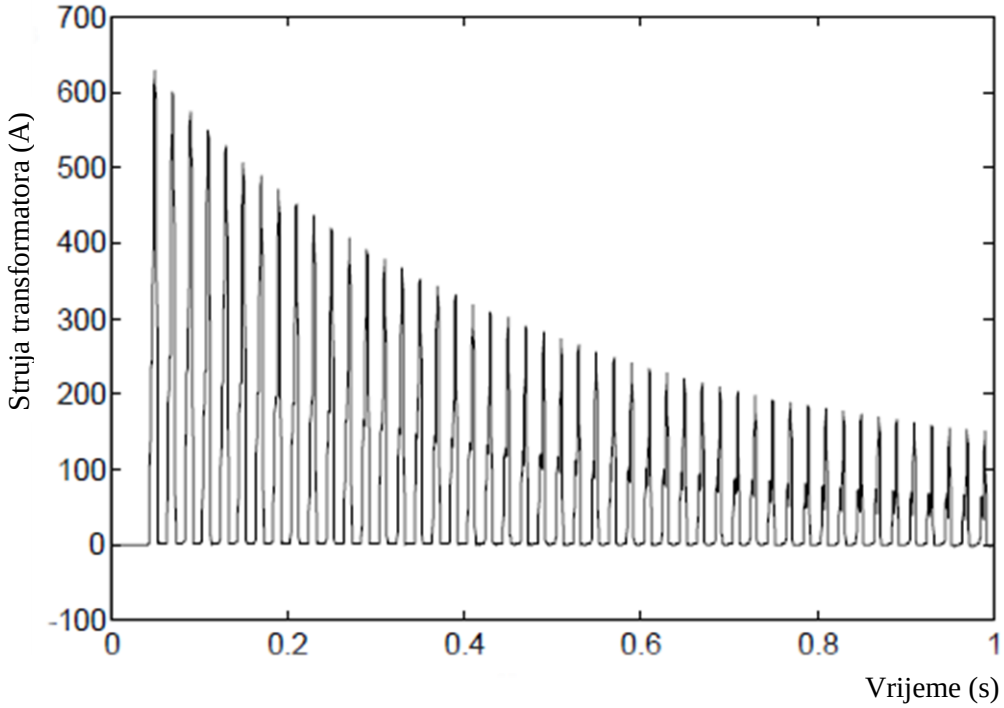
odvodnike prenapona koji su instalirani uz transformatore. Amplituda i duljina trajanja ovakvih privremenih napona su znatno izraženije u uvjetima slabih elektroenergetskih sustava.

Uklapanje odnosno isklapanje transformatora u električnim krugovima, koje sadrže kapacitivnosti, može dovesti do dugotrajnih prenapona. Prenaponi nastaju pri isklapanju naponskih mjernih transformatora te pri nereguliranim sklopnim operacijama trofaznih prekidača.

Posljedica nelinearnog karaktera željezne jezgre transformatora je nesinusoidalna struja magnetiziranja transformatora pri sinusoidalnom naponu napajanja tj. sinusoidalnom magnetskom toku što je prikazano na slici 2.2. Na toj istoj slici su prikazana su dva oblika struje magnetiziranja za dvije različite tjemene vrijednosti magnetskog toka. Magnetski tok tijekom prijelazne pojave uklapanja transformatora može poprimiti vrijednosti veće od svoje dvostruke nazivne vrijednosti te dolazi do jakih strujnih udara transformatora što je prikazano na slici 2.3. [4].



Slika 2.2. Nesinusoidalna struja magnetiziranja transformatora [4]



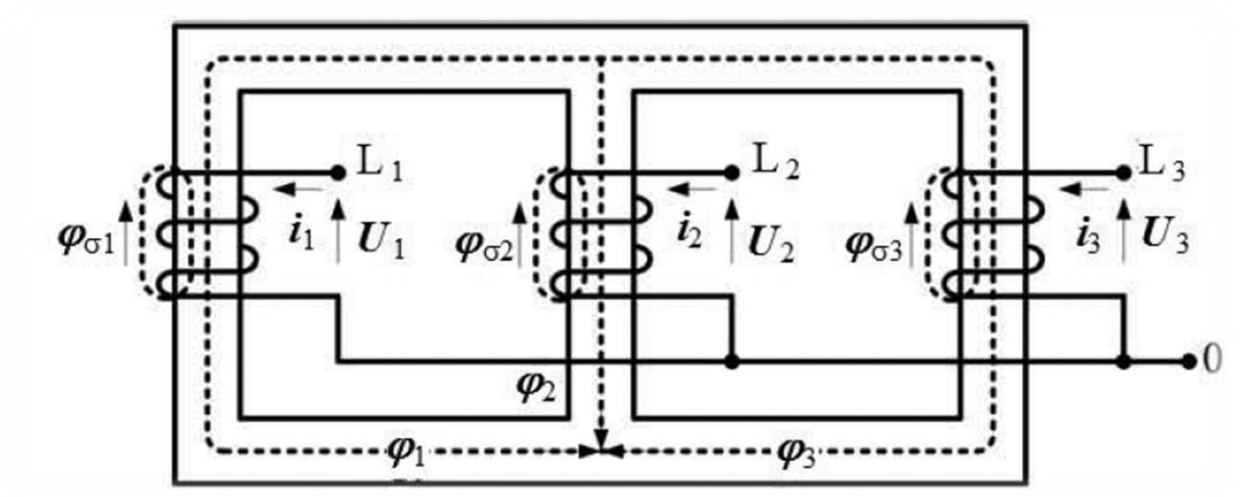
Slika 2.3. Tipičan valni oblik struje uklapanja transformatora [5]

Tablica 2.2. Problemi vezani uz zaštitne releje energetskih transformatora [5]

<table>
<tr><th>Poremećaj</th><th>Mjerenje</th><th>Zaštita</th><th>Pouzdanost</th><th>Brzina</th></tr>
<tr><td>Uklapanje</td><td rowspan="2">Točna procjena 2. i 5. harmonika traje jedan ciklus. Promjenjiva frekvencija stvara dodatne mjerne pogreške u procjeni harmoničkih omjera.</td><td rowspan="2">U modernim transformatorim zbog magnetskih svojstva jezgre 2. i 5. harmonik kod uklopa mogu ugroziti sigurnost releja.</td><td>Prisutstvo viših harmonika ne mora nužno biti povezana s uklopom. Harmonici mogu blokirati relej tijekom teških kvarova prilikom zasićenja strujnog transformatora.</td><td rowspan="2">Obično je potreban jedan puni ciklus za odbacivanje magnetskog uklopa.</td></tr>
<tr><td>Uzbuda</td><td>U struji kvara kod zasićenja strujnog transformatora može biti prisutan 5. hramonik zbog asimetrije rotora generatora ili drugih uređaja.</td></tr>
<tr><td>Vanjski kvarovi</td><td rowspan="2">Mjerene struje su promijenjene i iskrivljene.</td><td>Vanjska struja kvara može generirati pogrešan diferencijalni signal. Strujni transformatori kad su zasićeni tijekom vanjskih kvarova. Mogu proizvesti dodatni diferencijalni signal.</td><td>Sredstva za sprečavanje pogrešnog isključivanja tijekom vanjskih kvarova do određene mjere smanjuju pouzdanost releja.</td><td>Ograničavanje releja od okidanja (djelovanje) tijekom vanjskih kvarova može ograničiti brzinu rada releja.</td></tr>
<tr><td>Unutarnji kvarovi</td><td>Unutarnja struja kvara može biti manja od nekoliko posto nazivne vrijednosti.</td><td>Unutarnja struja kvara može biti niska samo nekoliko posto nazivne vrijednosti, te je pouzdanost ograničena.</td><td>Ograničavanje djelovanja releja tijekom trajanja pojave struje uklopa može ograničiti brzinu rada releja.</td></tr>
</table>

Problemi kod uklopa transformatora mogu se izbjeći upravljanim uklopom. Treba odrediti optimalan trenutak uklopa na osnovi trenutačnog napona mreže odnosno njegove faze i zaostalog magnetskog toka iz prethodnog isklopa. U svrhu istraživanja optimalnog trenutka uklopa napravljen je matematički model transformatora s uračunatim efektom zaostalog magnetizma.

Za europski tip transformatora izrađen je matematički model kojem su primarni namoti spojeni u zvijezdu s nul vodičem. Sekundar se ne uzima u obzir jer se opisuje model transformatora u praznom hodu (otvoren sekundar) što je najnepovoljniji slučaj s gledišta udarnih struja uklopa.
Na slici 2.4. prikazana je pojednostavljena shema trostupnog transformatora s primarnim namotima spojenima u zvijezdu s nul vodičem [6].



Slika 2.4. Pojednostavljena shema trofaznog transformatora u praznom hodu [6]

Jednadžbe električnog kruga za navedeni transformator su [6]:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u}_1 &= R\boldsymbol{i}_1 + N\frac{d\,(\boldsymbol{\Phi}_1+\boldsymbol{\Phi}_{\sigma 1})}{d_t} = R\boldsymbol{i}_1 + N\frac{d\boldsymbol{\Phi}_1}{d_t} + L_\sigma\frac{d\boldsymbol{i}_1}{d_t} \\ \boldsymbol{u}_2 &= R\boldsymbol{i}_2 + N\frac{d\,(\boldsymbol{\Phi}_2+\boldsymbol{\Phi}_{\sigma 2})}{d_t} = R\boldsymbol{i}_2 + N\frac{d\boldsymbol{\Phi}_2}{d_t} + L_\sigma\frac{d\boldsymbol{i}_2}{d_t} \\ \boldsymbol{u}_3 &= R\boldsymbol{i}_3 + N\frac{d\,(\boldsymbol{\Phi}_3+\boldsymbol{\Phi}_{\sigma 3})}{d_t} = R\boldsymbol{i}_3 + N\frac{d\boldsymbol{\Phi}_3}{d_t} + L_\sigma\frac{d\boldsymbol{i}_3}{d_t} \end{aligned} \qquad (2\text{-}3)$$

gdje je:

- N – broj zavoja primarnog namota,
- R – djelatni otpor primarnog namota,

- L_σ - rasipna reaktancija primarnog namota.

Vektori *u, i , Φ* predstavljaju napon, struju i magnetski tok.
Svakom stupu magnetske jezgre odgovara dan tok Φ_1, Φ_2, Φ_3. Suma tokova daje tok $\Phi_0$koji se zatvara kroz zrak [6].

3. HARMONICI

Harmonici se mogu prikazat matematičkom analizom izobličenih valnih oblika, prikazuju se Fourierovim redovima kao niz sinusnih funkcija različitih frekvencija. Valni oblici struje i napona u idealnom slučaju su savršene sinusoide. S povećanjem popularnosti elektroničkih i ostalih nelinearnih tereta, ovi valni oblici se često izobliče. Odstupanje od sinusnog vala može se prikazati harmonicima. Čisti naponski i strujni sinusni val nema izobličenja, dok izobličenja i harmonike ima nesinusoidalni val. Za određivanje razine izobličenja koristi se izraz za harmoničko izobličenje THD (engl. total harmonic distortion). Izraz označava postotak izobličenja osnovnog vala struje i napona [7].

3.1. Negativan utjecaj harmonika

Svi potrošači spojeni na mrežu zahtijevaju sinusni valni oblik napona i struje, pa shodno tome svako pojavljivanje viših harmonika imat će negativan efekt. Harmonici se pojavljuju kod opreme čija struja ne prati vjerno sinusni oblik napona. Njihov štetan učinak različito djeluje na opremu elektroenergetskog sustava. Harmonijsko izobličenje struje kao i naponsko dovodi do dodatnog zagrijavanja. Prisustvo harmonijskih napona kod transformatora povećava histerezne gubitke te gubitke nastale vrtložnim strujama. Zbog bolje zaštite transformatora od viših harmonika, razvijene su različite dizajnerske izvedbe, kontinuirano upredeni kabeli stavljaju se umjesto punog vodiča i stavljanje u rashladne cijevi. Strujni harmonici su problem jer uzrokuju povećanje gubitaka u transformatorima te im prijenosna moć može pasti na 50% kod napajanja tereta s izuzetno jakim valnim izobličenjem struje. Ako strujno izobličenje transformatora iznosi 5%, tada je narušena vjerodostojnost nazivnih podataka [7].

Struje viših harmonika stvaraju gubitke [8]:

- U primarnom namotu transformatora,
- U dalekovodima i ostalim dijelovima mreže gdje je transformator priključen.

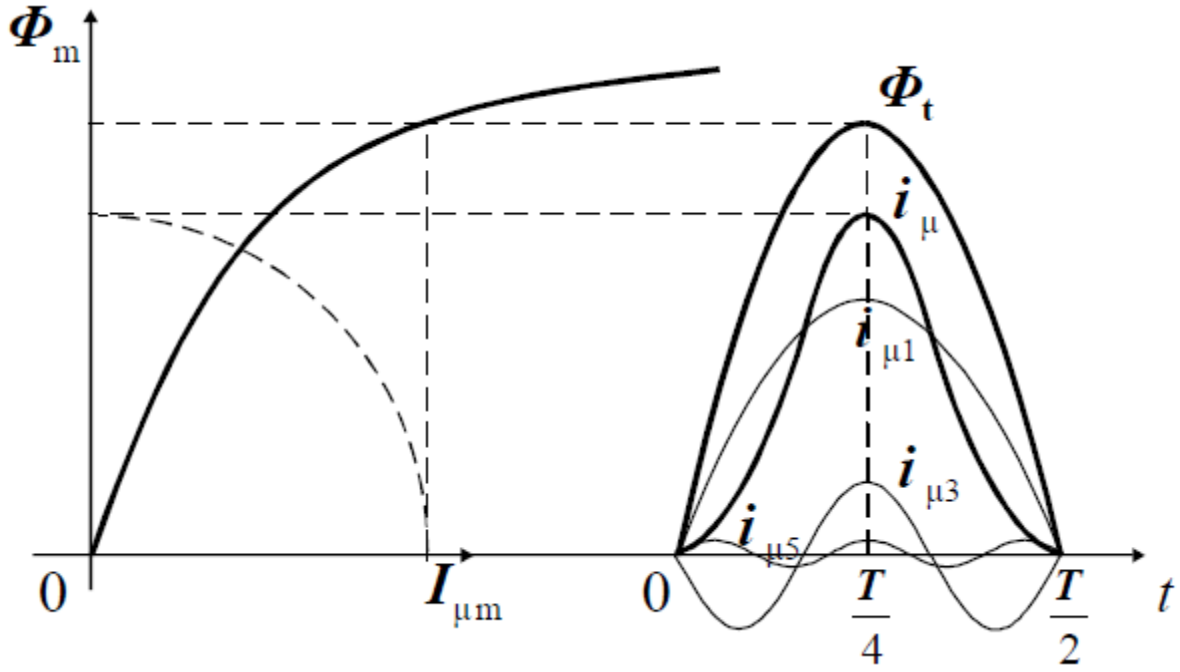
Strujni harmonici mogu izobličiti naponski val i izazvati naponske harmonike. Naponska izobličenja utječu na osjetljive elektroničke motore i kondenzatorske baterije. Struje viših harmonika stvaraju padove napona [8] :

- Na rasipnim reaktancijama generatora te stvara deformacije izlaznog napona generatora. Preko transformatora deformirani napon se prenosi u sekundarnu mrežu,
- U ostalim dijelovima mreže.

3.2. Viši harmonici

Viši harmonici prouzrokuju gubitke i teškoće te se nastoji eliminirati ih ili barem smanjiti . Glavni izvor viših harmonika u transformatoru je struja magnetiziranja (iμ) . Ona je harmonička funkcija koja sadrži osnovni i neparne više harmoničke članove.

U struji magnetiziranja izrazit je treći harmonički član koji iznosi oko trećine amplitude osnovnog vala. 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 [1].



Slika 3.1. Nesinusni oblik struje magnetiziranja željeza; a) Osnovni harmonik $(i_{\mu 1})$, b) Treći harmonik $(i_{\mu 3})$, c) Peti harmonik $(i_{\mu 5})$, d) Ukupna struja [8].

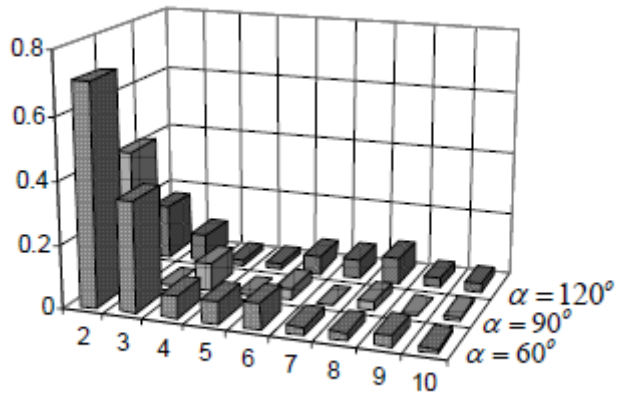
Furijerovom analizom dobivene su amplitude pojedinih harmonika koje su prikazane u tablici 3.1. Amplituda višeg harmonika pada s povećanjem reda harmonika.

Tablica 3.1. Harmonici struje magnetiziranja [8]

Harmonik	Iznos [%]
1.	100
3.	24,5
5.	3,43
7.	1,72
9.	0,26

Djelovanje viših harmonika ovisi o :

- spoju primarnog namota,
- uzemljenju,
- tipu transformatora.



Slika 3.2. Sadržaj harmonika u struji uklopa [5]

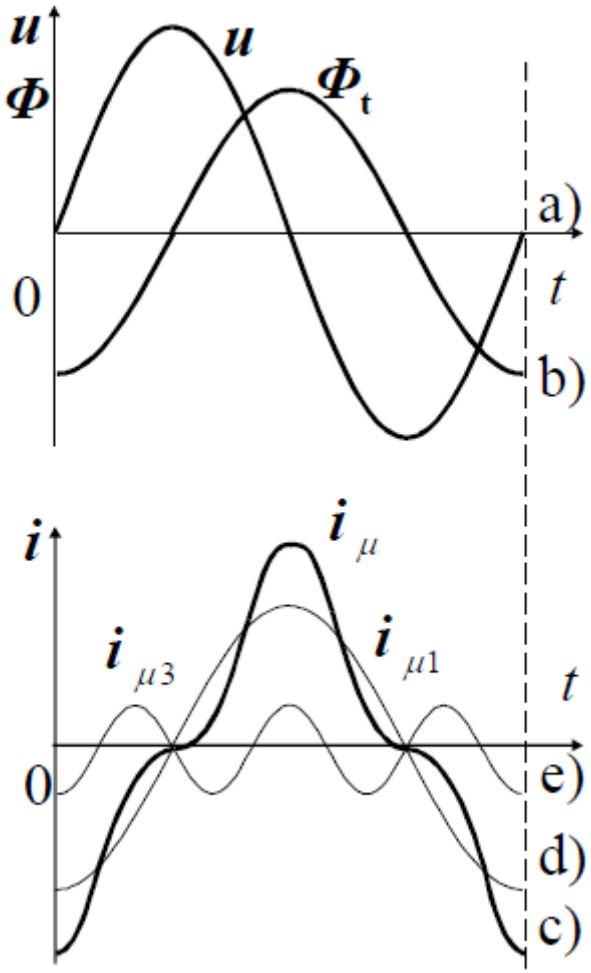
Na slici 3.2. vidljivo je da drugi harmonik dominira zbog velike dc komponente. Međutim količina drugog harmonika može se smanjiti ispod 20%. Minimalni sadržaj drugog harmonika ovisi uglavnom o magnetskim svojstvima jezgre. Što je gustoća protoka zasićenja manja, to je veća količina drugog harmonika. Moderni transformatori su izrađeni od materijala koji imaju dobra magnetska svojstva te se u struji uklopa može naći niska količina drugog harmonika. Budući da je drugi harmonik osnovni kriterij za stabiliziranje diferencijalnih releja tijekom uklopa, pojavljuju se određene poteškoće pri zaštiti takvih modernih transformatora.

3.3. Različiti slučajevi spojeva primarnog namota i tip jezgre transformatora

U ovom podpoglavlju biti će opisani različiti spojevi primarnog namota transformatora i kako pojedini spojevi namota blokiraju nastanak pojedinih harmonika.

3.3.1. Zvijezda spoj namota s nul-vodom i jezgra s magnetskim povratnim putem

Kod spoja transformatora zvijezda s nul-vodom i jezgara s magnetskim povratnim putem, dobije se kod narinutog sinusoidalnog napona i sinusidalni tok te struja magnetiziranja koja obiluje višim harmonicima. Svi viši harmonici trećeg reda su istofazni pa se zatvaraju preko zajedničkog nul-voda. Američki tip transformatora omogućuje prirodno magnetiziranje jezgre, no vuče sve više harmonike struje magnetiziranja. Ti harmonici imaju višu frekvenciju. Induktivni padovi napona u reaktancijama zato su proporcijalno povećanoj frekvenciji veći, pa zato i male struje viših harmonika mogu prouzročiti štetu. Struje viših harmonika mogu prouzročit padove napona u mreži, a i u rasipnim reaktancijama generatora, koji imaju za posljedicu deformaciju krivulje napona ispred transformatora koji onda takav deformiran napon prenosi u sekundarnu mrežu [9].



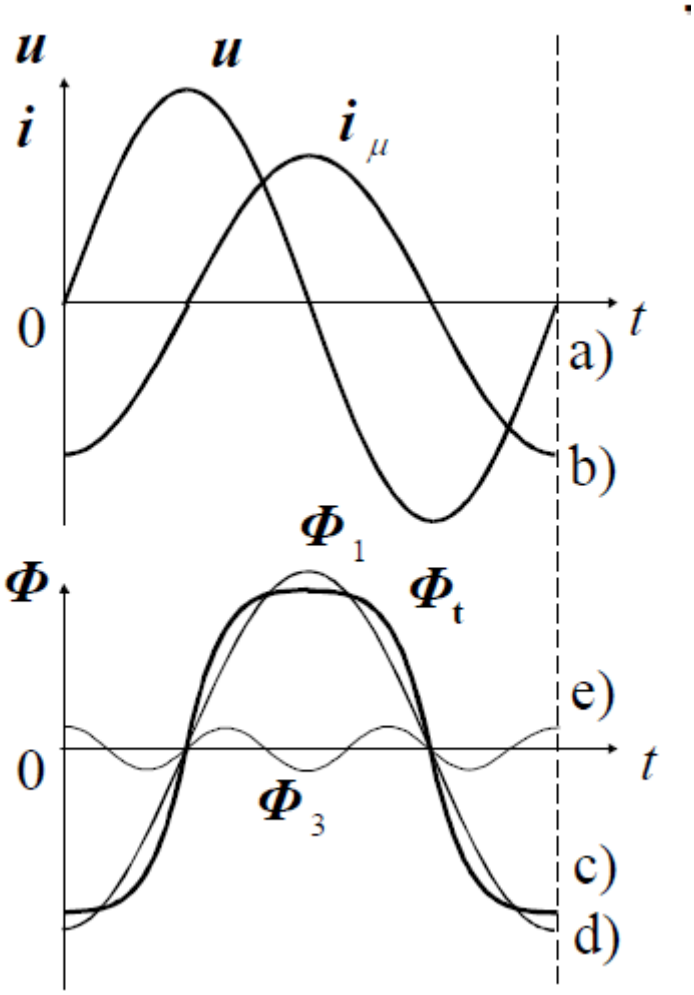
Slika 3.3. Zvijezda spoj namota s nul-vodom i jezgra s magnetskim povratnim putem [8]

Na slici 3.1. prikazan je napon, magnetski tok i struja magnetiziranja u jednoj fazi kod spoja transformatora u zvijezdu s nul-vodom i s magnetskim povratnim putem te:

a) narinuti napon,
b) magnetski tok,
c) ukupna struja magnetiziranja,
d) osnovni harmonik struje,
e) treći harmonik struje.

3.3.2. Zvijezda spoj namota bez nul-voda i jezgra s magnetskim povratnim putem

Budući da nema nul- voda, ne mogu se zatvoriti svi viši harmonici trećeg reda. Ako je struja sinusna, zbog zasićenja u željezu, tok mora biti nesinusan. Osnovni harmonik inducira sinusni protunapon koji održava ravnotežu s narinutim sinusnim naponom. Treći harmonik toka, koji je u svim stupovima istofazan, treba u svim trima fazama inducirati napone s trostrukom frekvencijom. Naponi u sve tri faze su istofazni, pa stoga ne mogu potjerati nikakvu struju jer nema nul-voda. Treći harmonik toka može kod većih zasićenja postići amplitudu iznosa 30% amplitude osnovnog harmonika. Zbog te činjenice onemogućuje primjenu zvijezda spoj namota bez nul–voda kod transformatora s magnetskim povratnim putem [9].



Slika 3.4. Zvijezda spoj namota bez nul-voda i jezgra s magnetskim povratnim putem [8]

Na slici 3.2. prikazani su naponi, magnetski tok i struja magnetiziranja u jednoj fazi kod spoja transformatora u zvijezdu bez nul-voda i magnetskim povratnim putem. Na slici 3.2. označen je:

a) narinuti napon,
b) narinuta sinusna struja magnetiziranja,
c) ukupni magnetski tok,
d) osnovni harmonik magnetskog toka,
e) treći harmonik toka.

3.3.3. Zvijezda spoj namota bez nul-voda i jezgra bez magnetskog povratnog puta

Amplituda trećeg harmonika toka je mnogo manja jer se veliki magnetski otpor zraka između oba jarma tokovi se mogu samo tim putem zatvarati. Kako nema nul-voda, narinuti napon može tjerati samo sinusnu struju. Kako tokovi trećeg harmonika nemaju povratnog puta kroz željezo, nego se moraju zatvarati kroz zrak, to će ovaj treći harmonik struje zbog velikog magnetskog otpora u zraka od jarma do jarma potjerati relativno slab tok trećeg harmonika.

Inducirani naponi trećeg harmonika su skoro u potpunosti eliminirani. Europski tip jezgraskog transformatora omogućuje zvijezda spoj bez nul-voda jer skoro u potponsti eliminira napone trećeg harmonika. Peti i sedmi harmonik pojavljuju se samo u struji. U odnosu na nominalnu struju ovi viši harmonici su maleni te praktički ne dolaze do izražaja [8,9].

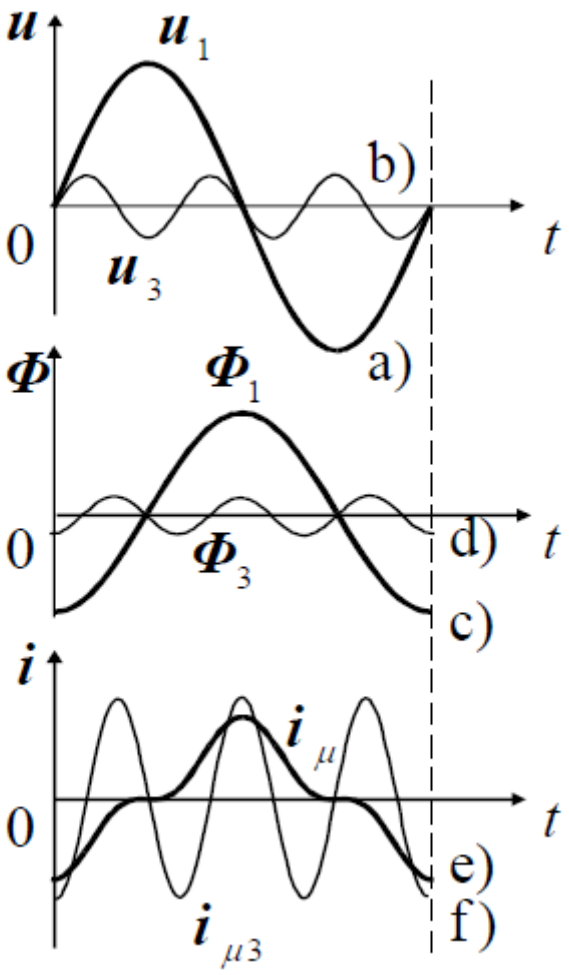
3.3.4. Zvijezda spoj namota s nul-vodom i jezgra bez magnetskog povratnog puta

Ima sinusni tok i nesinusnu struju magnetiziranja. Za napon trećeg harmonika vrijedi isto pravilo kao i za prvi harmonik, a to je da on potjera struju koja je potrebna da uzbudi tok trećeg harmonika, neophodan za induciranje protunapona trećem harmoniku napona mreže. Pošto nema magnetskog povratnog puta taj se tok mora zatvarati po zraku od jarma do jarma. Zato treba mnogo amperzavoja i zato može treći harmonik struje magnetiziranja postati puno veći od osnovnog harmonika struje magnetiziranja.

S obzirom na treći harmonik spoj primarnog namota u zvijezdu u dva slučaja povoljan:

- zvijezda spoj namota s nul-vodom i jezgra s magnetskim povratnim putem,
- zvijezda spoj namota bez nul-voda i jezgra bez magnetskog povratnog puta.

Prema pravilima, oblik napona može imati 5% odstupanje amplitude od sinusoide osnovnog harmonika [8,9].



Slika 3.5. Zvijezda spoj namota s nul-vodom i jezgra bez magnetskog povratnog puta [8]

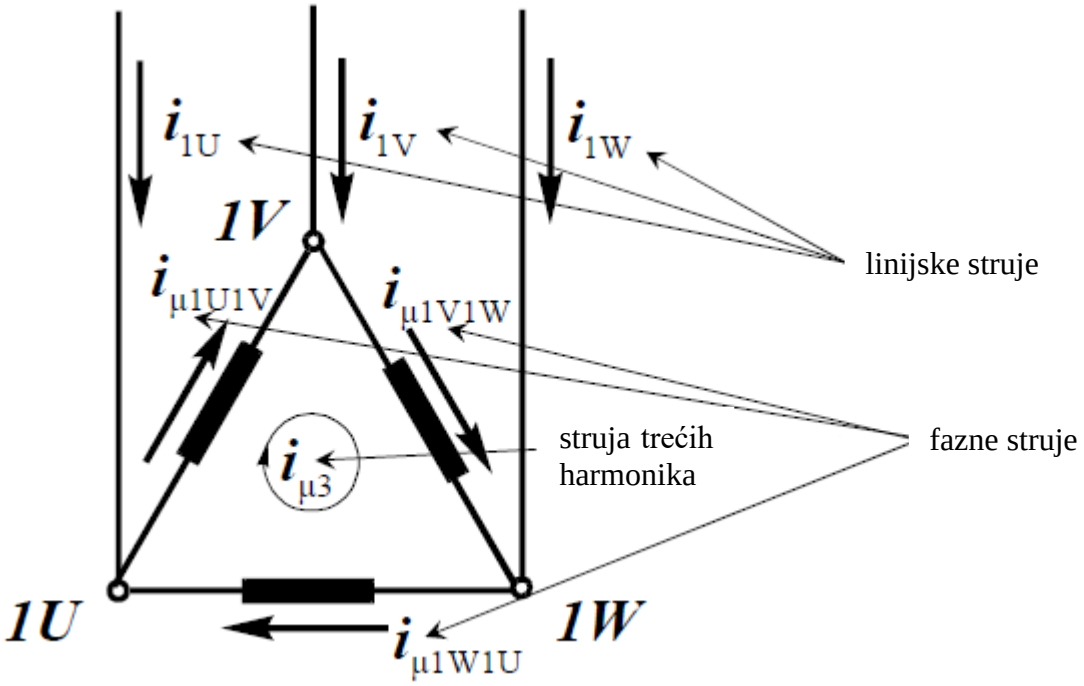
Na slici 3.3. prikazani su napon, magnetski tok i struja magnetiziranja u jednoj fazi kod spoja transformatora u zvijezdu s nul-vodom i bez magnetskog povratnog puta za slučaj kad napon ima osnovni i treći harmonik. Na slici 3.3. su označeni:

a) narinuti osnovni harmonik napona,
b) narinuti treći harmonik napona,
c) osnovni harmonik magnetskog toka,
d) treći harmonik magnetskog toka,
e) nesinusna struja,
f) treći harmonik struje.

3.3.5. Trokut spoj namota

Kod spoja primarne strane transformatora u trokut, mijenjat će se kraj sinusnog napona mreže te sinusno tok u jezgrama transformatora. Svaki od namota priključen je direktno na mrežu pa se u svakom namotu mora inducirati protunapon koji je sinusan. Zbog trokutnog spoja, svaki će namot uzimati iz mreže sve one harmoničke komponente koje treba za uzbuđivanje sinusnog toka. Svaki namot treba za uzbuđivanje sinusnog toka uzbudnu struju.

U spoju trokut mreža ne dobiva treći harmonik struje, ali ima prirodno magnetiziranje jer transformator sam stvara potrebu za izobličenom strujom koju treba za sinusno magnetiziranje. Budući da tok nema treći harmonik, nema niti inducirani napon u namotajima komponenta trostruke frekvencije [8,9].



Slika 3.6. Struje magnetiziranja kod spoja transformatora u trokut [8]

4. ZAŠTITA TRANSFORMATORA

Kod uklopa transformatora može doći do nepotrebne prorade zaštite, a da se izbjegne taj problem postoje zaštitni releji koji su rješenje za taj problem te će neki od njih biti navedeni u ovome poglavlju.

4.1. Zaštitni relej REF54x

Zaštitni relej REF54x dio je ABB sustava i dodatno proširuje funkcionalnost i fleksibilnost koncepta. To je moguće zbog suvremene tehnologije koja se primjenjuje na hardverskom i softversko rješenju. Veća učinkovitost je postignuta korištenjem višeprocesorske arhitekture. Digitalna obrada signala u kombinaciji sa snažnim procesorom olakšava paralelne operacije i poboljšava vrijeme i točnost odziva. Stezaljke releja su dizajnirane za zaštitu, kontrolu, mjerenje i nadzor mreža srednjeg napona. Mogu se koristiti s različitim vrstama rasklopnih postrojenja, uključujući pojedinačne sabirnice i dvostruke sabirnice. Zaštitne funkcije također podržavaju različite vrste mreža, kao što su izolirane neutralne mreže, rezonantno uzemljene mreže i djelomično uzemljene mreže. Relej posjeduje širok spektar zaštite, kontrole, mjerenja i praćenja stanja s obzirom na ukupno opterećenje procesora. U usporedbi sa zasebnom uporabom proizvoda, kombinacija željenih funkcija pruža ekonomičnije rješenje [10,11].

Funkcije zaštitnog relej REF54x kategorizirane su [11]:

- Zaštitne funkcije,
- Mjerne funkcije,
- Kvaliteta napajanja,
- Kontrolne funkcije,
- Komunikacijske funkcije,
- Opće funkcije,
- Standardne funkcije.

Zaštita je jedna od najvažnijih funkcija. Blokovi funkcije zaštite međusobno su neovisni i imaju vlastite postavke te snimanje podataka. Za zaštitne funkcije koriste se razdjelnici napona ili naponski transformatori temeljeni na mjerenju napona.

Jedna od primjena zaštitnog relej REF54x u praksi može biti za snimanje prijelaznih pojava koje se javljaju prilikom uključivanja energetskog transformatora i puštanja u prazni hod. Relej ima

mogućnost pamćenja te prikaz vremenskih odziva električnih parametara. Brzina uzorkovanja mjernih točaka je 2kHz što znači da može obraditi 2000 uzoraka u sekundi [10,11].



Slika 4.1. Zaštitni relej REF54x [11]

4.2. Zaštitni relej SEL-351

Kod uklapanja neopterećenih transformatora može doći do jakih struja. Takve struje mogu često uzrokovati nepotrebno djelovanje zaštitnih uređaja zato što mogu dostići vrijednosti struja kratkog spoja transformatora. Zaštitnim relejem SEL-351 poboljšavaju se sigurnosne zaštite transformatora prilikom uklopa. Prisutnost drugog harmonika u struji magnetiziranja može se iskoristi za prepoznavanje struje uklopa transformatora. Relej koristi logiče sklopove za blokiranje drugog harmonika [12,13].

Zaštitne funkcije [12]:

- Blokiranje drugog harmonika prilikom uključivanja transformatora,
- Poboljšavaju otkrivanje kvara prekidača,
- Pruža dodatnu sigurnost za razlikovanje velikih opterećenja i grešaka,

- Ugrađena komunikacijska logika koja smanjuje vrijeme trajanja kvara koji negativno utječe na opremu elektroenergetskog sustava.

Relej SEL-351 ima mnoge sustave zaštite, nadzora i upravljanja u elektroenergetskom sustavu. Funkcije zaštita releja mogu se koristi za gotovo sve strujne krugove, prekidače, transformatore i generatore. Kod uklapanja energetskog transformatora, struje uklapanja mogu biti i desetak puta veće od nazivne vrijednosti. Kako se radi o prijelaznoj pojavi vrlo kratkog trajanja, ovakvo stanje ne smatra se stanjem kvara. Tipično obilježje ovakvog stanja je pojava drugog harmonika u struji uklopa. Funkcija za otkrivanje takve pojave mjeri veličinu drugog harmonika i koristi je za blokadu nadstrujnih zaštita koje bi u ovakvim uvjetima mogle uzrokovati neželjen isklop prekidača [12,13].



Slika 4.2. Zaštitni relej SEL-351 [12]

4.3. Zaštitni relej RFD

Zaštitni relej RFD nudi kompletan opseg zaštitnih funkcija potrebnih za zaštitu dvonamotnih energetskih transformatora i mogućnost pregleda i upravljanja za više aparata. Zbog svoje sklopovske arhitekture i modularnog programskog rješenja, primjenjiv je za zaštitu svih dvonamotnih transformatora. Najvažnija mogućnost releja je lokalni i daljinski prikaz svih trenutno mjerenih veličina, nadzor svih aparata u polju, upravljanje istima, snimanje poremećaja električnih veličina za vrijeme kvarova, nadzor temperature transformatora, nadzor istrošenosti prekidača te prijenos podataka prema SCADA sustavu. Vremenske karakteristike odgode

djelovanja prema IEC i IEEE standardima omogućavaju jednostavnu integraciju releja u već postojeće sustave zaštite, uz zadržavanje vremenske selektivnosti primijenjene u sustavu [14].

Zaštitne funkcije [14]:

- Stabilizirana trofazna diferencijalna zaštita transformatora - Diferencijalna zaštita je osnovna zaštita energetskih transformatora. Djeluje bez vremenske odgode. Ona ih štiti u odnosu na međufazne kratke spojeve, kao i u odnosu na dozemne spojeve na VN strani transformatora te u slučaju spojeva među zavojima transformatora. Pri zaštiti energetskog transformatora diferencijalnom zaštitom prilike su složene jer su njegove nazivne struje na VN i NN strani međusobno različitih iznosa. Funkcija se sastoji od jednog stabiliziranog stupnja te jednog nestabiliziranog trenutnog člana. Kod starta transformatora često se javljaju velike udarne struje koje mogu prouzročiti neželjeno djelovanje diferencialne zaštite, moguće je blokirati stabilizirani stupanj diferencijalne zaštite. Blokada se vrši detekcijom drugog ili petog ili oba harmonika u struji.
- Stabilizirana, ograničena, nisko impedantna zemljospojna zaštita primara transformatora - Ograničena zemljospojna zaštita kao i diferencijalna zaštita radi na principu usporedbe struja. Navedena zaštita se sastoji od jednog stupnja. Taj stupanj je stabiliziran s obzirom na iznos struje kroz transformator i podložan je blokadama kod detekcije uklopa transformatora.
- Stabilizirana, ograničena, nisko impedantna zemljospojna zaštita sekundara transformatora,
- Ograničena, visoko impedantna zemljospojna zaštita transformatora,
- Nadstrujna zaštita primara transformatora,
- Zemljospojna zaštita primara transformatora,
- Zemljospojna zaštita sekundara transformatora,
- Zaštita primara od negativne komponente struje,
- Zaštita primara od gubitka faze,
- Zaštita od termičkog preopterećenja transformatora,
- Zaštita od zatajenja prekidača primara,
- Registracija uklopa transformatora na osnovu drugog harmonika **(**eng. Inrush**)** - Kako se kod starta energetskih transformatora mogu javiti velike udarne struje koje mogu prouzročiti neželjeno djelovanje zaštite, potrebno je takvo stanje detektirati i u tome

slučaju blokirati zaštitu kod pojave drugog harmonika. Funkcija detekcije starta transformatora djeluje na nadstrujnu, zemljospojnu i ograničenu nisko impendantnu zemljospojnu zaštitu, dok diferencijalna zaštita ima vlastitu detekciju starta transformatora.

- Nadzor isklopnog kruga prekidača primara i sekundara,
- Termički nadzor transformatora mjerenjem temperature.



Slika 4.3. Prednja strana releja [14]



Slika 4.4. Stražnja strana releja [14]

4.4. Zaštitni relej RIUX

Relej tipa RIUX predvodnik je KONPRO generacije zaštitnih releja, služe za zaštitu srednje naponskih energetskih postrojenja u distribuciji i industriji. Relej sadrži sve potrebne zaštitne funkcije potrebne za zaštitu srednje naponskih vodova. Osim osnovne zaštite relej pruža i niz drugih mogućnosti te tako omogućuje smanjenje broja uređaja u polju, a samim time smanjuje se i troškovi održavanje opreme. Važnije mogućnosti su lokalni i daljinski prikaz trenutno mjerenih veličina, nadzor aparata u polju, upravljanje prekidačem, snimanje poremećaja električnih veličina za vrijeme kvarova, mjerenje energije, mjerenje THD-a, lokator kvara i prijenos podataka prema SCADA sustavu [15].

Zaštitne funkcije [15]:

- Zaštita prstenastih i radijalnih mreža,
- Otkrivanje uklopa transformatora – Kod uklopa transformatora struje mogu dostići vrijednosti nekoliko desetaka puta veće od nazivne vrijednosti. Budući da se radi o prelaznoj pojavi kratkog trajanja, ovakvo stanje ne smatra se stanjem kvara. Kod ovog stanja karakterističa je pojava drugog harmonika u struji uklopa. Funkcija za otkivanje takve pojave (InRush) mjeri veličinu drugog harmonika i koristi je za blokadu

nadstrujnih zaštita koje bi u ovakvim uvjetima mogle uzrokovati neželjen isklop prekidača.

- Funkcija hladnog starta – koristi se zaštitu mreže u kojoj se nalazi velik broj uređaja koji nakon dugotrajnog beznaponskog stanja prilikom uklopa trebaju veliku struju. Ova funkcija registrira beznaponsko stanje te se veličina podešene prorade nadstrujnih zaštita podiže do tražene vrijednosti te se tako onemogućava neželjena prorada zaštite.
- Nadstrujna zaštita,
- Zemljospojna zaštita,
- Usmjerena nadstrujna zaštita,
- Nadnaponska zaštita,
- Podnaponska zaštita,
- Zaštita od inverzne komponente struje,
- Zemljospojna zaštita,
- Frekventna zaštita,
- Zaštita od prekida faze,
- Automatski ponovni uklop,
- Sinkronizacija vremena.



Slika 4.5. Prednja strana releja [15]



Slika 4.6. Stražnja strana releja [15]

5. ZAKLJUČAK

U ovome radu analiziran je utjecaj harmonijskih članova u struji uklopa kod uklapanja trofaznih transformatora. Najveća amplituda struje uklopa javlja se kad se transformator uklopi u trenutku prolaska napona kroz nulu. Kao posljedica jakih struja udara, mogu se javiti problemi koji se mogu izbjeći upravljivim uklopom. Potrebno je odrediti optimalan trenutak uklopa na osnovu trenutnog napona mreže odnosno njegove faze i zaostalog magnetskog toka iz prethodnog isklopa.

Viši harmonici ne mogu s naponom mreže dati nikakav radni učinak zato što svi potrošači spojeni na mrežu zahtijevaju sinusni valni oblik napona i struje pa svaka pojava viših harmonika ima negativan efekt. Jedan od načina smanjenja harmonijske struje je spoj namota transformatora u trokut što dovodi do blokiranja svih harmonika koji su višekratnici broja tri. Unošenjem faznog pomaka od 30 stupnjeva, spajanjem sekundara u zvijezdu i trokut dobiva se efekt 12-pulsnog ispravljača te se eliminiraju peti i sedmi harmonik.
Struja uklopa je prijelazna pojava vrlo kratkog vijeka trajanja i obično se pojavljuje drugi harmonik. Funkcija zaštitnih releja je otkrivanje takve pojave i blokada nadstrujnih zaštita koje bi u ovom slučaju mogle isklopiti prekidač.

LITERATURA

[1] R. Podhorsky, H. Požar, D. Štefanović, Tehnička enciklopedija, dio Transformator, Zagreb: Leksikografski zavod Miroslav Krleža 1997.g.

[2] Z. Maljković, Karakteristike i dinamički modeli transformatora, DIS.5. Prijelazne pojave u transformatorima, Predavanja, Ak.god. 2013/2014.

[3] Ž. Špoljarić, K. Miklošević, Ž. Hederić, V. Jerković**,** Transformer Inrush Current Problems and Solutions, Department of Electromechanical Engineering, University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering Osijek HR-31000, Croatia.

[4] A. Tokić, I. Uglešić, Numerički proračun niskofrekvencijskih elektromagnetskih prijelaznih pojava u energetskim transformatorima, Energija, god. 56(2007), br. 5., str. 584-607.

[5] B. Kasztenny, A. Kulidjian, An improved transformer inrush restraint algorithm increases security while maintaining fault response performance, 53. Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, April 11-13, 200.

[6] G. Petrović, T. Kilić, O. Bego, Smanjenje udarnih struja uklopa trofaznog energetskog transformatora, Energija, god. 57(2008), br. 3., str. 350-367.

[7] D. Galzina, Harmonici u visokonaponskoj mreži, HEP http://www.fer.hr/_download/repository/Galzina,KDI.pdf (25.6.2017.)

[8] M. Pužar, I. Mandić, Transformatori i električni rotacijski strojevi, Predavanja, Osijek, 2007.

[9] A. Dolenc, Transformatori I i II, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.

[10] D. Crnković, N. Vrandečić, M. Stojkov, Prijelazne pojave u praznom hodu energetskog transformatora 20/0,4 kV, ISSN 1330-3651, UDC/UDK 621.314:517.443.

[11] ABB , REF 54x, Technical Reference Manual, General, 1MRS750527-MUM.

[12] SEL-351 Protection System,

https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Product%20Literature/Data%20Sheets/351-5-6-7-PS_DS_20170215.pdf?v=20170227-062838 (22.6.2017.)

[13] A. Sinclair, Detect Transformer Inrush and Improve Protection Security on Feeders Using Second-Harmonic Blocking Logic in the SEL-351 and SEL-351S ,

https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Application%20Notes/AN2013-11_20130304.pdf?v=20150916-135840 (23.6.2017.)

[14] RFD tehnički opis,

http://www.koncar-inem.hr/wp-content/uploads/2015/03/RFD-tehnicki-opis.pdf (24.6.2017.)

[15] RIUX tehnički opis,

http://www.koncar-inem.hr/wp-content/uploads/2015/03/RIUX-tehnicki-opis.pdf (18.8.2017.)

SAŽETAK

Problem koji se analizirao u ovom radu je utjecaj harmonijskih članova u struji uklopa kod uklapanja trofaznih transformatora. Navedeni su harmonijski članovi koji su važni za prepoznavanje nastanka pojave struje uklopa za ispravan rad zaštitnih releja. Predstavljeni su problemi koji se javljaju prilikom prepoznavanja nastanka struje uklopa kod modernih transformatora te kako se isti rješavaju. Objašnjeni su različiti tipovi zaštitnih releja trofaznog transformatora koji se koriste za zaštitu i prepoznavanje struje uklopa.

Ključne riječi: struja uklopa, harmonici, zaštitni relej.

Analysis of the influence of harmonic members in the inrush current of three-phase transformers

ABSTRACT

Problem which is analyed in this paper is the influence of harmonic members in the inrush current of energization three-phase transformers. Here are mentioned harmonic which are important for recognizing the inrush current for the correct work of protection relay. Here are introduced problems which occurs during the recognition of forming inrush current on modern transformers how are they being solved. There are explained different types of protection relays of three-phase transformers which are used for protection and recognizing the inrush current.

Keywords: inrush current, harmonic, protection relay.

ŽIVOTOPIS

Jurica Marciuš rođen je 23.1.1995. godine u Čakovcu. Nakon završetka osnovne škole upisuje srednju Tehničku školu u Čakovcu, smjer: tehničar za računalstvo. Nakon završetka srednje škole upisuje preddiplomski stručni studij elektroenergetike na Fakultetu elektrotehnike računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.