

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

STRUJNI MJERNI TRANSFORMATORI

Rijeka, rujan 2016.

Siniša Kanjuh

0069045171

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

STRUJNI MJERNI TRANSFORMATORI

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

Rijeka, rujan 2016.

Siniša Kanjuh

0069045171

TEHNIČKI FAKULET

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

Z A D A T A K
za završni rad

Pristupnik: Siniša Kanjuh

Matični broj: : 0069045171
Lokalni matični broj: 13800058

Naziv zadatka: **STRUJNI MJERNI TRANSFORMATORI**

Title (*English*): **CURRENT MEASUREMENT TRANSFORMERS**

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

Općenito o strujnim mjernim transformatorima. Točnost, snaga, karakteristike, uzemljenje i izvedbe strujnih mjernih transformatora. Izbor strujnih mjernih transformatora za priključak zaštitnih i mjernih uređaja.

Mentor:



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

Predsjednica Povjerenstva:



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

Student:



Siniša Kanjuh

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

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

IZJAVA

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

(Strujni mjerni transformatori) uz konzultiranje s mentorom.

Siniša Kanjuh

Rijeka, rujan 2016.

0069045171

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem roditeljima koji su se poprilično žrtvovali kako bi mi pružili priliku ostvariti osobne ciljeve. Posebice bih se zahvalio sestri koja je uvijek bila pozitivan uzor i primjer upornosti i ambicije.

Prijateljima s kojima sam proveo lijepe trenutke tijekom studija i svima koji su pružali stalnu podršku.

Također, mentorici ujedno i voditeljici studija mr.sc. Marijani Živić Đurović na svoj ljubaznosti i obzirnosti koju je pokazivala tijekom školovanja.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OSNOVNO O STRUJNIM MJERNIM TRANSFORMATORIMA	2
2.1. Princip rada transformatora.....	5
2.2. Zasićenje feromagnetske jezgre.....	8
2.3. Pravilnik o mjeriteljskim i tehničkim zahtjevima za mjerne transformatore.....	13
3. IZBOR I PARAMETRI STRUJNIH TRANSFORMATORA	18
4. PODJELE STRUJNIH TRANSFORMATORA ZA ZAŠTITU PREMA KLASAMA TOČNOSTI.....	38
5. UZEMLJENJE ZVJEZDIŠTA TRANSFORMATORA.....	44
6. IZVEDBE STRUJNIH MJERNIH TRANSFORMATORA.....	46
6.1. Epoksidni strujni mjerni transformator.....	47
6.2. Uljni strujni mjerni transformator.....	52
6.2.1. Lončasta izvedba.....	54
6.2.2. Križno-prstenasta izvedba.....	55
6.2.3. Glavasta izvedba.....	56
6.3. Plinom izolirani strujni mjerni transformator.....	57
6.4. Kombinirani transformator.....	58
6.4.1. Kombinirani SF6 plinom izolirani transformator.....	59
7. STRUJNA KLIJEŠTA.....	61
8. TRANSFORMATOR ZA DETEKCIJU STRUJNE NESIMETRIJE FAZA.....	64
9. NEKONVENCIONALNI STRUJNI MJERNI TRANSFORMATORI.....	65
9.1. Mjerenje struje shunt otpornikom.....	66
9.2. Zavojnica Rogowskog.....	67
9.3. Magnetooptički pretvarač.....	71
9.4. Mjerila potrošnje električne energije.....	75
9.5. Hallova sonda.....	76
9.6. Magnetoopornički senzori magnetskog polja.....	80
9.6.1. AMR senzor.....	80
9.6.2. GMR senzor.....	85
10. ZAKLJUČAK.....	88
11. LITERATURA.....	89
12. SAŽETAK I POPIS KRATICA.....	91

1. UVOD

Strujni mjerni transformatori (u daljnjem tekstu *kratica SMT*) većinom služe za priključenje ampermetara prilikom mjerenja struja velikih vrijednosti kada je teško samostalno upotrijebiti neke od uobičajenih mjernih instrumenata. Koriste se za priključenje strujnih krugova brojila kao i svih ostalih mjernih instrumenata. Osim funkcije transformacije struje na mjerljive iznose SMT-i mogu ujedno i izolirati mjerne instrumente.

Primjena SMT-a je raznolika, a područje korištenog tehničkog znanja pri izradi je široko (pogotovo u nekonvencionalnim izvedbama). U ovome radu poseban naglasak biti će na modernim izvedbama nekonvencionalnih transformatora. Realno razmatrajući tehničko znanje korišteno u nekonvencionalnim izvedbama biti će površinski obrađeno i zadržati će se na osnovnim principima funkcioniranja.

SMT-i stupnjevaju struje vrijednosti reda par tisuća ampera na samo par ampera, većinom na standardne veličine od 5A ili 1A. Zavisno o mjestu primjene SMT-a definirana je nazivna struja na primaru koja značajno varira između 1A i par tisuća ampera što ga čini praktično upotrebljivim u cijelom elektroenergetskom sustavu. Treba napomenuti da SMT-e susrećemo u široj primjeni i van područja prijenosa električne energije. Niti na jedan način nisu usko ograničeni za primjenu u određenom području. Konstrukcija SMT-a znatno se razlikuje ovisno o naponskim razinama i mjestima ugradnje.

Visokonaponski SMT-i koji imaju nazivne struje primara niže od 5A (standardno 2A) koriste se za odvajanje krugova mjernih uređaja od visokih napona. Osim za mjerenje strujni transformatori (u daljnjem tekstu *kratica ST*) koriste se i za napajanje uređaja relejne zaštite kada struje sekundara mogu biti nazivnih vrijednosti 1A ili 5A.

Ovaj završni rad sistematizirano obrađuje tematiku konvencionalnih SMT-a i alternativnih izvedbi. Kao polaznu točku uzeto je osnovno objašnjenje principa rada transformatora i na koji način se osnovni principi očituju kod SMT-a u praksi, obraditi će se pravilnik kojim su definirani SMT-i na državnoj razini da bi se u daljnjem radu detaljnije objasnili kriteriji dimenzioniranja, izbor tipa SMT-a po karakteristikama i mjestu uporabe prema zadovoljavanju poznatih kriterija. Obradjeni su i alternativni moderni pretvarači te funkcioniranje istih.

2. OSNOVNO O STRUJNIM MJERNIM TRANSFORMATORIMA

SMT-i pružaju mogućnost sigurnijeg i prikladnijeg nadziranja stvarne vrijednosti izmjenične struje pomoću standardnog ampermetra. Ponekada se koristi i naziv instrumentni transformator zbog primarne svrhe da se iznos sekundarne struje prilagodi na vrijednost mjerljivu instrumentom [1].

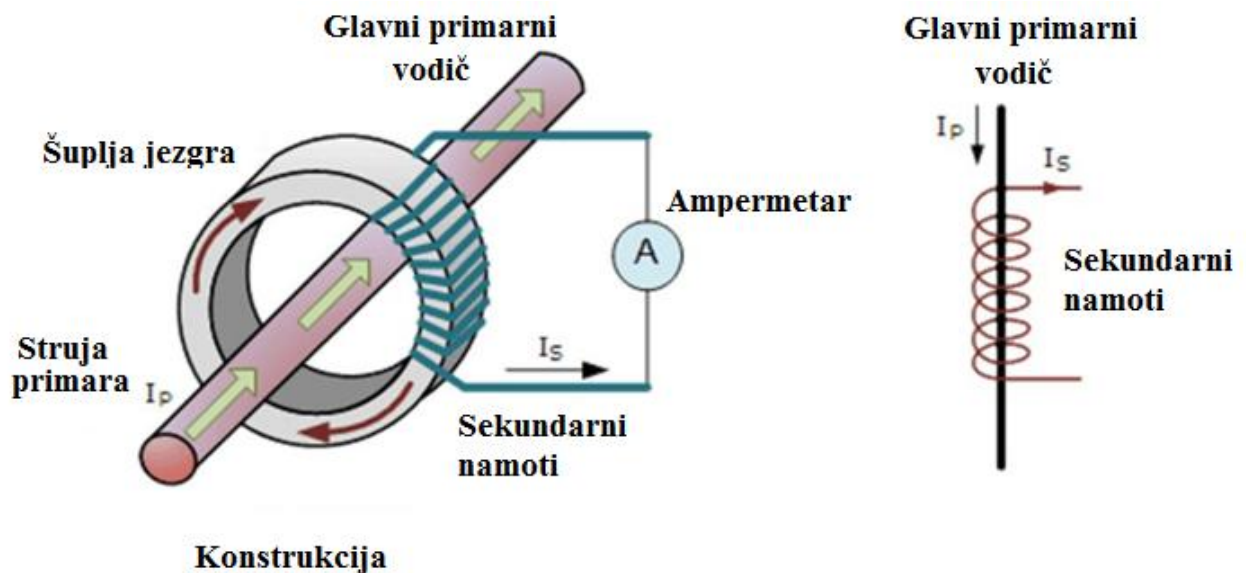
Instrument (većinom ampermetar) spoja se serijski u sekundarni krug transformatora. Uzevši u obzir takav način postavljanja transformatora možemo ga smatrati "serijskim" transformatorom (jer je primarni zavoj u seriji sa vodičem ili sabirnicom). Izmjenična struja koja se stvara na sekundarnim priključcima uvijek je proporcionalna struji na primaru. Te dvije struje povezane su preko ustaljenih omjera transformacije. Riječ je o stupnjevanju struje preko unaprijed poznatih omjera transformacije.

Za razliku od transformatora snage koji imaju veliki broj zavoja na sekundaru SMT-i imaju jako mali broj zavoja, nekada čak i samo par zavoja pa primar može biti u obliku samo jednog zavoja. Cijeli transformator može biti izveden bez klasičnog primara, samo sa sabirnicom ili vodičem postavljenim tako da prolazi kroz centralnu šupljinu.



Slika 2.1: Primjer jednostavne izvedbe NN provlačnog SMT-a

Prikazani SMT za niske napone obuhvaća provodnik (kabel ili sabirnicu) te na njemu nema klasičnih primarnih namotaja. Zbog toga je montaža krajnje jednostavna, a dinamička struja je praktički neograničena. Kao izolacija se najčešće koristi epoksidna smola dok se plastika rijede koristi. Keramičke (porculanske) izvedbe mogu se sresti u starijim izvedbama. Prikazani tip SMT-a koristi se kao jedan od elemenata pri mjerenju u trofaznom sustavu napajanja (400A).



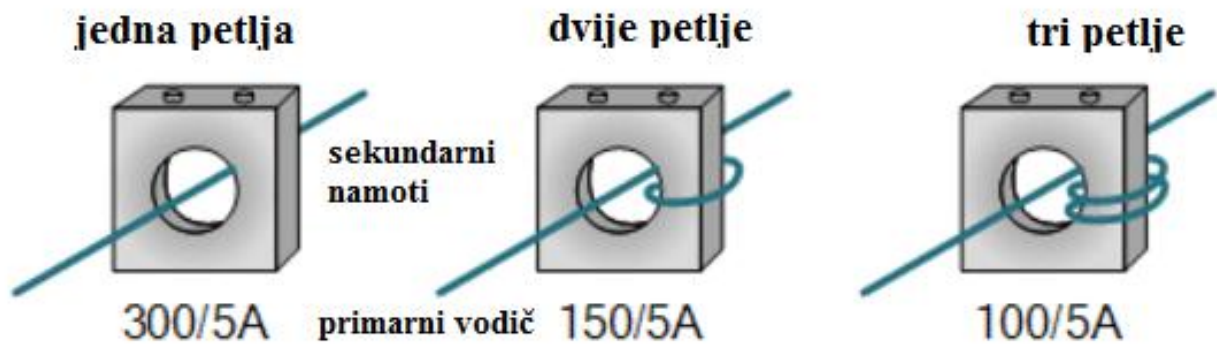
Slika 2.2: Mjerenje struje kod provlačnog transformatora

Pošto SMT-i stupnjevaju struje na vrijednosti od samo par ampera na sekundaru možemo koristiti instrumente malih dimenzija i vrlo visoke točnosti. Također, možemo spajati i kontrolne uređaje pošto su oni odvojeni i izolirani od visokonaponskog dijela mreže. Postoji cijeli niz različitih uređaja koji se spajaju na SMT. Od ampermetara i vatmetara, do mjeraca faktora snage ili vat sati, zaštitnih releja, magnetskih sklopki...itd [1].

U većini slučajeva pojedini SMT te odgovarajući ampermetar koriste se zajedno u paru pa je dizajn cijelog sklopa takav da se stvara odziv ampermetra u odgovarajućim dijelovima skale. Zato je potrebna kalibracija mjernog transformatora za pojedini tip ampermetra.

Većina SMT-a ima omjer transformacije 100/5 A. U slučaju da kroz primar teče struja od 100A imamo struju od 5A na sekundaru. Ako uzmemo najstandardniji omjer transformacije iz primjera, 100 na prema 5, rezultat toga je struja sekundara 20 puta manja od struje primara. Bitno je napomenuti da kod definiranja transformatora putem omjera transformacije 100/5A ne možemo promijeniti oznaku da ju predstavimo kao 20/1A ili bilo koji drugi razlomak a da korespondira u matematičkom smislu razlomku "100/5". Razlomak "100/5" predstavlja konkretne vrijednosti struje primara/sekundara.

Dodavanjem dodatnih zavoja u sekundarnom krugu možemo umanjiti iznos struje sekundara povodeći se općom formulom transformacije. Drugim riječima, struju sekundara I_2 smanjujemo povećanjem broja zavoja N_2 , a odnosi veličina I_2 i N_2 obrnuto su proporcionalni. Omjeri transformacije mogu biti jako veliki pošto se sekundar transformatora može sastojati od samo par zavoja dok primar može imati stotine zavoja. Veliki broj alternacija omjera transformacije moguće su jednostavnim namatanjem vodiča u petlje na sekundaru smatrajući jedan prolaz oko jezgre kao jedan zavoj.



Slika 2.3: Namatanje dodatnih zavoja na sekundar

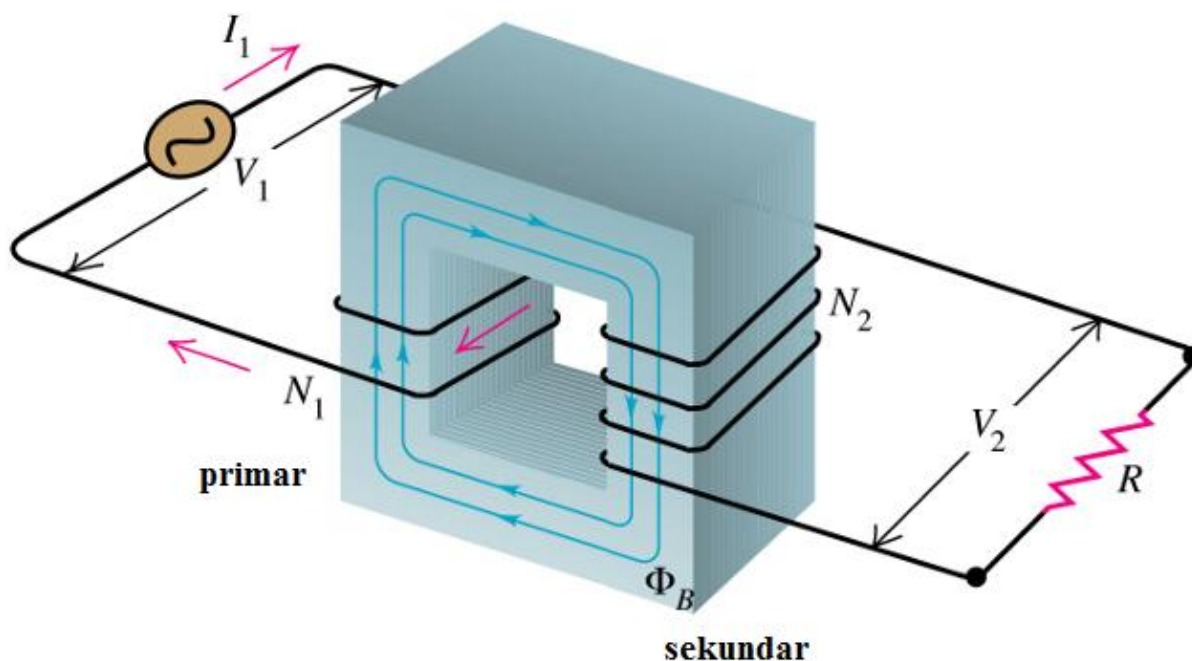
Možemo modificirati SMT omjera 300/5A tako da postane transformator omjera 150/5A namatanjem vodiča u dodatnu petlju (zavoj). Kod primjera transformacije 300/5A imamo jedan zavoj, a kod omjera 150/5A imamo dva zavoja. Stvaranjem još i trećeg zavoja dolazimo do omjera 100/5A tako da uvijek dobijamo iznos od 5A na sekundaru čak i u situacijama kada je na primaru struja nižeg iznosa. Znajući da je svrha SMT-a da se koristi kao proporcionalni instrument **na sekundaru transformatora ne bi nikada trebali imati otvoreni strujni krug**. Isto kao što kod naponskog transformatora sekundar ne bi treba biti spojen u kratki spoj. Ako je potrebno ukloniti ampermetar iz kruga sekundara stezaljke bi trebali kratko spojiti da bi izbjegli stvaranje prevelikih napona.

2.1. Princip rada transformatora

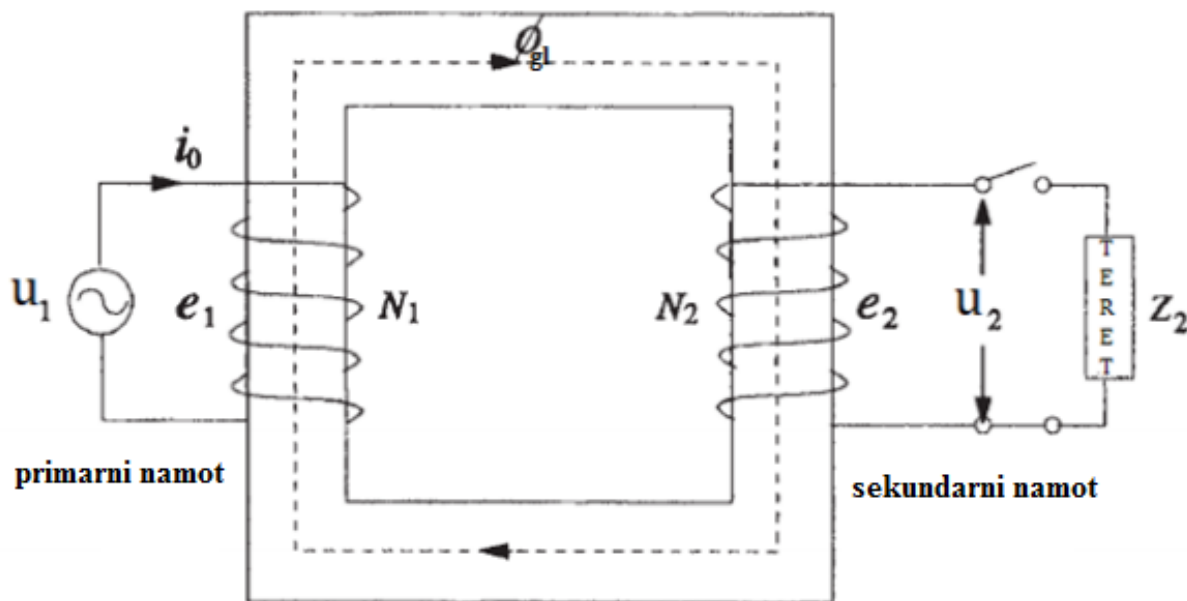
Klasični transformator je elektrotehnički element koji radi na principu elektromagnetske indukcije. Električna energija sa primara transformatora prenosi se na sekundar sa promijenjenim parametrima jakosti struje i napona uz stalnu frekvenciju. Prvi namot (primar) prima električnu energiju iz generatora ili električne mreže te na principu elektromagnetske indukcije prenosi električnu energiju na drugi namot (sekundar) koji je električki izoliran spram prvog namota. Električna energija se u daljnjem procesu prosljeđuje prema trošilu ili mreži promijenjenih parametara struje i napona.

Transformator nema pokretnih dijelova pa kažemo da se radi o statičkom elementu. U širem smislu omogućuje funkcioniranje elektroenergetskog sustava u prijenosu i distribuciji električne energije na naponskim razinama koje su najprikladnije. Strujni mjerni transformatori (SMT-i) su podvrsta transformatora koja služi za mjerenje struji većih iznosa koje zbog visokih iznosa nisu prikladne za direktno mjerenje [1].

Transformatori su među najsigurnijim elementima postrojenja, pouzdani i ekonomični uz male gubitke energije.



Slika 2.4: Transformator sa feromagnetskom jezgrom



Slika 2.5: Primarni i sekundarni namoti transformatora

Kod općenitog opisa rada transformatora polazi se od zakona očuvanja energije, fizikalnog zakona prema kojem unutar zatvorenog sustava ukupnost raznih oblika energije ostaje konstantna. Ti oblici energije mogu prelaziti iz jednog oblika u drugi ali pritom se energija ne gubi. Postavljamo temeljni zakon koji vrijedi za idealni transformator uz pretpostavku da se u transformatoru snaga neće gubiti, tada je moguće snagu izraziti kao umnožak struje i napona.

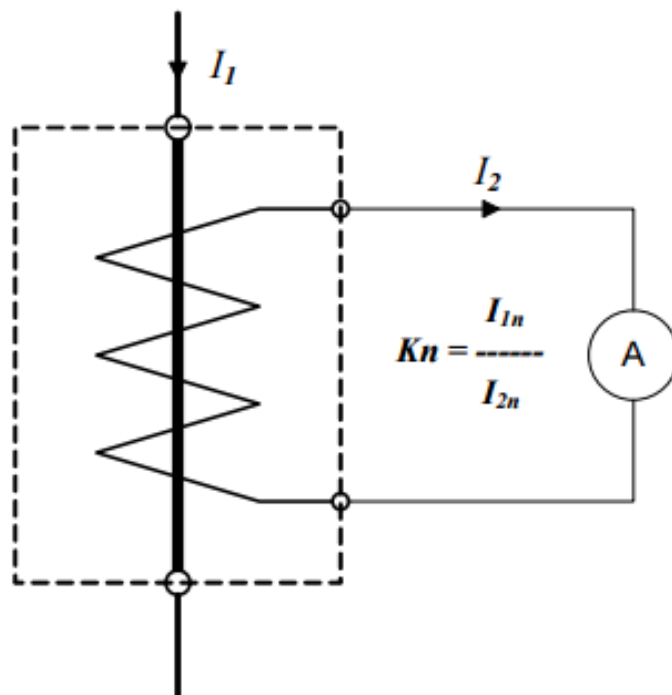
$$P = U \cdot I; \quad P = const. \quad (2.1)$$

Iz ove formule proizlazi da je umnožak struje i napona konstantan što znači da su struja i napon zavisni jedno o drugome i povećanje jedne od tih veličina uzrokuje smanjenje druge veličine.

Moguće su izvedbe transformatora sa više sekundarnih namota te izvedbe sa većim brojem izvoda na istom sekundarnom namotu. I tada vrijedi zakon očuvanja energije (konstantne snage) tako da ukupni zbroj pojedinih snaga koje se javljaju na sekundaru bude jednak snazi koja je unesena na primaru (preuzeta iz mreže).

Jedan od zanimljivih primjera transformacije u praksi je podizanje napona na što veće razine prilikom prijenosa. Te vrijednosti napona su vrlo visoke, skladno tome prilikom prijenosa električne energije (pogotovo na velike udaljenosti) iznos struje je vrlo mali. Zbog nižih iznosa struje dopušteno je da presjek vodiča bude manji, time se smanjuje utrošak materijala (aluminija ili bakra). Također, pad napona se smanjuje na većim udaljenostima pošto se uočava proporcionalna zavisnost pada napona o jakosti struje. Zbog lakšeg prijenosa električna energija koju generator proizvodi iznosa napona od recimo 25kV dodatno se transformira na razinu 400kV. Visokonaponskim dalekovodima prenosimo električnu energiju do mjesta potrošnje. U procesu prijenosa kod mjerenja jačine struje koristili bi SMT kao pomoćni element pri mjerenju.

Uzevši u razmatranje idealni transformator i osnovne zakone koji su primijenjeni uočava se proporcionalni odnos napona o broju namota primara i sekundara. Također se uočava i odnos jakosti struja obrnuto proporcionalno omjeru broja namotaja. Ako za primjer uzmemo deseterostruko veći broj namota na sekundaru u odnosu na namote primara imati ćemo deseterostruko veći napon na sekundaru zbog većeg broja namotaja. Po navedenoj logici imati ćemo deset puta manji iznos struje na tom istom sekundaru nego što je na primaru. Direktno mjerenje struje na sekundaru može se prikazati jednostavnom shemom uz uvođenje konstante K kao prijenosnog omjera. Time poznajući struju koju smo izmjerenu na jednom kraju može se precizno odrediti iznos struje na drugom kraju uz određena odstupanja (realni transformator). Konstanta K i njen utjecaj pri izboru transformatora detaljnije će biti obrađena u daljnjem tekstu usporedno sa obradom ostalih parametara.



Slika 2.6: Mjerenje struje ampermetrom u seriji

2.2. Zasićenje feromagnetske jezgre

Jedan od nedostataka konvencionalnih SMT-a spram nekonvencionalnih je uporaba feromagnetske jezgre koja dolazi u zasićenje [9].

Feromagnetski materijali pri utjecaju vanjskog magnetskog polja i sami postaju magneti povećavajući magnetsku indukciju. Permeabilnost takvih materijala μ_r mnogo je veća od "1".

Kod feromagnetskih materijala permeabilnost je funkcija jakosti magnetskog polja (nije stalna vrijednost). Često korišteni feromagnetski materijali su željezo, kobalt i nikal.

Dipol je sustav dvaju naboja jednakih iznosa suprotnog polariteta koji su smješteni na maloj udaljenosti jedan od drugoga. Magnetski dipol je najmanja jedinica magnetskog naboja dok monopoli (samostalni naboji) postoje samo tijekom praktički zanemarivo kratkoga vremena.

$$d = Q \cdot l \tag{2.2}$$

d – dipolni moment električnih naboja

Q – vrijednost pojedinog naboja ($+Q$ i $-Q$)

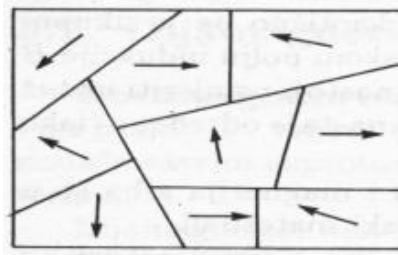
l – udaljenost između naboja

Dielektrična konstanta je pokazatelj dipolnog momenta materijala.

Unutar feromagnetskog materijala zbog utjecaja magnetizacije magnetskog polja njegovi magnetski dipoli prate smjer vanjskog polja, na taj način u tehničkom smislu feromagnetski materijali postaju magneti.

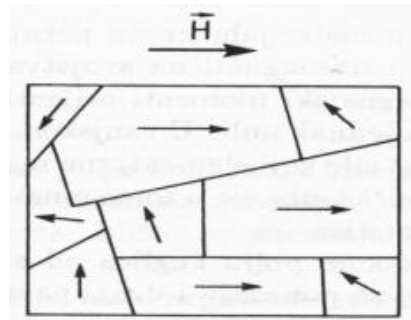
U feromagnetskom materijalu postoje minijturna područja reda veličine mikrometara i nanometara koje zovemo Wiessove domene. Unutar toga područja svaki atom ima jednako usmjerene magnetske dipolne momente tako da se svaka domena ponaša kao minijturni permanentni magnet. Unutar svake od domena elementarni magneti usmjereni su u istom pravcu.

U slučaju nemagnetiziranog materijala elementarni magneti su usmjereni u raznim smjerovima. Pri utjecaju vanjskog magnetskog polja domene se postepeno usmjeravaju prema smjeru narinutoga polja. Nakon što se sve domene (svi elementarni magneti) usmjere u smjeru vanjskoga polja postiže se maksimalna magnetizacija te daljnje povećanje polja ne mijenja magnetizaciju željeza.



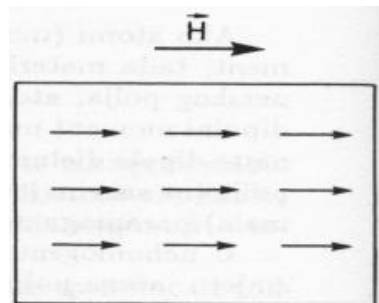
Slika 2.7: Materijal bez utjecaja magnetskog polja

Materijal je nemagnetičan, domene nisu usmjerene u istom pravcu, smjerovi su kaotični i neodređeni.



Slika 2.8: Utjecaj vanjskog magnetskog polja

Domene se postepeno usmjeravaju u smjeru magnetskog polja, povećava se indukcija usporedno sa porastom jakosti vanjskog polja

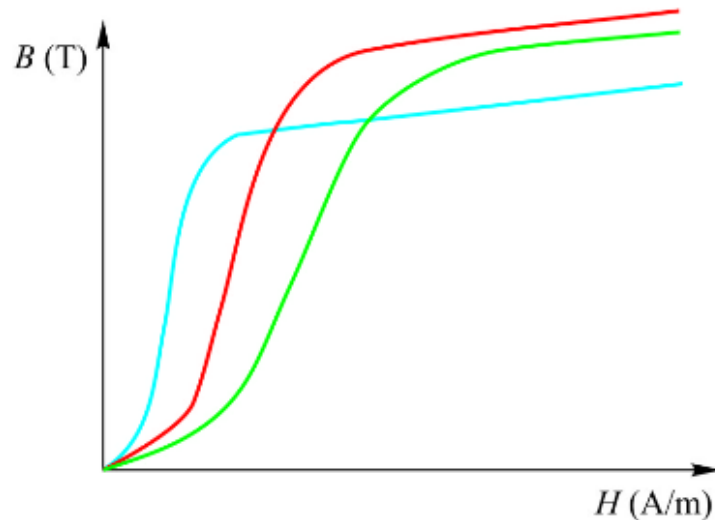


Slika 2.9: Utjecaj jačeg vanjskog magnetskog polja

Kod izrazito jakoga magnetskog polja domene se rotirajući usmjere u smjeru narinutoga polja.

Kod prestanka djelovanja vanjskoga polja domene se razjedine i magnetizacija postepeno opada. Feromagnetski materijali posjeduju osobinu remanentne (zaostale) magnetizacije. Za potpunu razmagnetizaciju potrebno je narinuti polje suprotnoga smjera od prvobitnoga koje je uzrokovalo magnetizaciju.

Postoje i anti-feromagnetski materijali koji se koriste pri izradi GMR senzora kao jedne od alternativnih metoda određivanja struje putem mjerenja jakosti magnetskog polja. GMR senzor biti će obrađen u poglavlju nekonvencionalnih SMT-a.

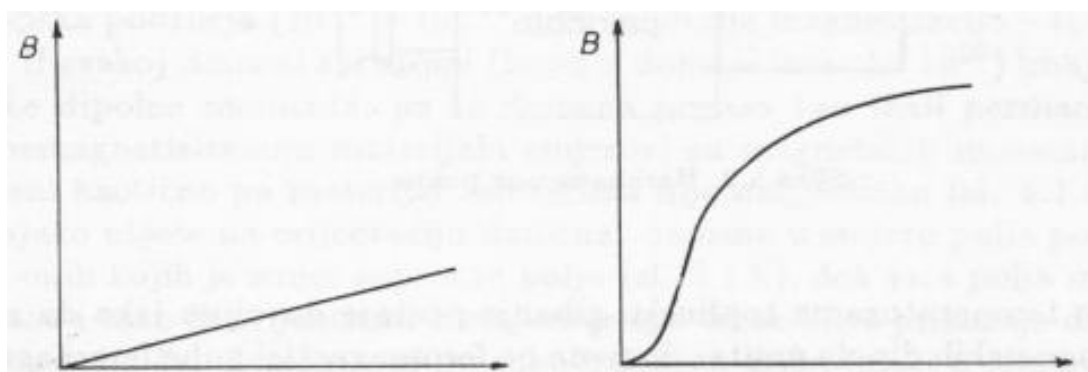


Slika 2.10: B-H krivulje magnetizacije

Kvaliteta materijala korištenoga pri izradi jezgre uviđa se putem njegovih električkih, tehničkih i tehnoloških svojstava od čega je najbitnije svojstvo promjena magnetskog toka (φ) kojega će materijal propustiti pri određenoj jakosti vanjskog magnetskog polja (H).

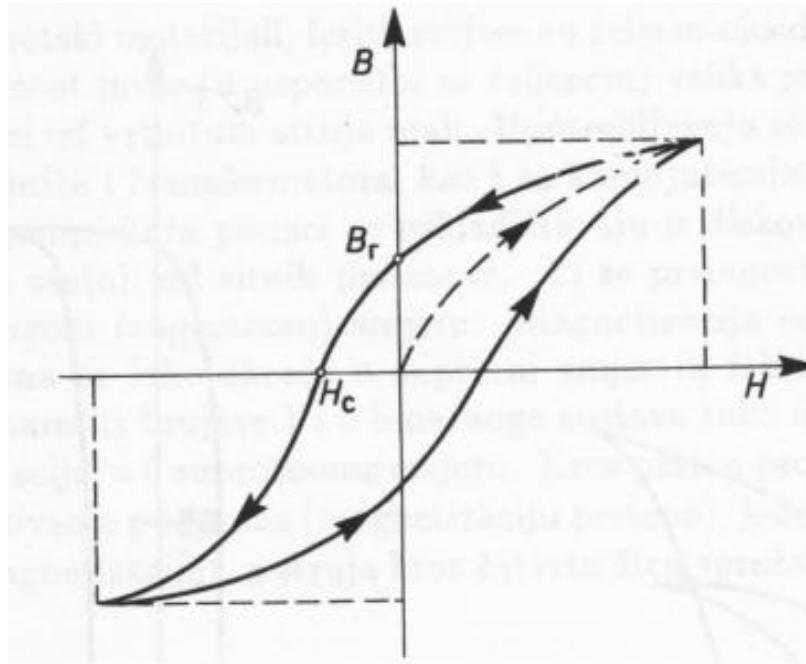
Uvodi se pojam magnetske indukcije (B) kao gustoću magnetskog toka, mjerenoj u $\left[\frac{Vs}{m^2}\right]$ ili $[T]$ – Tesla

Karakteristika ovisnosti iznosa magnetske indukcije o jakosti magnetskog polja, $B=f(H)$ kod feromagnetskih materijala je nelinearna karakteristika.



Slika 2.11: Krivulja magnetizacije paramagnetskog i feromagnetskog materijala

Jedan od pokazatelja ponašanja materijala je krivulja (petlja) histereze kojom opisujemo magnetizaciju materijala pri utjecaju vanjskog magnetskog polja. Magnetska indukcija kasni u odnosu na promjenu jakosti magnetskog polja. To kašnjenje ovisno je o materijalu od kojeg je jezgra izrađena. Kašnjenja su manja za legure mekih željeza, npr. za slitinu željeza i nikla (FeNi).



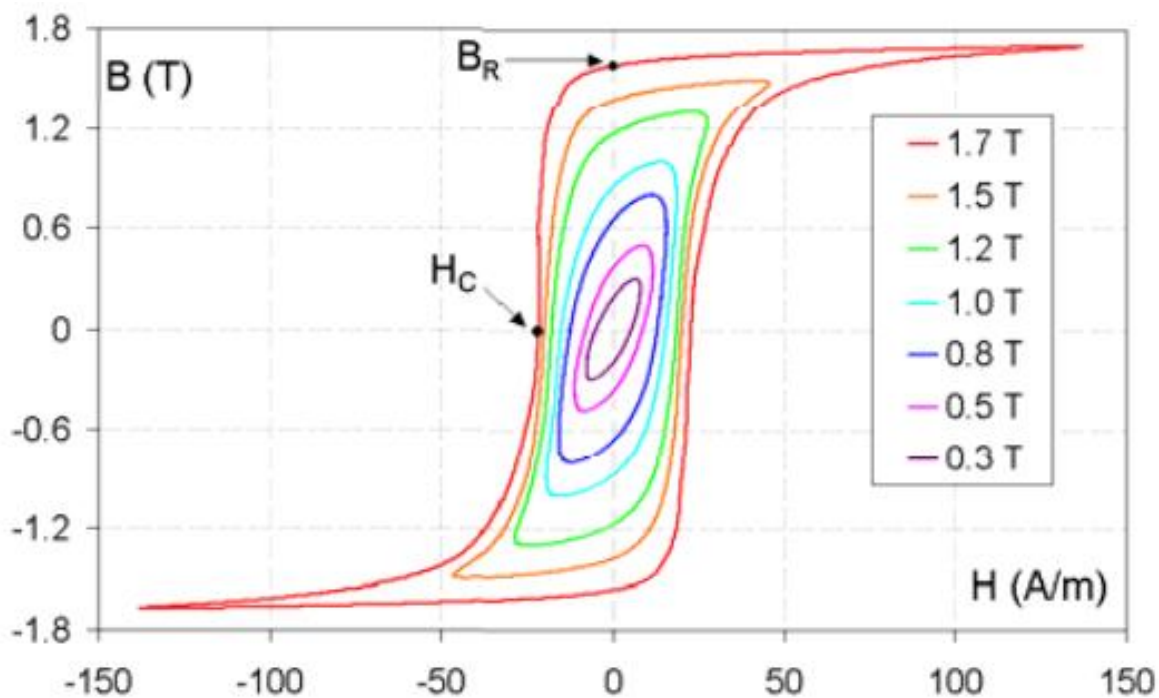
Slika 2.12: Krivulja histereze

- Početnom magnetizacijom (npr. povećanjem polja H kroz zavojnicu) željezo se dovodi u područje zasićenja.
- Smanjivanjem jakosti polja H (npr. slabljenjem struje kroz zavojnicu) smanjuje se i vrijednost indukcije B . Ovoga puta to se ne dešava po istoj funkciji (krivulji početne magnetizacije) već je odnos B - H drugačiji – krećemo se po novoj krivulji grafom prikazanom iznad prvobitne.
- U nul točki vrijednosti " $H=0$ " kroz zavojnicu struja ne teče ali postoji zaostali (remanentni) magnetizam, tj. magnetski tok i određeni iznos magnetske indukcije B_r .
- Potpuna razmagnetizacija jezgre postiže se okretanjem smjera vanjskoga polja H (tj. okretanjem smjera struje kroz zavojnicu) te magnetska indukcija postepeno poprima nultu vrijednost. Jakost magnetskog polja koje dovodi do toga nazivamo koercitivna sila (H_c).

Ako bi struja nastavila rasti u suprotnome smjeru opet bi se željezna jezgra dovela u zasićenje. Ponovnom promjenom smjera polja, prolaskom kroz nul vrijednost te dodatnim povećanjem iznosa polja možemo dobiti slične krivulje magnetizacije.

Sekundar ST-a nikada ne bi trebao biti ostavljen u praznom hodu, tj. stezaljke sekundara ne smiju biti otvorene ako je primar i dalje spojen na aktivnu mrežu. Tada bi cjelokupni iznos primarne struje u potpunosti služio za magnetizaciju jezgre. Razvila bi se maksimalna vrijednost toka (fluksa) i ST bi otišao u zasićenje. Vremenska karakteristika toka bila bi skoro pravilno kvadratnoga oblika. Tok bi izrazito brzo porastao što bi dovelo do induciranja vrlo visokih napona na sekundaru prema direktnoj ovisnosti napona o prvoj derivaciji magnetskog toka po vremenu [9]

Ulazak transformatora duboko u zasićenje ima izrazito nepovoljne posljedice po transformator i eventualno okolinu (ako bi trenutna vrijednost napona na sekundaru porasla na razinu od nekoliko tisuća volti). Taj napon bi imao nelinearni (nesinusni) impulсни karakter uzrokovan nelinearnošću željeza pri izrazito dubokim zasićenjima.



Slika 2.13: Klizanje radne točke po krivulji histereze

Može se reći da magnetski tok (ili napon) pomiče radnu točku po krivulji histereze tako da kretanja podsjeća na klizanje.

Utjecaj zasićenja jezgre biti će dodatno pojašnjen u poglavlju izbora ST-a zajedno sa parametrima koji su vezani uz magnetizaciju jezgre.

2.3. Pravilnik o mjeriteljskim i tehničkim zahtjevima za mjerne transformatore

Pravilnikom o "Mjeriteljskim i tehničkim zahtjevima za mjerne transformatore u mjernim grupama za mjerenje električne energije" dani su kao osnova za strujne mjerne transformatore (SMT) parametri koje ispunjavamo kako u smislu korištenja transformatora pri mjerenju potrošnje električne energije tako i za ostale primjene SMT-a [2].

Ispitivanja tipa mjernih transformatora obavljaju se prema hrvatskim normama za strujne transformatore propisanih od strane Hrvatskog zavoda za norme (HZN), te međunarodnim normama za kombinirane transformatore. Preinake, dopune i sve ostale predradnje izvršene su prema izvorniku organizacija IEC i CENELEC [3].

IEC ("International electrotechnical commission") je međunarodni odbor za elektrotehniku u koji su uključene zemlje iz svih krajeva svijeta sa svojim zastupnicima. Uskom suradnjom sa ISO organizacijom objavljuje norme na području elektrotehnike.

CENELEC ("Committee for electrotechnical standardization") odgovoran je za uspostavljanje standarda na europskom teritoriju za znanstveno područje elektrotehnike. Usko surađuje sa ETSI-em na području telekomunikacije i CEN-om (na svi ostalim područjima) u čiji rad su uključena 33 normativna tijela zemalja Europe.

Pravilnikom se propisuju mjeriteljski i tehnički zahtjevi za strujne mjerne transformatore razreda točnosti 0,1; 0,2; 0,5; 0,2 S i 0,5 S koji se upotrebljavaju u izmjeničnoj mreži frekvencije 50 Hz, za spajanje s brojilima u mjerne grupe za mjerenje električne energije.

Mjerni transformatori prema ovom pravilniku su:

- strujni transformatori
- strujni transformatori s proširenim opsegom
- trofazni strujni transformatori izrađeni kao cjelina od dva ili tri strujna transformatora
- kombinirani transformatori izrađeni kao cjelina od jednog strujnog transformatora i jednog naponskog transformatora, jednopolno izoliranog u zajedničkom kućištu
- trofazni kombinirani mjerni transformatori izrađeni kao cjelina od dva ili tri strujna transformatora i dva ili tri naponska transformatora u zajedničkom kućištu

Ostale podjele odnose se na naponske transformatore [2].

Mjerni transformatori moraju imati nazivnu vrijednost frekvencije 50 Hz, uz to SMT-i moraju imati:

- nazivne sekundarne struje od:

1 A – 5 A

- nazivne primarne struje od:

10 A – 12,5 A – 15 A – 20 A – 25 A – 30 A – 40 A – 50 A – 60 A – 75 A – 80 A

Nazivne primarne struje mogu biti gore navedenih iznosa te njihovih decimalnih dijelova ili umnožaka.

- nazivne snage strujnih transformatora od:

2,5 VA – 5 VA – 10 VA – 15 VA – 30 VA

- razrede točnosti strujnih transformatora:

0,1 – 0,2 – 0,5 – 0,2 S – 0,5 S

- oznake struje proširenog mjernog opsega:

ext. 120 % – ext. 150 % – ext. 200 %.

Oznake (ext. 120 %, ext. 150 % ili ext. 200 %) označavaju vrijednosti struje proširenih opsega koje su za 120 %, 150 % ili 200 % veće od nazivne primarne struje. Struje proširenoga mjernog opsega služe kao ispitne točke u smislu postotka vrijednosti nazivne primarne struje.

Kriteriji za izbor strujnih transformatora za mjerenje, njihove karakteristike i parametri biti će detaljno obrađeni kao posebno poglavlje dok je strujna pogreška definirana pravilnikom (općenito na državnoj razini). Vrijedi za sve tipove strujnih transformatora. Napomena - nisu svi strujni transformatori striktno namijenjeni za mjerenje.

Kod ST-a za zaštitu uvodi se pojam složene pogreške koja će također biti objašnjena u zasebnom poglavlju.

Izračun strujne pogreške vrši se po formuli:

$$p_i = \frac{K_n I_s - I_p}{I_p} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

K_n – nazivni omjer transformacije

I_p – primarna struja u A (efektivna vrijednost)

I_s – sekundarna struja u A (efektivna vrijednost)

Tablica 2.1: Granice pogrešaka strujnih transformatora

Oznaka razreda točnosti	Granice dopuštenih pogrešaka u ovisnosti o postotku nazivne primarne struje									
	Strujna pogreška P_1 (%)					Fazna pogreška δ_i (min)				
	120, 150 ili 200 *	100	20	5	1 **	120, 150 ili 200 *	100	20	5	1 **
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,1	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,4	-	± 5	± 5	± 8	± 15	-
0,2	± 0,2	± 0,2	± 0,35	± 0,75	-	± 10	± 10	± 15	± 30	-
0,5	± 0,5	± 0,5	± 0,75	± 1,5	-	± 30	± 30	± 45	± 90	-
0,2 S	± 0,2	± 0,2	± 0,2	± 0,35	± 0,75	± 10	± 10	± 10	± 15	± 30
0,5 S	± 0,5	± 0,5	± 0,5	± 0,75	± 1,5	± 30	± 30	± 30	± 45	± 90

U tablici sa granicama pogrešaka strujnih transformatora uočavaju se postoci nazivne struje primara od 1%, 5%, 20% i 100% uz dodatnu oznaku (ext. 120 % ili ext. 150 % ili ext. 200 %) koja definira vrijednost struje proširenog mjernog opsega. Kod ispitivanja strujnih transformatora razreda točnosti 0,2 S i 0,5 S primjenjuje se vrijednosti nazivne primarne struje od 1%.

Faznu pogreška definirana je kutem između primarne i sekundarne struje tj. definiramo ju kao faznu razliku između vektora primarne struje i vektora sekundarne struje. Kod savršenog transformatora fazna greška bila bi jednaka nuli uz pravilan odabir smjera vektora. Fazna greška bi bila pozitivna ako sekundarna struja prethodi primarnoj, tj. vektor sekundarne struje prethodi vektoru primarne struje. Fazna pogreška izražava se u minutama.

Pri nazivnoj frekvenciji za sve vrijednosti tereta između 25% i 100% nazivnog tereta strujne i fazne pogreške moraju biti unutar dozvoljenih granica pogrešaka dane u tablici (2.1).

Teret pod kojim se ispituje transformator ne bi trebao biti manji od 1VA, trebao bi biti induktivnog tipa uz faktor snage od "0,8". Ako bi teret pri ispitivanju bio ispod 5VA onda faktor snage umjesto "0,8" treba biti "1".

U slučaju transformatora sa većim brojem jezgri granice pogrešaka moraju biti unutar dozvoljenih područja grešaka za svaku jezgru. Također, svi kriteriji moraju biti zadovoljeni za pojedinu jezgru u slučaju opterećenja neke od ostalih jezgri nazivnim teretom ili kratko spojenim sekundarnim namotima neke od jezgri.

Kod kombiniranih transformatora koji u zajedničkom kućištu imaju i strujni i naponski transformator svaki od njih bi trebao zadovoljavati granice dopuštenih pogrešaka za njegov razred točnosti. S time da bi strujni transformator trebao udovoljiti dopuštenim granicama pri radu naponskog transformatora između 80% i 120% vrijednosti nazivnog napona.

Natpisna pločica strujnih transformatora trebala bi biti na lako vidljivom mjestu koje je u normalnim uvjetima rada dostupno i lako čitljivo, izrađena bez mogućnosti izmjene, brisanja, skidanja ili nekog drugog vida narušavanja sadržane informacije [4].

Natpisna pločica sadrži odgovarajuće natpise i oznake pisane na hrvatskom jeziku.

Na njoj se nalaze:

- naziv proizvođača (ime ili znak) i mjesto proizvodnje
- oznaka vrste transformatora - "Strujni transformator"
- oznaka tipa transformatora
- godina proizvodnje i tvornički broj
- **nazivna vrijednost primarne i sekundarne struje**
- nazivna frekvencija (50Hz)
- oznaka razreda točnosti, nazivna snaga
- **službena oznaka mjernog transformatora**
- oznaka struje proširenog opsega (ext. %)
- **nazivna kratkotrajna termička struja (I_{th})**
- toplinski razred izolacije
- **faktor sigurnosti**
- naponi (najviši pogonski, ispitni izmjenični)
- ispitni udarni napon (za transformatore ugrađene u postrojenja na otvorenom prostoru)

Kod SMT-a sa više jezgri moraju biti navedeni razredi točnosti za svaku jezgru ili za svaki namot, a mora biti i postavljena oznaka odgovarajućih priključaka i jezgara ili namota. Kod kombiniranih transformatora daju se posebno podaci o strujnom i posebno o naponskom transformatoru.

Transformatori trebaju imati odgovarajući poklopac za pokrivanje sekundarnih priključaka izveden na takav način da je sekundar zaštićen od neovlaštenog pristupa [4].

RADE KONČAR - ZAGREB									
Tip	2 TBN 100 - 12 A		Broj	00124		Godina	1983.		
Snaga	100		KVA			JUS N. H1. 010			
1	10 500	---	Vrsta	ET		Broj faza	3		
2	10 250	---	Frekv.	50		Hz	Si	12	
3	10 000	400/231	V	Sprega	Yzn 5		Hlađenje	ONAN	
4	9 750	---	U _k	4,0		%			
5	9 500	---							
I	12	300/173	A	Aktivni dio	0,12		t	Ulje	0,11
				Transf. masa	0,56		t	Ukupno	0,56

Slika 2.14: Natpisna pločica transformatora

Pločica je standardno izrađena od aluminija te su na njoj urezani pogonski podaci bez mogućnosti za naknadne promjene.

Ako bi se pri popravku mijenjali bitni parametri potrebno je staru pločicu skinuti i postaviti novu sa izmijenjenim podacima. Mora biti istaknuta na vidljivom mjestu i kvalitetno izrađena tako da izdrži utjecaj sunca, promjene temperature, vode, prašine, vlage..isl.

Natpisna pločica dodjeljuje se transformatoru prilikom izrade u tvornici. Svim transformatorima istoga tipa nominalno se dodjeljuje jednaka natpisna pločica. Parametri istaknuti na pločici samo su okvirni pokazatelj karakteristika [4].

Treba napomenuti da se točni parametri mogu odrediti jedino mjerenjem na konkretnom transformatoru te uvijek odstupaju od onih navedenih na pločici. Odstupanje mora biti unutar granica određenima propisima (IEC norme) [6].

3. IZBOR I PARAMETRI STRUJNIH TRANSFORMATORA

Zahtjevi za ST-e postavljaju se s obzirom na njihovu namjenu (mjerenje ili zaštitu). Kod izbora transformatora najutjecajniji faktor je njegovo ponašanje u mjernim područjima iznad nazivnih [1].

Parametri transformatora korištenog u zaštiti moraju biti pažljivo razmotreni s obzirom na njegovo ponašanje pri nastanku kvara i uvjetima prijelaznih stanja u mreži. Kod ST-a za zaštitu ključno je egzaktno praćenje promjene primarne struje te da zaštitni relej ima veliku brzinu djelovanja. Uporaba mikroprocesora i nove tehnologije dovela je do naprednih mogućnosti releja i dodatnog istraživanja utjecaja ST-a u mreži. Nove ideje releja mikroprocesorske izvedbe pojavljuju se prateći opći razvoj tehnologije. ST-i unose dodatna izobličenja mjerenih veličina. Treba uzeti u obzir prijelazne pojave napona i struje koje se javljaju pri kvarovima u mreži kao i način ponašanja mjernih članova uslijed prijelaznih pojava. Stoga prijelazne pojave koje utječu na rad zaštitnih releja mogu biti one koje su nastale od strane samoga mjernog transformatora kao i one koje nastaju pri kratkom spoju unutar mreže.

Kos ST-a korištenih isključivo za mjerenje (SMT) najpoželjnije svojstvo je što manja promjena struje na sekundaru pri promjenama primarne struje. Instrumenti spojeni na sekundar izrazito su osjetljivi te ne bi trebali biti izloženi većim iznosima struje zbog opasnosti od oštećenja [5].

U praksi ST-i moraju podnositi struje mnogostruko većih iznosa od nazivnih. Transformator mora ostati funkcionalan i nakon pretrpljenih udara najviših karakterističnih iznosa struje kratkog spoja koje se mogu pojavljivati na određenom položaju u mreži.

Pri kratkom spoju u mreži nastaju dinamička i termička opterećenja koja transformator mora biti u stanju izdržati.

Dinamička granična struja I_{din} – vršna vrijednost koju transformator može izdržati bez električnih i mehaničkih oštećenja (ako se pojavi kratki spoj sekundarnog namota).

Vršnu vrijednost naziva se i **tjemenom vrijednošću**, to je maksimalna vrijednost asimetrične udarne struje koja se javlja pri kratkom spoju.

Nazivna (kratkotrajna) termička struja kratkog spoja I_{th} jednaka je efektivnoj vrijednosti primarne struje koju bi transformator morao biti u mogućnosti izdržati bez ozbiljnih oštećenja u utvrđenom kratkom vremenu pri kratkom spoju sekundarnog namota, izražena u kA.

To je vrijednost izmjenične struje jednaka iznosu istosmjerne stalne struje koja bi stvorila ekvivalentnu toplinsku energiju na otporniku jednakog iznosa. Uobičajeno to su efektivni iznosi od:

6,3 – 8 – 10 – 12,5 – 16 – 20 – 25 – 31,5 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 [kA]

Nazivna (kratkotrajna) termička struja kratkog spoja I_{th} definira se u vremenskom intervalu od 1 sekunde. U slučaju dužeg djelovanja kratkog spoja posebno se računa po formuli:

$$I_{th} = \frac{I_{th}}{\sqrt{t}} \quad (3.1)$$

Nazivna snaga – vrijednost prividne snage izražena u VA koju transformator daje u sekundarni strujni krug pri nazivnoj sekundarnoj struji, priključenom nazivnom teretu i prethodno utvrđenim faktorom snage $\cos\beta$.

Standardne snage ST-a su:

2,5 VA – 5 VA – 10 VA – 15 VA – 30 VA

Nazivni omjer transformacije definiran je nazivnom vrijednošću primarne i sekundarne struje.

$$K_n = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \quad (3.2)$$

Prilikom transformacije struji na iznose potrebne za priključenje instrumenata u sekundarni krug trebali bi osigurati stalan omjer (bez faznog pomaka).

Realni transformator uvijek ima određene gubitke (padove napona) koji se javljaju u sekundarnom namotu i na priključenom teretu, time se određeni dio iznosa primarne struje troši za pokrivanje gubitaka. Za idealni transformator vrijedilo bi:

$$\frac{\vec{I}_1}{\vec{I}_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.3)$$

Iz spomenute formule proizlazi uvjet jednakosti amperzavoja:

$$I_{1n} \cdot N_1 = I_{2n} \cdot N_2 \quad (3.4)$$

Teret je definiran kao prividni otpor Z kruga sekundara uz vlastiti faktor snage $\cos\beta$.

$$Z = \sqrt{(R^2 + X^2)} \quad (3.5)$$

$$\cos\beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{X^2}{R^2}}} \quad (3.6)$$

Stezaljke sekundara spojene u kratki spoj predstavljati će zanemarivo mali otpor te će struja sekundara ovisiti direktno o struji primara. Ostati će sličnoga iznosa kao struja koja teče u slučaju priključene realne (konačne) impedancije Z .

Otvorene stezaljke sekundara predstavljale bi bezgranični otpor. Uzrokovalo bi se nepostojanje struje u sekundarnom krugu te bi cijela struja unesena na primaru djelovala u jezgri kao struja magnetizacije. Ekstremni iznos struje u jezgri dovodi do izrazitog rasta indukcije feromagnetske jezgre. Samim time gubici u željezu se povećavaju, a napon na sekundaru može toliko porasti da postane opasan po čovjeka i okolinu. Također, izolacija izložena ekstremno visokom naponu ugrožena je kao i materijal izolacije koji je smješten u blizini jezgre koja se velikom brzinom zagrijava. Negativna posljedica je i promjena magnetskih svojstava željeznih limova.

Uzevši u obzir karakteristične parametre mreže za određeno mjesto ugradnje ST-a magnetski krug se ne smije zasititi tijekom kratkog vremena potrebnog za proradu zaštite na toj poziciji u mreži.

Sekundarne stezaljke transformatora ne bi trebale ostati otvorene sve dok je primar transformatora još uvijek priključen na aktivnu mrežu. U slučaju potrebe za izmjenama ili popravcima (npr. zamjena instrumenta u krugu sekundara) prvo se sekundarne stezaljke transformatora spajaju u kratki spoj. Time osiguravamo nizak iznos struje magnetiziranja i mali iznos pada napona u sekundarnom krugu.

Uzevši nazivnu struju sekundara kao vrijednost koja se održava stalnom može se definirati prividna snaga na sekundaru:

$$P = I_{2_{naz}}^2 \cdot Z \quad (3.7)$$

Također, pomoću nazivne sekundarne struje može se prikazati opterećenje, tj. stvarna snaga u voltamperima. Uz poznati faktor snage, nazivno opterećenje i nazivnu struju sekundara definirana je **nazivna izlazna snaga** kao stvarna snaga sekundara za koju je transformator namijenjen

Pri definiranju točnosti ST-a u obzir se uzima:

- klasa točnosti (time su određene maksimalne fazne i strujne pogreške)
- granični faktor točnosti
- nazivnu primarnu i sekundarnu struju (time je definiran i prijenosni omjer)
- nazivnu primarnu graničnu struju točnosti [5]

Klasa točnosti – pokazatelj određenih granica unutar kojih varira pogreška transformatora pri poznatim uvjetima upotrebe.

Strujne i fazne pogreške ST-a definirane su pravilnikom na državnoj razini, zadane su tablicama za pojedine klase točnosti. Podtablice se zadaju posebno za ST-e namijenjene za zaštitu te ST-e namijenjene za mjerenje. Pravilnik je obrađen u prethodnom poglavlju.

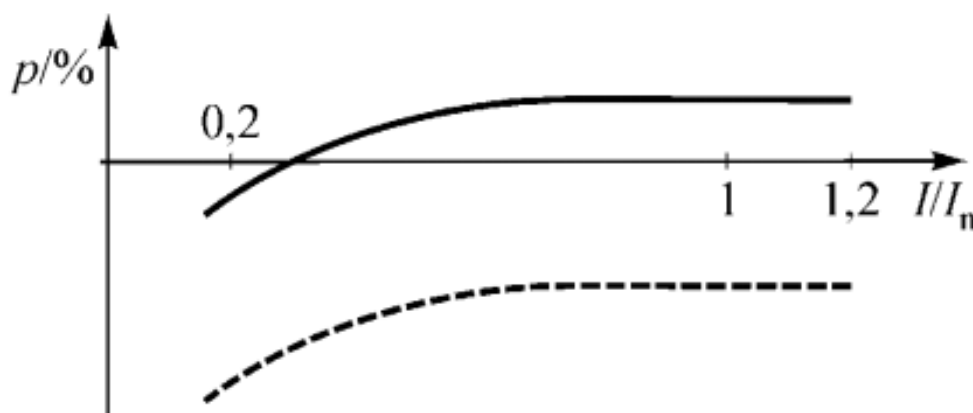
Strujna pogreška – greška kojom transformator utječe na mjerenje struje (izražena u postocima)

$$p_i = \frac{K_n I_s - I_p}{I_p} \cdot 100\% \quad (3.8)$$

K_n – nazivni omjer transformacije

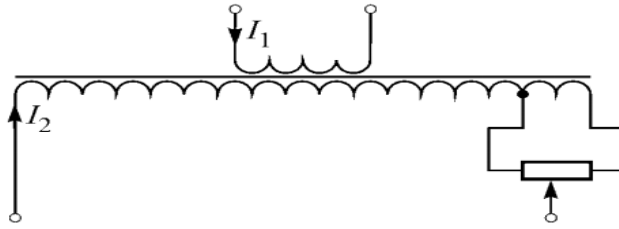
I_p – primarna struja u A (efektivna vrijednost)

I_s – sekundarna struja u A (efektivna vrijednost)



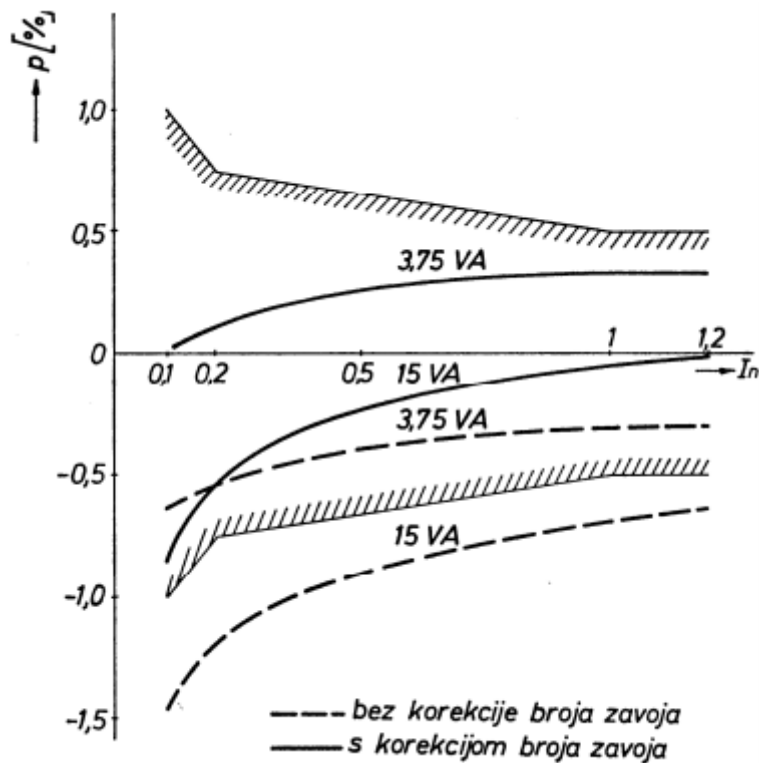
Slika 3.1: Strujna pogreška ST-a

Kod strujnih transformatora primar često bude napravljen od samo jednog zavoja dok je na sekundaru desetak ili par desetaka zavoja. Mali broj zavoja čini pojedini zavoj bitnijim te bi eventualna promjena broja zavoja bila od izrazitog utjecaja. Pošto je sekundar napravljen od više zavoja na njemu se može vršiti korekciju amperzavoja.



Slika 3.2: Korekcija sekundarnih amperzavoja

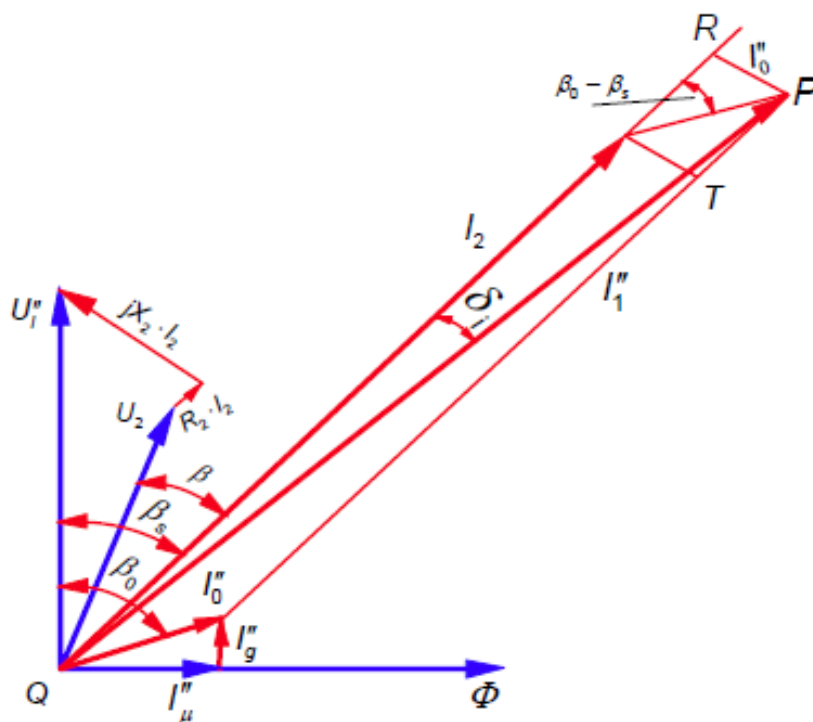
Uz uvjet jednakosti amperzavoja strujna pogreška ST-a bila bi uvijek negativna pošto je struja sekundara uvijek manja od reducirane struje primara za iznos struje magnetiziranja (bez obzira o iznosu tereta i jakosti struje sekundara). Uže granice pogrešaka dobijaju se tako da se strujna pogreška prikazuje djelomično kao pozitivna, a djelomično kao negativna.



Slika 3.3: Graf korekcije amperzavoja

Na grafu su prikazane karakteristične krivulje strujnih pogrešaka ovisno o iznosima struje i različitim opterećenjima sa korekcijom sekundarnih amperzavoja i bez korekcije. Strujnu pogrešku od 1 % moguće je korigirati na razini jednoga zavoja jedino ako se namot sekundara sastoji od minimalno 100 zavoja.

Fazna pogreška – za struje sinusnog oblika definira se kao fazna razlika vektora struje primara i sekundara, izražena u minutama ili centiradijanima.



Slika 3.4: Vektorski dijagram za utvrđivanje strujne i fazne pogreške

Na priključenom teretu stvara se pad napona \vec{U}_2 , a teret se računa po formuli:

$$\vec{Z} = R + jX \quad (3.9)$$

Struja sekundara I_2 uzrokuje stvaranje spomenutoga pada napona. Pojedini padovi napona mogu se prikazati kao:

$$R_2 \cdot \vec{I}_2 \quad i \quad jX_2 \cdot \vec{I}_2 \quad (3.10)$$

Zbroj padova napona jednak je induciranome naponu \vec{U}_1''

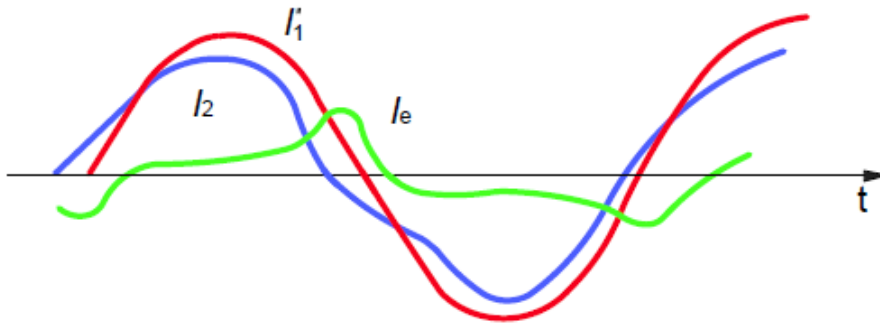
$$\vec{U}_1'' = \vec{I}_2 \cdot (R_2 + jX_2 + \vec{Z}) = \vec{I}_2 \cdot \vec{Z}_S \quad (3.11)$$

Ako se iz formule izluči struja I_2 postaje jasno da se ukupna impedancija u sekundarnom krugu može prikazati kao:

$$Z_S = \sqrt{(R + R_2)^2 + (X + X_2)^2} \quad (3.12)$$

$$\tan \beta_s = \frac{X + X_2}{R + R_2} \quad (3.13)$$

Jezgra kod transformatora za zaštitu odlazi u zasićenje. Struja magnetiziranja može značajno porasti u kratkom vremenu te može izrazito odstupati od pravilnog sinusnog oblika.



Slika 3.5: Struje ST-a pri zasićenju jezgre

I_e – struja magnetiziranja

I_2 – struja sekundara

I_1' – primarna struja reducirana na sekundarnu stranu

Iako je primarna struja pravilnog sinusnog oblika na sekundaru će struja izgubiti pravilnost valnog oblika. Vektorski prikaz struje postaje nemoguć. Kod transformatora koji se koriste u zaštiti ukupna pogreška ne može biti raščlanjena egzaktno na strujnu i faznu pogrešku stoga definiramo složenu pogrešku [5]. .

Složena pogreška – trenutna efektivna vrijednost razlike struje primara i sekundara pomnožena sa omjerom transformacije u stacionarnim uvjetima (izražena u postocima preko efektivne vrijednosti primarne struje) [1].

$$p_{is} = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_2 - i_1)^2 dt} \quad (3.14)$$

K_n – nazivni omjer

i_1 – trenutna struja primara

I_1 – efektivna vrijednost struje primara

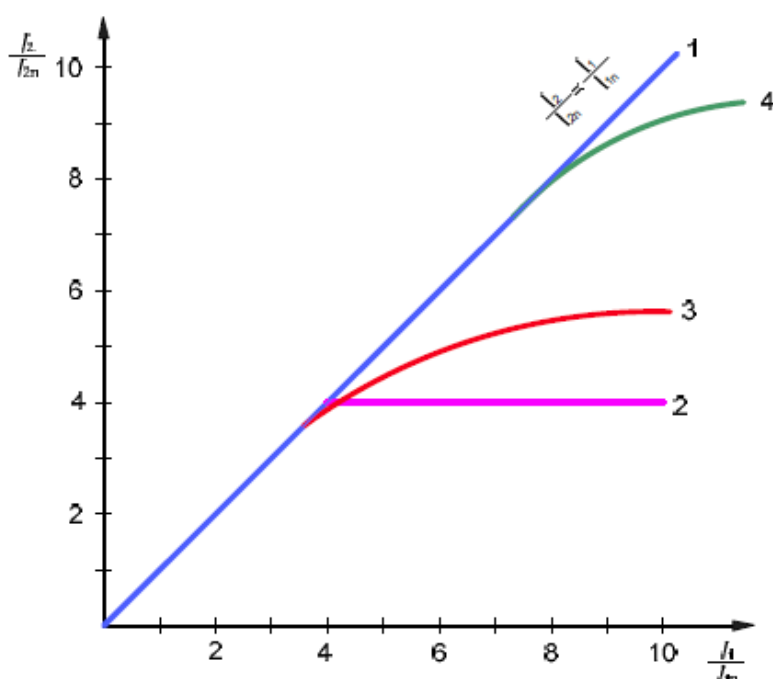
i_2 – trenutna struja sekundara

$T = \frac{1}{f}$ – trajanje perioda

Nazivna granična struja primara – vrijednost najmanje primarne struje pri nazivnom teretu u kojoj je složena pogreška ST-a jednaka ili veća od 10%.

Nazivna primarna granična struja točnosti – maksimalni iznos struje primara za koju su još uvijek ispunjeni zahtjevi točnosti s obzirom na složenu pogrešku.

Za određivanje pogreške transformatora za zaštitu bitno je analizirati ponašanje u nadstrujnom području jer je upravo to područje ono u kojem se mora osigurati ispravan rad transformatora pri preopterećenju (kratkom spoju).



Slika 3.6: Nadstrujna karakteristika ST-a

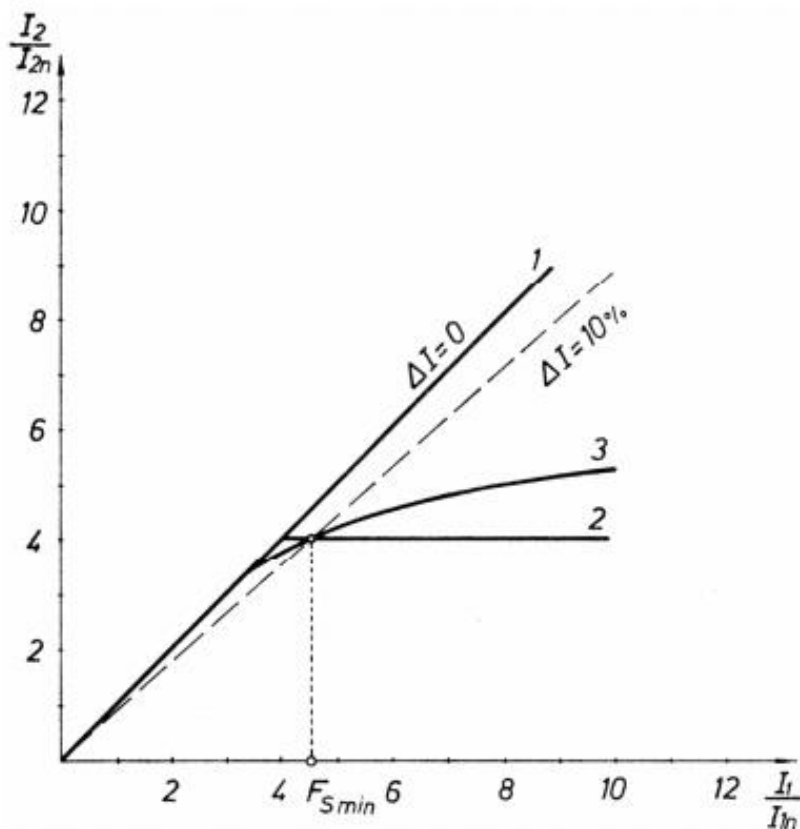
Krivulja 1 – idealna karakteristika ST-a za zaštitu

Krivulja 2 – idealna karakteristika ST-a za mjerenje

Krivulje 3 i 4 – strujne karakteristike ST-a za zaštitu, pri 100% i 50% opterećenja

Na dijagramu horizontalna os predstavlja omjer struje koja se pojavljuje na primaru i nazivne struje primara dok je na vertikalnoj osi postavljen omjer struje sekundara i nazivne sekundarne struje.

Idealna karakteristika ST-a za zaštitu bila bi prikazana kao karakteristika koja zadržava svoju linearnost bez obzira na povećanje u omjerima primarnih iznosa struje. Linearna karakteristika predstavlja ne postojanje pogreške transformatora.



Slika 3.7: Nadstrujne karakteristike ST-a (za mjerenje)

- Krivulja 1 - transformator bez pogreške
- Krivulja 2 - transformator s idealnom jezgrom
- Krivulja 3 - realna karakteristika

Faktor sigurnosti (Fs) i **nazivna sigurnosna struja (I_{1s})** pokazatelji su ponašanja SMT-a u području za struje većih iznosa od nazivne. Odnos te dvije veličine definiran je relacijom [8]:

$$\frac{I_{2s}}{I_{2n}} \leq 0.9 \cdot \frac{I_{1s}}{I_{1n}} = 0,9 \cdot F_S \quad (3.15)$$

Faktor sigurnosti – omjer nazivne granične struje primara i nazivne struje primara.

Standardni iznosi faktora sigurnosti su:

5 ili 10

Mjerni instrument u sekundarnom strujnom krugu (u slučaju kratkog spoja u sustavu) bolje je zaštićen što je faktor sigurnosti manji.

Poboljšanje zaštite mjernog instrumenta (od struje kratkog spoja i mrežnog strujnog udara) smještenog u sekundarnom krugu ST-a postiže se niskim faktorom sigurnosti F_s . Niskim faktorom sigurnosti možemo osigurati pojavu zasićenja pri odgovarajućoj struji. Također, osigurava se prijenos primarnih struji (većih od $I_1 = F_s \cdot I_{1n}$) preko nižih sekundarnih iznosa nego što nazivni omjer definira (uz teret približno jednak nazivnom iznosu Z_n). Umnožak ukupnog prividnog kruga sekundara i faktora sigurnosti ST-a stalan je stoga bi teret priključen na sekundaru trebao biti odgovarajućeg iznosa - po mogućnosti vrlo sličnog iznosa kao nazivni teret Z_n .

Ako imamo slučaj da je priključeni teret nižeg iznosa od nazivnog stvarni faktor sigurnosti odstupa od nazivnog faktora sigurnosti po relaciji:

$$F_s = F_{Snaz} \cdot \frac{Z_n + Z_t}{Z_s + Z_t} \quad (3.16)$$

Z_t – impedancija kruga sekundara

Z_s – impedancija stvarnog tereta

Odstupanje faktora sigurnosti od predviđenoga nazivnog iznosa uzrokuje da struja primara koja bi inače dovela jezgru u zasićenje ne bude dovoljna te zasićenje nastane tek na višim iznosima primarne struje. Direktni uzrok tome može biti spajanje tereta u krugu sekundara koji je upečatljivo nižeg iznosa od nazivnoga, stoga je za pravilnu zaštitu instrumenta u sekundarnom krugu preporučeno spajanje dodatne impedancije da bi se smanjio iznos struje koja teče kroz instrument. Može se zaključiti da osim zbog samih grešaka instrumenata do određenih odstupanja dolazi zbog neispravnih postavki mjernog sistema (transformatora i instrumenta) te neodgovarajućeg izbora ST-a, općenito neuzimanjem svih utjecajnih faktora u obzir [5].

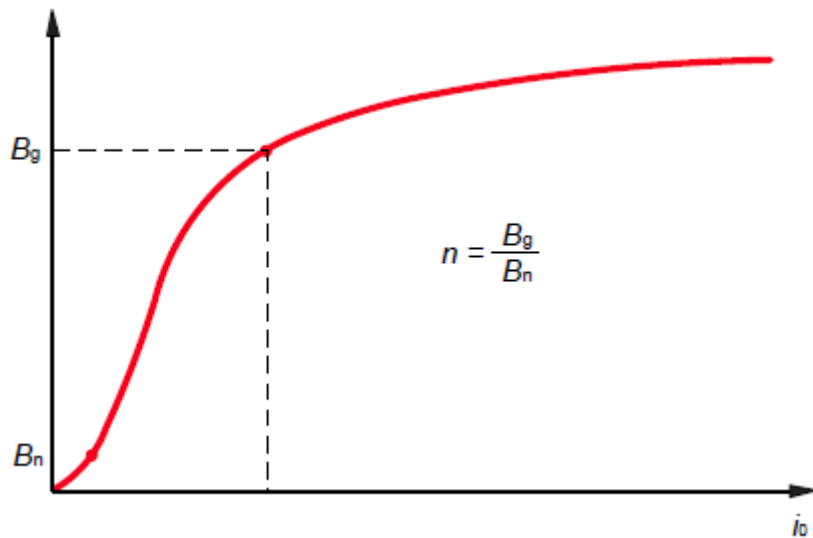
Granični faktor točnosti (F_t) – omjer nazivne granične primarne struje točnosti i nazivne primarne struje.

Nadstrujni broj (n) – omjer nazivne primarne granične struje točnosti i nazivne struje primara. Sve češće se koristi sinonim **granični faktor točnosti (ALF)**.

$$n = \frac{B_g}{B_n} \quad (3.17)$$

Graničnim faktorom točnosti definiramo iznos indukcije uz nazivnu struju i opterećenje u odnosu na indukciju koljena krivulje magnetizacije magnetskog kruga.

Kod ST-a za zaštitu priključivanjem tereta nižeg iznosa od nazivnoga može se osigurati ispunjavanje željenih uvjeta točnosti pri strujama kvara iznosa većih od iznosa koji proizlaze iz nazivnog graničnog faktora točnosti n .



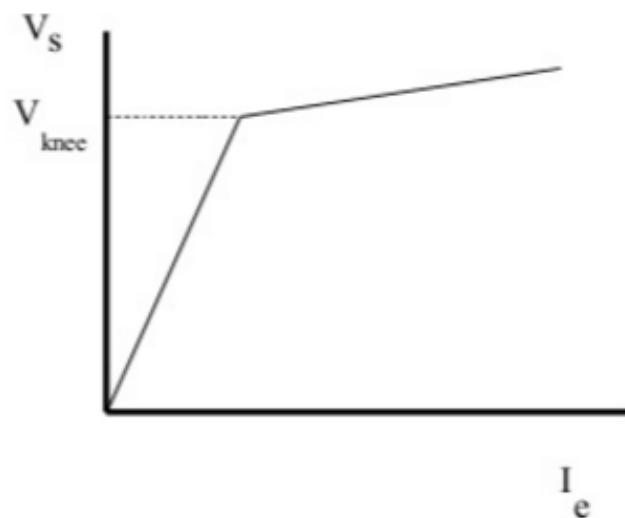
Slika 3.8: Nelinearna karakteristika magnetske jezgre

B_n – odgovarajuća indukcija pri nazivnoj struji primara

B_g – odgovarajuća indukcija pri nazivnoj graničnoj struji primara

Standardni iznosi graničnog faktora točnosti:

5 – 10 – 15 – 20 – 30



Slika 3.9: Granica zasićenja jezgre

I_e – struja magnetizacije

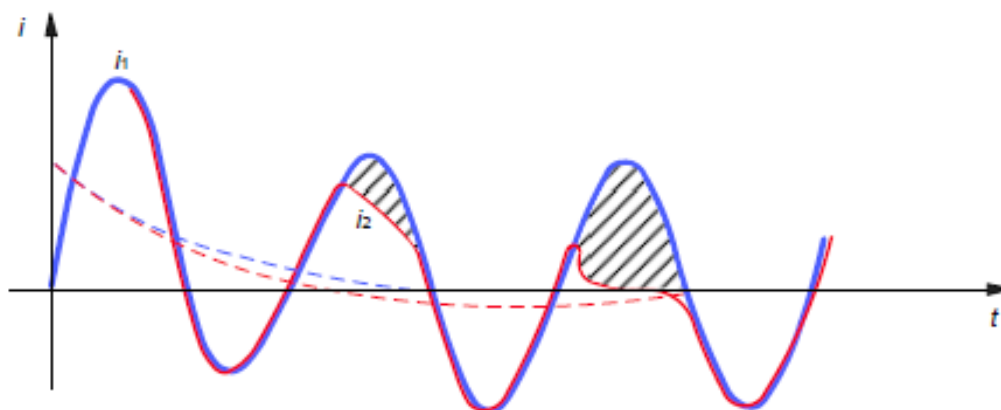
V_s – vladajući napon

V_{knee} – napon koljena

Ako napon V_s nađe iznos definiran točkom koljena ST-a pojaviti će se zasićenje jezgre. U stanju zasićenja ubrzani porast struje magnetizacije i njen utjecaj ne može se više zanemarivati [9].

Prestankom napajanja magnetski tok počeo bi padati eksponencijalno u skladu s vremenskom konstantom kruga sekundara transformatora. Magnetsku indukciju zaostalu u materijalu nakon prestanka djelovanja vanjskoga polja naziva se remanencijom.

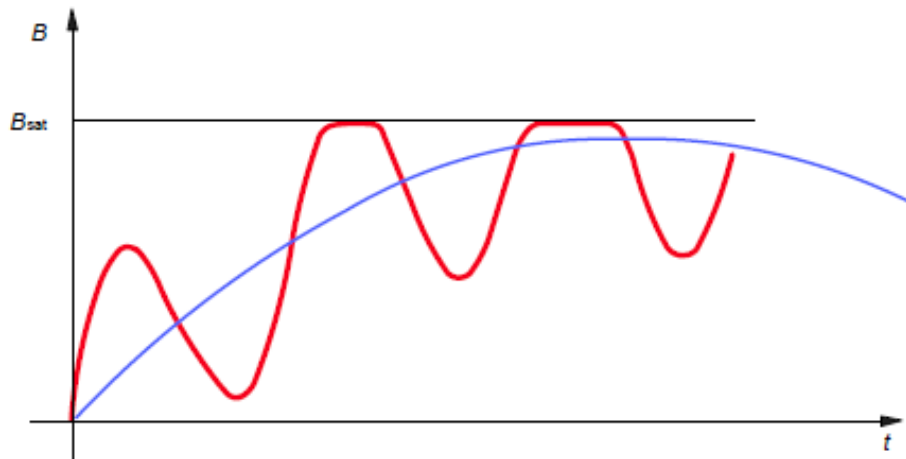
Pri analizi transformatora u prijelaznim pojavama uzrokovanim kvarovima njegovi parametri nisu jednoznačni pokazatelj ponašanja. Analizu koju vršimo smatramo valjanom za pojave kvara tijekom redovnog rada u mreži dok vraćanje u rad (u mrežu pod postojećim kvarom) nije predviđeno. Vremenski zahtjevi zasićenja jezgre nisu egzaktno postavljeni. S obzirom na tu činjenicu pri izboru transformatora (s obzirom na klase) postavljaju se dodatni zahtjevi za ponovni uklop.



Slika 3.10: Oblik struje primara i sekundara pri zasićenju

Izobličena sekundarna struja uzrokuje prijenos koji nije valjan te dobiveni rezultati nisu vjeran prikaz stanja u mreži. Svi zahtjevi za relejnu zaštitu ispunjeni su samo ako je prijenosni omjer ST-a valjan. Elektroenergetski sustavi su u konstantnom ubrzanom razvoju što dovodi do sve većih iznosa mrežnih napona te veće struje i snage kratkog spoja. Cijeli sustav i njegova stabilna funkcionalnost ovisna je o pravovremenoj intervenciji relejne zaštite. Zbog povećanja iznosa veličina u sustavu postavljeni vremenski zahtjevi prorade zaštite sve su stroži. Poželjna je prorada unutar par desetaka milisekundi [5].

Prijelazna pojava nastala zbog kvara u mreži dovodi do zasićenja feromagnetske jezgre. Njen utjecaj je izraženiji što je veća vremenska konstanta mreže kojom se prigušuje. Istosmjerna komponenta struje kvara direktni je uzrok zasićenja jezgre. Izražena izobličena pojaviti će se u jednoj poluperiodi. Također, dolazi do vremenskog pomaka prolaza struje sekundara kroz horizontalnu os nule u odnosu na struju primara.



Slika 3.11: Zasićenje magnetske jezgre

Uočava se prednost nekonvencionalnih pretvarača pošto kod njih nije prisutna standardna feromagnetska jezgra. U konvencionalnim klasičnim ST-ima pri pojavama kvara prijelazne pojave mogu trajati par sekundi - dovoljno da dovedu do izraženih pogrešaka transformacije struje primara na sekundar. Time šalju neispravan (izobličeni) signal od sekundara prema sistemu relejne zaštite onemogućujući pravovremenu proradu.

Parametri ST-a moraju zadovoljavati kriterije i u slučajevima zasićenja jezgre.

Za potrebe definiranja pojedine klase ST-a za zaštitu bitno je spomenuti i slijedeće parametre:

Struja trenutne pogreške (i_ε) sadrži istosmjernu i izmjeničnu komponentu, a definirana je formulom:

$$i_\varepsilon = i_s \cdot K_n - i_p \quad (3.18)$$

i_s – trenutni iznos struje sekundara

K_n – nazivni omjer transformacije

i_p – trenutni iznos struje primara

Maksimalna trenutna pogreška ($\hat{\varepsilon}$) – iznos maksimalne struje trenutne pogreške tijekom vremena određenoga radnog ciklusa, prikazana preko postotka u odnosu na vršnu vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja.

$$\hat{\varepsilon} = \frac{100}{\sqrt{2}I_{psc}} \cdot \hat{i}_\varepsilon [\%] \quad (3.19)$$

Prijelazni radni ciklus je vremenski interval trajanja kratkog spoja u mreži. Može biti jednostruki ili dvostruki ako je prisutno automatizirano ponovno uključenje u mrežu.

Nazivni faktor simetrične struje kratkog spoja (K_{SSC}) – omjer efektivnih vrijednosti I_{psc} i I_{1n}

$$K_{SSC} = \frac{I_{psc}}{I_{1n}} \quad (3.20)$$

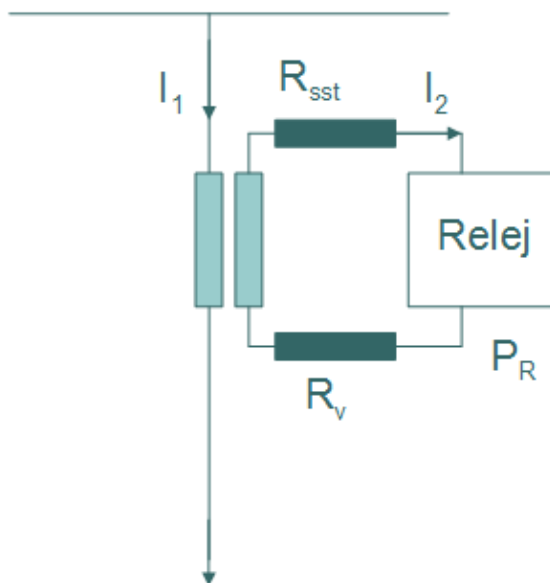
I_{psc} – simetrična struja kratkog spoja (efektivna vrijednost)

I_{1n} – nazivna primarna struja (efektivna vrijednost)

Faktor remanencije (K_r) – vrijednost omjera remanentnog toka i toka zasićenja jezgre ST-a.

Pri izboru ST-a uzimamo u obzir i ostale parametre kao što su: nazivni napon za koji je predviđen, nazivna frekvencija, nazivna primarna i sekundarna struja, broj jezgri i nazivna snaga svake od njih, ukupni teret i ukupna snaga, vrsta osnovne izolacije, termička klasa izolacije...itd.

ST za zaštitu spaja se prema slici:



Slika 3.12: Spajanje ST-a za zaštitu

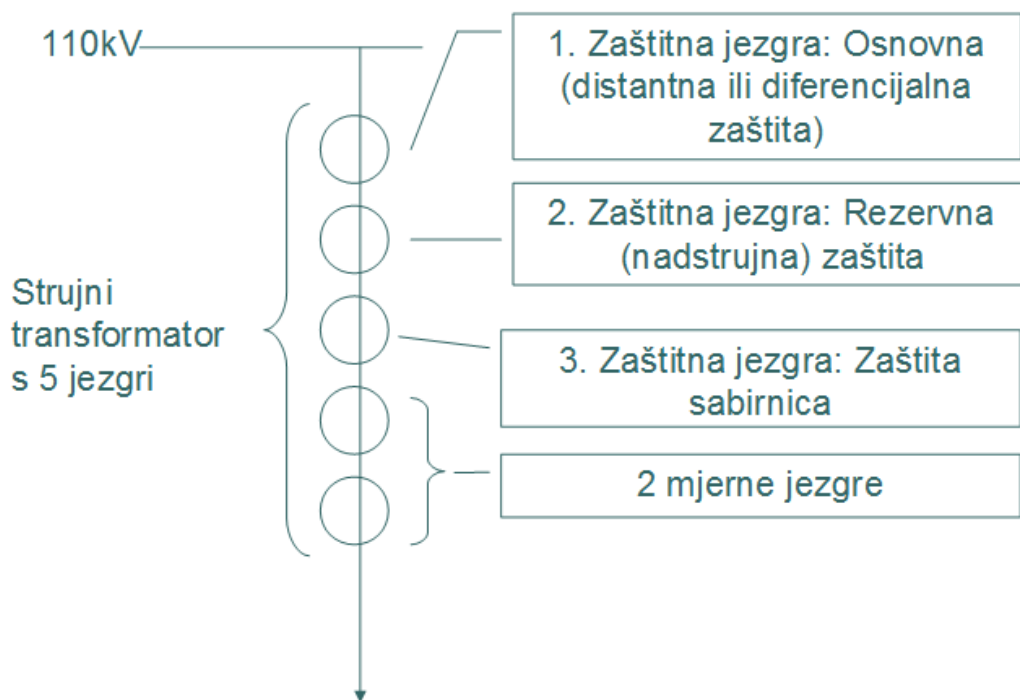
I_1 – struja primara

I_2 – struja sekundara

R_v – otpor vodiča

R_{sst} – otpor namota sekundara

P_r – potrošnja releja



Slika 3.13: Pogodan raspored zaštita po jezgrama

Opravdanost izbora ST-a provjerava se s obzirom na zahtjeve koje postavljamo za diferencijalnu zaštitu prema primjeru:

Za ST 110/10(20) kV ($S_n = 63$ MVA, $uk\% = 12\%$, $PCu = 300$ kW) zadano je:

Poznati su i slijedeći podaci:

- nazivni teret jezgre, $P_n = 40$ VA
- duljina spojnih vodiča, $l = 65$ m
- prijenosni omjer, 2000/5 A
- klasa točnosti i granični faktor točnosti, 5P20 - (nadstrujni broj $n = 20$)
- vlastiti otpor namota (jezgre ST-a), $R_{vl} = 0,5\Omega$
- presjek spojnih vodiča, $S = 4$ mm²
- specifična vodljivost spojnih vodiča, $\chi = 56$ m/ Ω ·mm²
- potrošnja strujnog izlaza diferencijalnog releja kod nazivne struje ulaza, $P_r = 0,5$ VA

S obzirom na stvarni faktor granične točnosti ST mora zadovoljiti kriterij:

$$n' \geq 4 \cdot \frac{I_k}{I_n}$$

I_k – maksimalna struja kvara u zoni šticećenja diferencijalne zaštite

I_n – nazivna struja primara ST-a

Postavljeni zahtjevi vrijede za sve struje kvara s vremenskom konstantom istosmjerne komponente do 100 ms. Za vremenske konstante istosmjerne komponente veće od 100 ms izraz za stvarni granični faktor točnosti ispravljamo (izračunavamo) formulom:

$$n' \geq 4 \cdot \frac{I_k}{I_n} \cdot \frac{T(ms)}{100}$$

T – vremenska konstanta istosmjerne komponente struje kvara dobivena izračunom

Maksimalnu struju kvara u području zone diferencijalne zaštite računamo na temelju podatka o naponu kratkog spoja učinskog transformatora.

Za $U_n = 10$ kV:

$$I_k = c \cdot \frac{100}{u_k} \cdot \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 1,1 \cdot \frac{100}{12} \cdot \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 10} = 33,342 \text{ kA}$$

$c = 1,1$ – naponski koeficijent ($U_{\max \text{ pog}} = 1,1 \cdot U_n$)

Za $U_n = 20$ kV:

$$I_k = c \cdot \frac{100}{u_k} \cdot \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 1,1 \cdot \frac{100}{12} \cdot \frac{63}{\sqrt{3} \cdot 20} = 16,671 \text{ kA}$$

Vrijednost od 33,342 kA shvaća se kao maksimalna struja kvara u zoni diferencijalne zaštite.

Djelatnu komponentu napona KS-a računamo formulom:

$$u_r = \frac{P_{Cu}}{S_n} \cdot 100\% = \frac{0,3}{63} \cdot 100\% = 0,476 \%$$

Induktivna komponenta napona KS-a računa se formulom:

$$u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = \sqrt{0,12^2 - 0,00476^2} = 11,991 \%$$

Preko izračunatih vrijednosti djelatne i induktivne komponente napona KS-a određuje se omjer R/X transformatora:

$$\frac{R}{X} = \frac{u_r}{u_x} = \frac{0,476}{11,991} = 0,0397$$

Konačno, određuje se vremenska konstanta istosmjerne komponente struje kratkog spoja (veća od 100 ms):

$$T = \frac{L}{R} = \frac{\omega \cdot L}{\omega \cdot R} = \frac{X}{\omega \cdot R} = \frac{1}{\omega \cdot \frac{R}{X}} = 125 \text{ ms}$$

Stvarni granični faktor točnosti potrebno je izračunati za $T > 100\text{ms}$. Izračun će predstavljati potrebni nadstrujni broj:

$$n \geq 4 \cdot \frac{I_k}{I_n} \cdot \frac{T(\text{ms})}{100} = 4 \cdot \frac{33342}{2000} \cdot \frac{125}{100} = 20,839$$

Vlastita potrošnja jezgre ST-a iznosi:

$$P_{sp.v.} = I_n^2 \cdot R_{sp.v.} = I_n^2 \cdot \frac{l}{\chi \cdot S} = 5^2 \cdot \frac{65}{56 \cdot 4} = 7,254$$

Izračunava se stvarni granični faktor točnosti:

$$n' \geq n \cdot \frac{P_n + P_{vl}}{P_{sp.v.} + P_r + P_{vl}} = 20 \cdot \frac{40 + 12,5}{7,254 + 0,5 + 12,5} = 51,842$$

Zadovoljen je uvjet:

$$n' \geq n \quad \text{tj.} \quad 51,842 \geq 20,839$$

Granični faktor točnosti (nadstrujni broj ili ALF) veći je od zadanog te se može zaključiti da zadani ST zadovoljava zahtjeve zaštitnog releja.

Opravdanost izbora ST-a provjerava se s obzirom na zahtjeve koje postavljamo za nadstrujnu zaštitu prema primjeru:

Za ST 110/10(20) kV (terminala polja REF 543 i modula zaštite od električnog luka SM) zadano je:

- nazivni teret jezgre, $P_n = 10 \text{ VA}$
- duljina spojnih vodiča, $l = 40 \text{ m}$
- nazivna kratkospojna struja postrojenja, 16 kA
- prijenosni omjer, $2000/5 \text{ A}$
- klasa točnosti i nazivni granični faktor točnosti, 10P10 (nadstrujni broj $n = 10$)
- vlastiti otpor namota (jezgre ST-a), $R_{vl} = 0,5\Omega$
- presjek spojnih vodiča, $S = 4 \text{ mm}^2$
- specifična vodljivost spojnih vodiča, $\chi = 56 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$
- potrošnja strujnog izlaza kod nazivne struje ulaza ($I_n=5\text{A}$), $P_r = 0,5 \text{ VA} + 0,3 \text{ VA}$
- potrošnja strujnog modula zaštite od električnog luka pri nazivnoj struji ulaza ($I_n=5\text{A}$), $P_{SM} = 0,1 \text{ VA}$

ST-i za nadstrujnu zaštitu transformatora dimenzioniraju se putem ispunjavanja dvaju zahtjeva:

$$I_n > \frac{I_k}{100}$$

$$n' \geq \frac{I_k}{I_n}, \quad \text{ili} \quad n' \geq 10$$

Vlastita potrošnja jezgre SMT-a iznosi:

$$P_{vl} = I_n^2 \cdot R_{vl} = 5^2 \cdot 1 = 25 \text{ VA}$$

Gubici u spojnim vodičima računaju se prema formuli:

$$P_{sp.v.} = I_n^2 \cdot R_{sp.v.} = I_n^2 \cdot \frac{l}{\chi \cdot S} = 5^2 \cdot \frac{40}{56 \cdot 4} = 4,463 \text{ VA}$$

Potrošnja ostale spojene opreme (strujni modul zaštite od električnog luka) iznosi:

$$P_{SM} = 0,1 \text{ VA}$$

Potrošnja terminala polja i nadstrujne zaštite iznosi:

$$P_r = 0,5 VA + 0,3 VA = 0,8 VA$$

Provjera prvog uvjeta:

$$I_n > \frac{I_k}{100} = \frac{14000}{100} = 140 A \quad tj. \quad 2000 A > 140 A$$

Nazivna struja primara od 2000A veća je od izračunatoga iznosa 140A, prvi uvjet je ispunjen.

Provjera drugog uvjeta:

$$n' \geq \frac{I_k}{I_n} = \frac{14000}{2000} = 7$$

Izračunava se stvarni nadstrujni broj (ovisan o iznosu stvarnog priključenog tereta):

$$n' \geq n \cdot \frac{P_n + P_{vl}}{P_{sp.v.} + P_{SM} + P_r + P_{vl}} = 10 \cdot \frac{20 + 25}{4,463 + 0,1 + 0,8 + 25} = 14,821$$

Stvarni nadstrujni broj veći je od potrebnoga, može se zaključiti da su oba postavljena uvjeta zadovoljena.

4. PODJELE STRUJNIH TRANSFORMATORA ZA ZAŠTITU PREMA KLASAMA TOČNOSTI

Zaštitni ST-i dijele se prema razredima (klasama): **P**, **TPX**, **TPY**, **TPZ** i **TPS**

Razred **P** – pomoću složene pogreške pri struji $n \cdot I_{pn}$ određuje se točnost.

Razred **TPX** – tijekom vremena specifičnog radnog ciklusa točnost je određena maksimalnom trenutnom pogreškom (pri struji kratkog spoja $K_{SSC} \cdot I_{pn}$).

Razred **TPY** – tijekom vremena specifičnog radnog ciklusa točnost je određena maksimalnom trenutnom pogreškom (pri struji kratkog spoja $K_{SSC} \cdot I_{1n}$). Faktor remanencije ne smije prelaziti vrijednost od 0,1.

Razred **TPZ** - tijekom vremena jednostrukog radnog ciklusa točnost je određena maksimalnom trenutnom pogreškom (pri struji kratkog spoja $K_{SSC} \cdot I_{1n}$) uz zanemarivi remanentni tok.

Točnost pojedinih razreda odnosi se na granične uvjete.

Razred **TPS** – za transformator male rasipne reaktancije određeno je da stvarni omjer broja zavoja ne prelazi 0,25% od nazivnoga, time je određeno maksimalno dozvoljeno odstupanje od zadanoga omjera. Također, za magnetski tok jezgre jednak onome koji nastaje u graničnim uvjetima struja magnetizacije ne smije prelaziti iznos od 5% nazivne kratkotrajne termičke struje preračunate na stranu sekundara.

Dopuštene pogreške ST-a definirane su tablicama posebno za transformatore za zaštitu i onima za mjerenje. Pri nazivnom teretu ST-i za zaštitu moraju zadovoljavati granice zadane za pojedine razrede (klase) točnosti s obzirom na strujnu, faznu, složenu i maksimalnu trenutnu pogrešku.

ST-i za mjerenje moraju zadovoljavati granice zadane za pojedine razrede (klase) točnosti s obzirom na strujnu i faznu pogrešku.

Tablica 4.1: Granice pogrešaka ST-a za zaštitu

Pri nazivnoj primarnoj struji				Pri graničnim uvjetima točnosti	
klasa točnosti	strujna pogreška %	kutna pogreška		pogreška %	vrsta pogreške
		min	crad		
5P	±1	±60	±1,8	5	složena pogreška pri struji $n \cdot I_{1n}$
10P	±3	-	-	10	složena pogreška pri struji $n \cdot I_{1n}$
TPX	±0,5	±30	±0,9	10	max. trenutna pogreška pri struji $K_{sec} \cdot I_{1n}$
TPY	±1	±60	±1,8	10	max. trenutna pogreška pri struji $K_{sec} \cdot I_{1n}$
TPZ	±1	180±18 5,3±0,6		10	izmjenična komponenta max. trenutne pogreške pri struji $K_{sec} \cdot I_{1n}$

Tablica 4.2: Granice pogrešaka ST-a za mjerenje

Klasa točnosti	strujna pogreška ± p₁%						fazna pogreška ± δ₁, min crad					
	% nazivne struje											
	1	5	20	50	100	120	1	5	20	50	100	120
0,1	-	0,4	0,2	-	0,1	0,1	-	15	8	-	5	5
							-	0,45	0,24	-	0,15	0,15
0,2	-	0,75	0,35	-	0,2	0,2	-	30	15	-	10	10
							-	0,9	0,45	-	0,3	0,3
0,2s	0,75	0,35	0,2	-	0,2	0,2	30	15	10	-	10	10
							0,9	0,45	0,3	-	0,3	0,3
0,5	-	1,5	0,7	-	0,5	0,5	-	90	45	-	30	30
							-	2,7	1,35	-	0,9	0,9
0,5s	1,5	0,75	0,5	-	0,5	0,5	90	45	35	-	30	30
							2,7	1,35	0,9	-	0,9	0,9
1	-	3	1,5	-	1	1	-	180	90	-	60	60
							-	5,4	2,7	-	1,8	1,8
3	-	-	-	3	-	3	nisu specificirane					
5	-	-	-	5	-	5	nisu specificirane					

Za ST-e razreda točnosti 3 i 5 granice pogrešaka moraju biti zadovoljene za sve vrijednosti tereta između 50% i 100% nazivnog tereta. Za ostale razrede točnosti granice pogrešaka moraju biti zadovoljene za sve vrijednosti tereta između 25% i 100% nazivnog tereta.

Kod ST-a razreda TPZ dodatni zahtjevi postavljeni s obzirom na ponovno uključenje (uklop) neće utjecati na dimenzije feromagnetske jezgre dok iznos istosmjerne komponente struje kratkog spoja i vremenska konstanta T_1 utječu u maloj mjeri. Određivanje vremena nakon kojega se jezgra može zasititi također ne utječe značajno sve dok je to vrijeme reda veličine jedne ili dvije vrijednosti industrijske frekvencije.

Napon za vrijeme beznaponske pauze opasti će na izrazito nisku vrijednost. Vremenska konstanta kruga sekundara je mala rezultirajući da unutar beznaponske pauze od 0,3s napon opadne na vrijednost od oko 0,2% početne vrijednosti.

Pravilan odabir ST-a razreda TPZ u određenim slučajevima može ispasti izrazito ekonomičan zbog smanjenog utroška materijala korištenog pri izradi odabranoga tipa. Parametri takvoga tipa ST-a linearne jezgre omogućuju njegov izbor kada nije ključno prenošenje istosmjerne komponente struje kratkog spoja. Prijelaz feromagnetske jezgre u zasićenje nije dopušteno pri ispravnom radu ST-a korištenoga za zaštitu. Uspoređeno sa time, ST-i razreda TPY i TPX s određenom točnošću mogu uvjerljivo prenositi istosmjerne i izmjenične komponente asimetričnih struji kratkog spoja.

Prilikom odabira karakteristika razreda TPZ u obzir je potrebno uzeti minimalnu nazivnu snagu (realno potrebnu), izraženu u vatima. Također, odnos simetrične struje kratkog spoja i nazivne struje primara treba biti što manji. Razred TPZ ima jako malu vremensku konstantu, s time i mali faktor predimencioniranja. Uspoređeno sa time, kod razreda TPX i TPY vremenske konstante su većih iznosa (od 0,2s do 100ms).

Uz pretpostavku da zasićenje neće nastupiti niti pri utjecaju maksimalnog toka faktor predimencioniranja može se prikazati jednadžbom:

$$K = \omega \cdot T_1 + 1 \quad (4.1)$$

Velikim zračnim rasporima u jezgri ST-a ostvaruje se manji vlastiti induktivitet kruga sekundara, time i manja vremenska konstanta.

ST-i razreda TPX imaju velike iznose faktora remanencije od oko 0,8. Pri izradi njihove jezgre poželjna je kompaktnost, jednoliko namatanje zavoja sekundara duž oboda jezgre, pravilna geometrijska simetrična veza namota primara i sekundara. ST-i razreda TPY su sličnih karakteristika sa manjim antiremanentnim rasporima u jezgri.

Tablica 4.3: Tablica za usporedbu razreda TPX, TPY, TPZ

	TPX i TPY	TPZ
Raspon primarne struje	500 do 40000 A	1000 do 20000 A
Sekundarne struje	1,2,5 A	1,2,5 A
Maksimalna snaga tereta	15 W	15 W
Strujna greška u stacionarnom stanju	0,5%	1%
Kutna greška	60'	180'±20'
Prijenos istosmjerne komponente	točno	vrlo netočno (ovisno o vremenskoj konstanti mreže)
Primjena	svagdje	
Rad s ostalim strujnim transformatorima	nema ograničenja	samo ako se ne traži vjeran prijenos istosmjerne komponente moguć samo ako imaju jednake vremenske konstante
Utjecaj stranog EM polja	jedva primjetan; može se eliminirati kompenzacijskim namotom	gotovo ne postoji, nije potrebna kompenzacija
Rasipna reaktancija	zanemariva	nije uvijek zanemariva

Kod ST-a razreda TPZ pri prijenosu istosmjerne komponente maksimalna pogreška je u korelaciji sa vremenskom konstantom mreže koja je većih iznosa i definirana je jednadžbom:

$$t_{max} = \frac{T_2 \cdot T_1}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (4.2)$$

Kod ST-a razreda TPZ definiramo greške prijelaznih stanja putem maksimalne trenutne greške u prijenosu simetričnih komponenti struja kratkog spoja.

Vremensku konstantu razreda TPZ ograničavamo dozvoljenom kutnom greškom iznosa od 180±20min na iznose od 60±6ms.

Definiranje karakteristika ST-a

Kao polaznu točku potrebno je odrediti osnovne parametre:

- nazivni omjer transformacije
- nazivne primarne i sekundarne struje
- nazivni razred i teret
- kratkotrajne dinamičke i termičke struje
- maksimalni pogonski napon
- ispitne napone

Napomena: Kod definiranja omjera transformacije oznaka npr.1500/5A označava konkretne vrijednosti primara i sekundara. Omjer transformacije ne predstavlja se preko nekog drugog razlomka koji matematički korespondira omjeru 1500/5. Recimo, u matematičkom smislu 1500/5 može se prikazati kao 300/1, ali se kod predstavljanja omjera transformacije ST-a takav način prikaza ne primjenjuje.

Parametri ST-a mogu se definirati na tri načina, sa poželjnim načinom pogodnim za pojedine razrede.

Specifikacija uzbudnih karakteristika

- pogodno za TPX razred

Mora biti zadano:

- otpor namota sekundara, pri 75C°
- minimalni napon koljena, V_k
- maksimalna efektivna vrijednost uzbudne struje – I_0 (pri naponu koljena)

Specifikacija funkcionalnih podataka

- pogodno za TPY i TPZ razred

Mora biti navedeno:

- snaga tereta (u VA) ili otpora (u Ω)
- vremenska konstanta mreže
- eventualno ograničenje otpora namota sekundara

Ako transformator ne smije doći u zasićenje to treba naglasiti, a ako to nije slučaj onda treba navesti unutar kojeg vremena transformator ne smije doći u zasićenje. Treba pružiti podatak da li se zatijeva prijenos asimetrične struje kratkoga spoja ili barem navesti koji razred ST-a je prikladan za uporabu. Također, treba navesti i da li se ST koristi u sustavu ponovnog automatskog uklapanja. Ako se koristi treba navesti vremensko trajanje beznaponske pauze.

Specifikacija podataka za usklađivanje karakteristika ST-a prema karakteristikama opreme

- pogodno za TPY i TPZ razred

Kod izjednačavanja karakteristika ST-a sa znanim karakteristikama opreme potrebno je navesti:

- nazivnu snagu (u VA) ili nazivni teret (u Ω)
- vremensku konstantu mreže i nazivnu vremensku konstantu kruga sekundara ST-a
- nazivni faktor predimenzioniranja
- maksimalni iznos faktora remanencije
- otpor namota sekundara, pri 75 C°
- omjer između simetrične struje kratkog spoja i nazivne struje

5. UZEMLJENJE ZVJEZDIŠTA TRANSFORMATORA

Uzemljenjem nazivamo povezivanje točke mreže (ili dijela postrojenja koje bi eventualno moglo doći pod napon) sa zemljom (nultim potencijalom) putem uzemljivača [7].

Razlikujemo:

- pogonsko uzemljenje
- zaštitno uzemljenje
- gromobransko uzemljenje

Sve vrste uzemljenja zvjezdišta transformatora spadaju pod kategoriju pogonskih uzemljenja (pri normalnom pogonu).

Općenito, zaštita transformatora dijeli se na zaštitu od:

- preopterećenja
- zemljospoja
- atmosferskih prenapona
- vanjskih kratkih spojeva
- unutarnjih kratkih spojeva

Unutarnji kratki spojevi mogu nastati pri kvarovima u jezgri te između namota iste faze ili različitih faza. Zemljospoj nastaje spajanjem namota i mase (tj. uzemljene točke, npr. kotla transformatora). Za ispravno funkcioniranje zaštite transformator mora biti izoliran od ostalih uzemljenih dijelova te samog uzemljenja tj. mora biti izoliran od bilo koje točke zemljinog potencijala. Također, većina transformatora trebala bi imati pogonsko i zaštitno uzemljenje.

Uz uporabu odgovarajućeg SMT-a možemo izvesti zaštitno uzemljenje kotla određenog transformatora tako da se na sekundar SMT-a spaja strujni relej povezan s prekidačem za isključenje transformatora koji se štiti.

Uzemljenje se bitno razlikuje za različite naponske razine. U Hrvatskoj visoki i niski napon direktno se uzemljuje mada za SMT niskog napona ponekada uzemljenje nije potrebno. Standardno uzemljenje SMT-a vrši se uzemljenjem jedne stezaljke sekundara - one obilježene slovom k kada je slučaj da su stezaljke primara označene velikim slovima K i L (orijentirano spram smjera struje), a stezaljke sekundara malim slovima k i l .

Srednji napon se redovito ili ostavlja izoliran ili se uzemljuje putem malooskog otpornika. Kod srednjeg napona najveći problem su struje zemljospoja i opasni naponi dodira. Time ta dva faktora postaju najutjecajniji pri izboru načina uzemljenja zvjezdišta srednjenaponskih SMT-a. [11].

Uzemljenje zvjezdišta transformatora može biti:

- izolirano prema zemlji
- direktno spojeno sa zemljom
- spojeno sa zemljom preko malooskog otpornika
- spojeno sa zemljom preko prigušnice (fino regulirane, stupnjevite ili fiksne)
- spojeno sa zemljom kombiniranjem prigušnice i malooskog otpornika

Kod srednjih napona uzemljenje zvjezdišta može biti putem shunt prekidača koji se ugrađuje u zvjezdište transformatora [12].

Glavne utjecajni faktori pri izboru vrste uzemljenja zvjezdišta su:

- iznos struje kvara (naglasak na kapacitivnoj komponenti)
- naponska razina
- iznosi unutarnjih prenapona
- jednostavnost, sigurnost i efikasnost relejne zaštite
- mogućnost smanjenja izolacijske razine opreme
- stanje uzemljenja elemenata mreže
- specifični otpor tla
- pouzdanost opskrbe [13]

Izbor vrste uzemljenja utječe na uvjete rada same mreže, vrstu zaštite te na način upravljanja mrežom.

Vrsta uzemljenja trebala bi biti odabrana prema unikatnim karakteristikama neke određene pozicije SMT-a u mreži, što znači da će vrsta uzemljenja zvjezdišta biti odabrana prema konkretnoj situaciji i prilikama u mreži.

Pri izboru načina uzemljenja uzimamo u obzir i ekonomski faktor pošto se pojedina rješenja mogu bitno razlikovati s obzirom na cijenu (izbor uzemljenja utječe na vrstu i cijenu ugrađene opreme) [12].

6. IZVEDBE STRUJNIH MJERNIH TRANSFORMATORA

Osnovne kvalitete koje bi svaka izvedba SMT-a trebala posjedovati su:

- vrlo visoka točnost (preciznost prijenosa)
- mehanička otpornost na udare
- mogućnost montaže u različitim položajima
- mogućnost plombiranja sekundarnih priključaka
- otpornost na kratkotrajna termo-dinamička naprezanja [9]

Prema tipu glavne izolacije mogu biti izolirani:

- epoksidnim smolama
- papirom impregiranim uljem
- plinom SF6

Po principu rada mogu biti:

- konvencionalni (koriste indukciju feromagnetske jezgre)
- nekonvencionalni (koriste Faradejev efekt, Hallov efekt ili zavojnicu Rogowskog)

Treba napomenuti da postoje i mnoge druge nekonvencionalne izvedbe te alternativni izbori za mjerenje struje kao što su metoda shunta ili razne posredne metode mjerenja struje putem mjerenja jačine magnetskog polja.

Upotreba s obzirom na naponske razine:

- niskonaponski, izađeni za napone do max. Un 1 kV
- sredjenaponski, do max. Un 35kV (ponekada u literaturi definirano i sa 40,5 kV); (uljem izolirani ili odliveni u epoksidnoj smoli)
- SF6 plinom izolirani, do max.Un 145 kV
- visokonaponski uljem izolirani, do max. Un 800 kV
- specijalni

SMT-e prema mjestu ugradnje možemo podijeliti na one za unutarnju ili vanjsku montažu.

6.1. Epoksidni strujni mjerni transformator

Epoksidna smola je inertni polimer odličnih izolacijskih i mehaničkih osobina. Svojstva epoksidne smole slična su svojstvima plastike. Pojam inertnosti (tromost) kao i kod plemenitih plinova označava svojstvo tvari da je nepodložna kemijskim promjenama, što znači da ili u potpunosti ne reagiraju ili reagiraju veoma sporo sa nekom drugom tvari. Zavisno o tome da li se ST koristi za vanjsku ili unutarnju montažu pri izradi se odabire prikladna epoksidna smjesa.

Izolacije niskonaponskih SMT-a najčešće su od epoksidne smole koja se koristi pri izradi SMT-a napona do 35kV. Rijede se koriste za izrade transformatora većih napona do 110kV [7] Epoksidni ST-i su visoke tehnološke kvalitete, a način njihove izrade čini ih upotrebljivim za ugradnju u rasklopnim postrojenjima u bilo kojem položaju. Prva faza izrade je sklapanje aktivnog dijela transformatora, a nakon toga se izlijeva u kalupima što znatno umanjuje njegove dimenzije.

S obzirom na vrstu primara ST-a podjela po izvedbi vrši se na:

Potporni – postavljaju se u ćelijama na pod (za unutarnju montažu).



Slika 6.1: *Potporni epoksidni ST*

Provodni – postavljaju se između pregrada ili zidova (za unutarnju montažu).



Slika 6.2: Niskonaponski provodi epoksidni ST

Namotni – koriste se kada je zbog niskih iznosa primarne struje potreban veći broj zavoja na primaru (220kV) [8].

Štapni - imaju jedan primarni vodič štapnog oblika. Zbog jednostavne konstrukcije i velike dinamičke struje ugrađujemo ih gdje god je to moguće.



Slika 6.3: Štapni ST (Končar, ASA tip)

Provlačni – bez primarnog namota (primar je sami vodič ili sabirnica čija struja se mjeri), sa jezgrom i sekundarnim namotom odlivenim u epoksidnoj smoli.



Slika 6.4: *Niskonaponski provlačni SMT*

Postoji veliki broj različitih izvedbi epoksidnih ST-a kao što je ST za montažu na sabirnice i natični ST.



Slika 6.5: *Natični ST (slika lijevo) i ST za montažu na sabirnice (slika desno)*

S obzirom na kriterij mjesta montaže epoksidni SMT-i (kao i ostali ST-i) dijele se po tipovima:

- za vanjsku montažu
- za unutarnju montažu

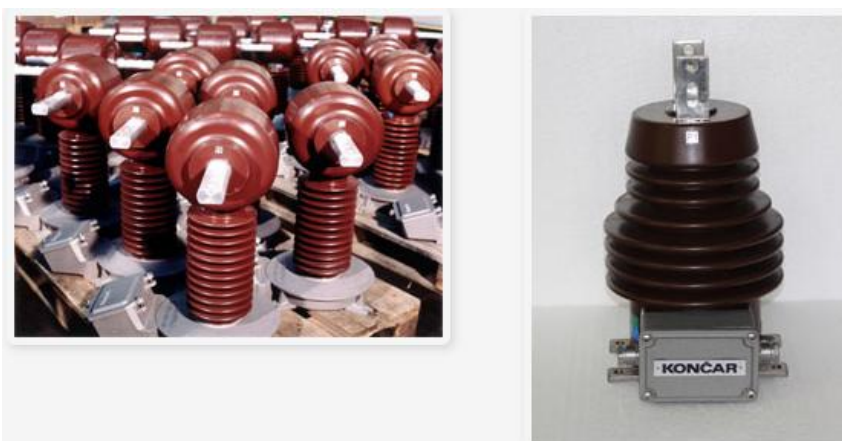
SMT-i proizvedeni od strane Končara također se dijele po kriteriju mjesta montaže:

- za vanjsku montažu: AGE i APE tipovi
- za unutarnju montažu: INA, UNA, ASA, ASAn i APA tipovi



Slika 6.6: ST tipa INA (za unutarnju montažu)

ST-i tipa INA su jednofazno jednopolno izolirani. Namijenjeni su za ugradnju u zatvorene prostore te montažu u svim položajima u pogonima sa nazivnim strujama primara do maksimalnih 2,5kA. Osim same transformacije struje na mjerljiv iznos ujedno izoliraju instrument spojen na sekundaru od visokog mrežnog napona. Sekundarni priključci su plombirani. Zatvaraju se poklopcem s vijcima na kojemu su ugrađene dvije gumene uvednice za priključni kabel. Priključak se nalazi u blizini sekundarnih plombiranih priključaka te se mora označiti i spojiti na zaštitno uzemljenje.



Slika 6.7: ST-i tipa Končar AGE i APE (za vanjsku montažu)

Koliko su epoksidni ST-i u prednosti nad drugim tipovima ST-a pokazuje i činjenica da su na tržištu gotovo istisnuli sve druge modele za niskonaponske mreže.

Nameće se problematika šireg rasprostranjivanja modernih alternativnih izvedbi ST-a te razvoj istih. Epoksidni ST-i su vrlo pouzdani, jednostavni za izradu i jeftini. Time postaju konkurentni na tržištu pa je pitanje kojim tempom će se raprostraniti novije tehnologije ST-a. Zbog nespremnosti proizvođača na riskantne poteze zaključak je da razvoj alternativnih tipova ST-a dolazi paralelno sa općim razvojem tehnologije i kompatibilnošću novijih vrsta izvedbi sa mikroprocesorskom tehnologijom koja se koristi u novijim sustavima [10].

Reprezentativni primjer toga je članak preuzet sa Poslovnog Dnevnika u kojem tvornica Končar predstavlja novi model ST-a.

“Jedan od takvih istraživačkih zadataka u 2013. godini bio je razvoj strujnog transformatora za vanjsku montažu s dvostruko izoliranim sekundarnim priključcima nazvanog AKU-24. Cilj projekta je bio dobiti novi, specifični tip strujnog transformatora samostojeće izvedbe namijenjenog vanjskoj ugradnji u elektroenergetske mreže naponske razine do 24 kV. Iako se standardna tehnička rješenja u praksi temelje na izolaciji papir-ulje, u ovom slučaju se u svrhu povećanja konkurentnosti iskoristila već dobro provjerena varijanta epoksidnog transformatora za unutarnju ugradnju“



Slika 6.8: Epoksidni strujni transformator AKU-24

Tehnički zahtjevi kao i zahtjevi kupaca sve su složeniji tako da tvornica Končar koristi već postojeća i provjerena tehnička rješenja uz naglasak na ekonomski aspekt poslovanja tražeći način na koji će postati konkurentnija na tržištu.

6.2. Uljni strujni mjerni transformator

Uljne SMT-e koristimo pri nazivnim naponima višim od 35 kV, najčešće za vanjsku montažu [1]. Primarni i sekundarni namot (zajedno sa jezgrom) smješteni su u uljnom kotlu međusobno izolirani namotanom papirnom izolacijom. Kao i kod epoksidnih transformatora smanjenje dimenzija i mase postiže se tijesnim priljublivanjem ostatka konstrukcije uz aktivni dio transformatora, u ovom slučaju to su porculanski provodnici i kotao. ST je hermetički zatvoren s ciljem da se dielektrična čvrstoća ulja ne mijenja pri utjecaju vanjske vlage. Promjena volumena ulja (dilatacija koja se javlja pri promjeni temperature) omogućuje se upotrebom metalne ili gumene elastične membrane, time se u transformatoru održava približno konstantni (nepromjenjivi) tlak.

Lončasta izvedba

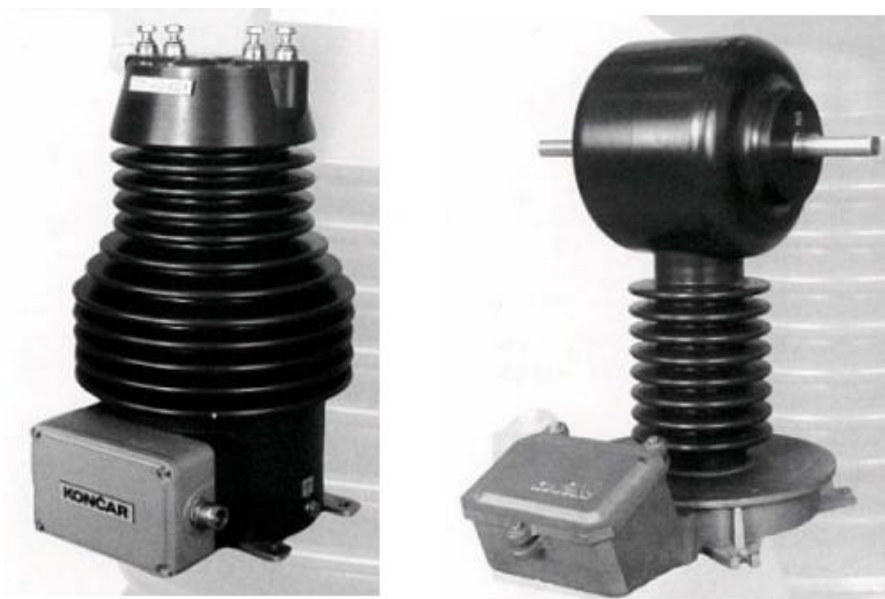
Kod lončaste izvedbe primarni namot (omotan visokonaponskom izolacijom), sekundarni namot i jezgra smješteni su pri dnu transformatora unutar metalnog kotla.

Križno-prstenasta izvedba

Kod križno–prstenaste izvedbe otprilike polovica izolacije omotana je oko primarnog namota, a polovica oko sekundarnog.

Glavasta izvedba

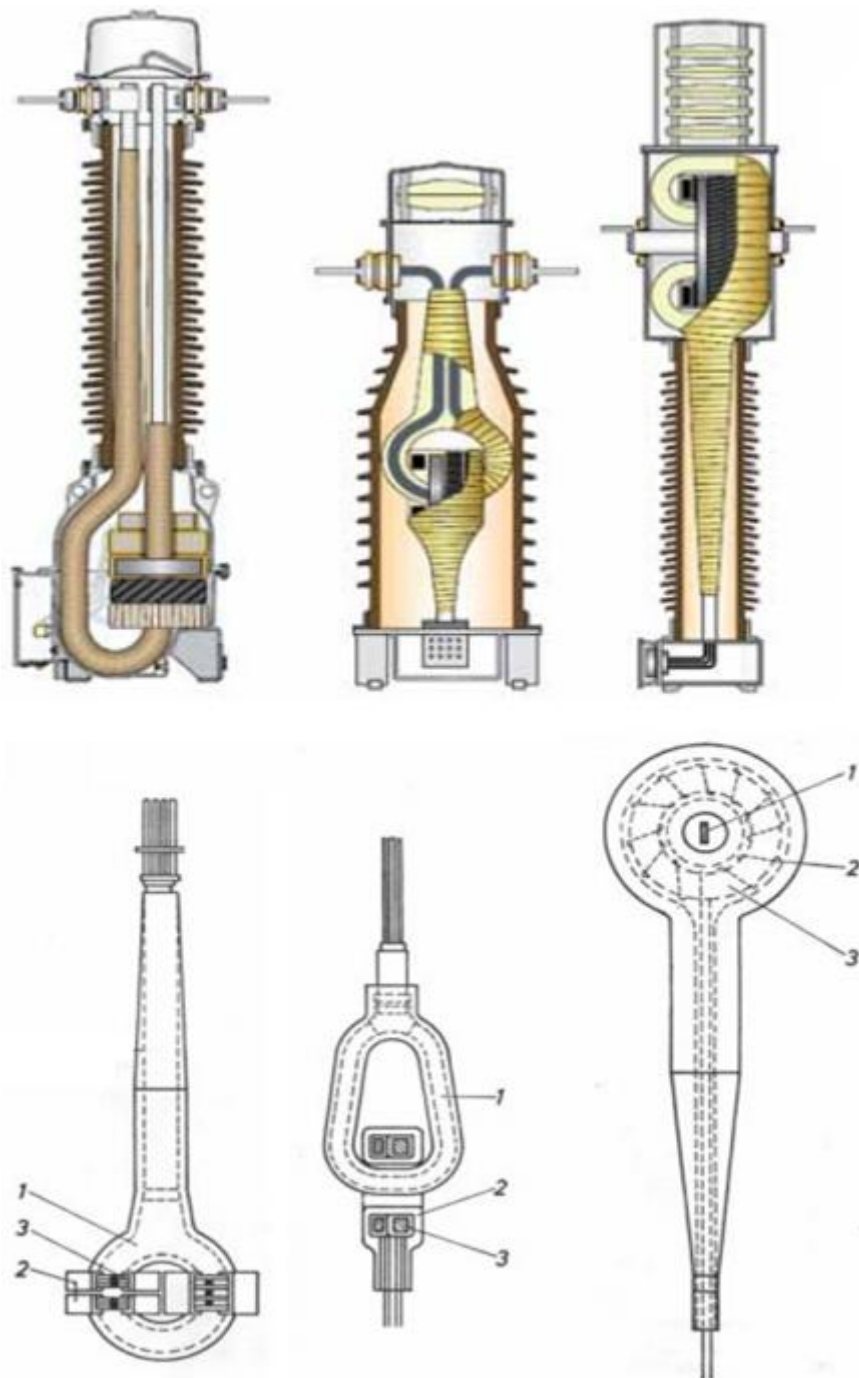
Kod glavastih ST-a sekundarni namot i jezgra zajedno sa primarnim namotom smješteni su u glavi transformatora koja je izolirana cjelokupnom glavnom izolacijom.



Slika 6.9: Lončasta i glavasta izvedba (epoksidni SN transformatori za vanjsku montažu)

Tri osnovne izvedbe uljnih ST-a:

- lončasta (Hair pin tank type), slika lijevo
- križno-prstenasta (Cascade/eye bolt type), slika u sredini
- glavasta (Top core), slika desno



Slika 6.10: Osnovne izvedbe uljnih ST-a

- 1 – namoti primara
- 2 – namoti sekundara
- 3 – jezgra

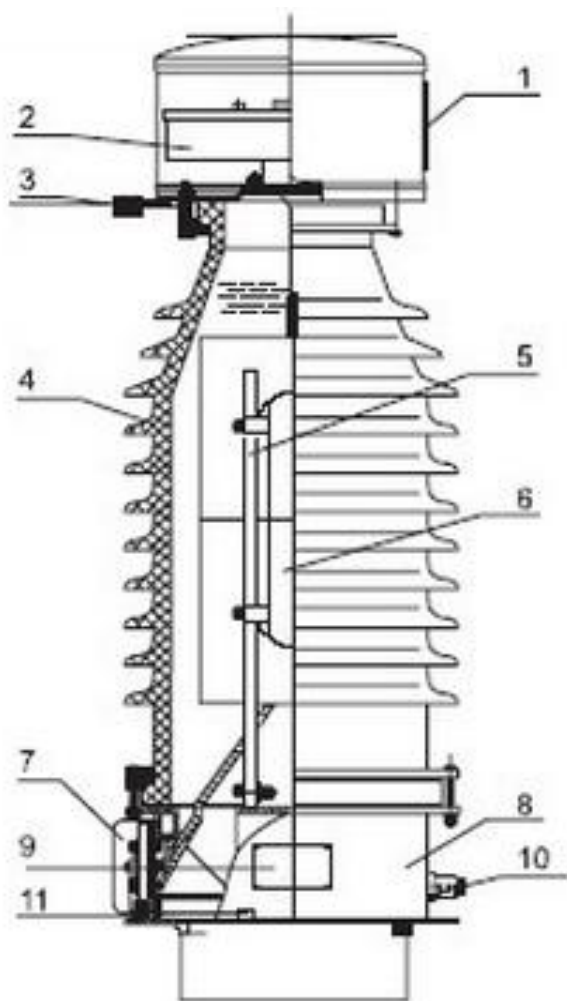
6.2.1. Lončasta izvedba



Slika 6.11: Uljni lončasti SMT nazivnog napona 220kV

- 1 – zaštitna membrana
- 2 – uljna komora
- 3 – porculanski izolator punjen kvarcnim pijeskom
- 4 – primarni vodič (namot)
- 5 – jezgre (sekundarni namoti) smješteni su pri dnu ST-a (npr. jedna mjerna i 4 zaštitne jezgre)
- 6 – priključna kutija
- 7 – sekundarni priključci
- 8 – ekspanzijska posuda
- 9 – indikator razine ulja
- 10 – primarni priključak
- 11 – stezaljke za uzemljenje (u podnožju SMT-a)
- 12 – ventil za nadolijevanje transformatorskog ulja

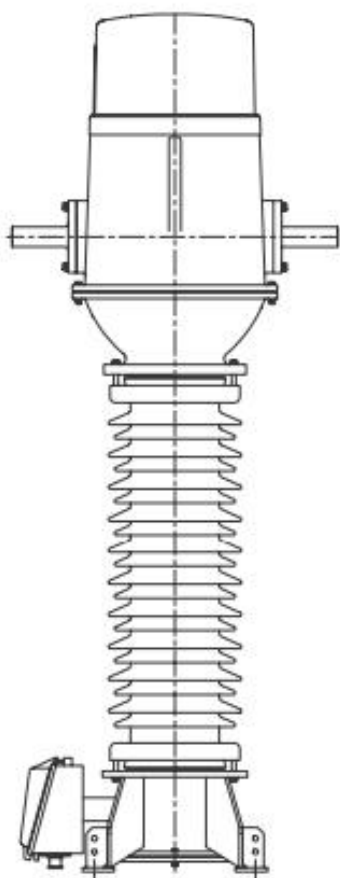
6.2.2. Križno-prstenasta izvedba



Slika 6.12: Uljni križno-prstenasti SMT, tip LB5-66-W

- 1 – indikator razine ulja
- 2 – uljna komora
- 3 – primarne stezaljke
- 4 – porculanska izolacija
- 5 – potporni nosač izolacije
- 6 – namoti
- 7 – kutija sekundarnih priključaka
- 8 – podnožje (baza)
- 9 – natpisna pločica
- 10 – priključak
- 11 – stezaljke za uzemljenje (u podnožju SMT-a)

6.2.3. Glavasta izvedba



Slika 6.13: *Glavasta izvedba ST-a, tip Končar AGU*

Karakteristike Končarevih ST-a tipa AGU:

Um - od 12 do 52 kV

Nazivna primarna struja - do 6000 A

Kratkotrajna termička struja - do 100 kA

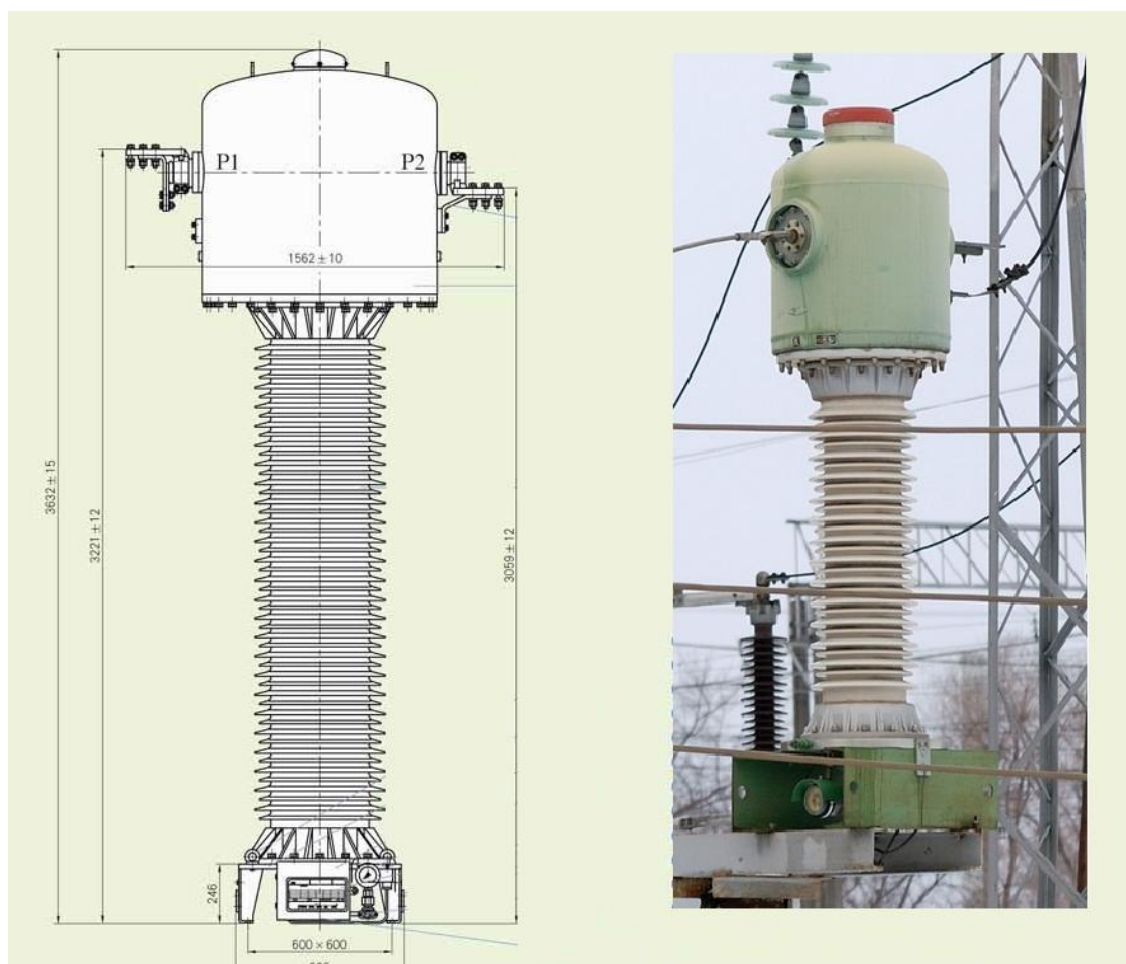
Kratkotrajna dinamička struja - do 250 kA

Broj jezgara - do 6

6.3. Plinom izolirani strujni mjerni transformator

Izvedba ovog tipa ST-a konstruktivno je slična uljnim ST-ima sa razlikom u izolirajućem mediju. Kod ove vrste izvedbe umjesto ulja (ili epoksidne smole) kao glavno izolirajuće sredstvo najčešće se koriste plinovi dušik - N₂ ili sumporni heksafluorid - SF₆ (tj. smjese na bazi tih plinova). Plin SF₆ ne gubi svojstva s vremenom niti pod utjecajem najviših električnih i toplinskih napreznja. Inertan je, netoksičan i nezapaljiv. Posjeduje odlična izolacijska svojstva - zbog izrazite gustoće dielektrična čvrstoća je velika. Pri tlaku od desetak bara plinovi koje upotrebljavamo u izradi ST-a postižu dielektričnu čvrstoću između 35 kV/mm i 90 kV/mm.

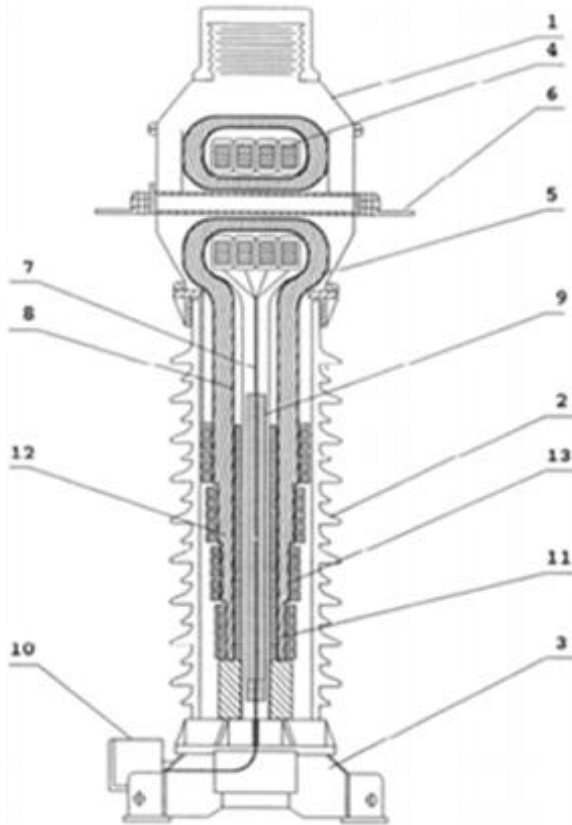
Plin SF₆ koristimo i pri izradama prekidača kada se negativno istječe njegova visoka cijena, naglasak je na tome da se nakon isklapanja prekidača plin ne ispušta u okolinu.



Slika 6.14: SF₆ plinom izolirani ST, tip TGFM-110

6.4. Kombinirani transformator

Zasebnu izvedbu čini kombinacija strujnog i naponskog transformatora u zajedničkom kućištu, tzv. kombinirani mjerni transformator. Postoje razna tehnička rješenja izrade kombiniranih transformatora što ih čini raznolikima i prihvatljivima na tržištu. Zahtjevi s obzirom na točnost postavljaju se posebno za strujni i posebno za naponski transformator.



Slika 6.15: Kombinirani transformator, tip Končar VAU

- 1 – gornje kućište
- 2 – potporni izolator
- 3 – donje kućište
- 4 – sekundarni namot ST-a
- 5 – gornji dio glavne izolacije
- 6 – primarni namot ST-a
- 7 – izvodi sekundarnog namota ST-a
- 8 – noseći tuljac
- 9 – jezgra naponskog transformatora (kratica NT)
- 10 – priključna kutija sa sekundarnim izvodima
- 11 – sekundarni namoti NT-a
- 12 – glavna izolacija (donji dio)
- 13 – primarni namoti NT-a

U gornjem kućištu (1) smještena je jezgra sa sekundarnim namotima ST-a (4), izvodi sekundarnog namota ST-a prolaze kroz potporni izolator (2). U donjem kućištu (3) nalazi se otvorena magnetska jezgra (9) naponskog transformatora te njegovi primarni (13) i sekundarni (11) namoti.

6.4.1. Kombinirani SF₆ plinom izolirani transformator

Kod strujnih transformatora plin SF₆ koristi se kao izolacija između primarnih i sekundarnih namota, dok kod naponskih transformatora s kapacitivnim djelilom dodatno služi kao dielektrik između elektroda visokog napona u djelilu. Vlastitom dielektričnom konstantom utječe na prijenosni omjer kapacitivnog djelila.

Kod naponskih (induktivnih) mjernih transformatora namoti i slojevi namota međusobno su izolirani kombiniranjem plina SF₆ i nekog drugog krutog izolacijskog materijala (npr. polietilenska folija). Izolacija se izvodi slaganjem tankih slojeva folije i plina te se ovim načinom izrade postižu veliki iznosi dielektričnih čvrstoća i do 200 kV/mm.

Kod izolacije načinjene od papira impregniranim uljem postoji negativan utjecaj vanjske vlage što kod ove izvedbe nije slučaj. Također, pri utjecaju manjih količina zraka dielektrična čvrstoća nije narušena.



Slika 6.16: SF₆ plinom izolirani kombinirani transformator

Na slici je prikazan SF₆ plinom izolirani kombinirani transformator (AVG tipa) izrađen u skladu sa svim međunarodnim standardima [14]. Koristimo ga za napone od 72,5 do 300 kV.

Kombinira sve poželjne prednosti i karakteristike samostalnih izvedbi strujnog i naponskog transformatora. Kao i sve ostale izvedbe ST-a posjeduje odlična svojstva pri nastupu kratkoga spoja.

Izvedba je glavasta (konstruktivno slična uljem izoliranom ST-u) sa kućištem izrađenim od aluminija i dodatnom izolacijom od porculana.

Preciznost je stabilna tijekom dugog radnog vijeka. Dizajn je protueksplozivan uporabom sigurnosnog diska. Nema efekta ferorezonancije. Moguć je daljinski nadzor stanja izolacije putem mjerenja gustoće plina.

Ukupna cijena je niža zbog kompaktnog dizajna i male težine. Transformator ne zahtjeva veliki prostor za smještanje podnožja. Također, cijene postavljanja i održavanja su niske.

Iz primjera kombiniranog transformatora vidljive su karakteristike koje se općenito navode kao glavne prednosti kako za naponske tako i za strujne transformatore izolirane plinom SF₆.

Te prednosti su:

- nema efekta starenja
- manja masa i kompaktan dizajn
- nema opasnosti od eksplozije zahvaljujući sigurnosnom disku
- mogućnost promjene dielektričnih svojstava promjenom pritiska plina
- mogućnost stalne daljinske kontrole pritiska plina u pogonu

Izolacijski sustav kao i kućište idealni su za reciklažu i ekološki prihvatljivi. Npr. veliki dio prikazanoga transformatora čini kućište od aluminija koji je jednostavan za reciklažu. Za aluminijsku konzervu trebalo bi oko 500 godina da se prirodnim putem razgradi ali pri recikliranju aluminija energija koja se troši u procesu reciklaže iznosi oko 5% iznosa energije koja se utrošila pri proizvodnji jednake količine aluminija iz prirode.

7. STRUJNA KLIJEŠTA

Strujna kliješta su specijalizirani prijenosni aparat po principu rada vrlo slična provodnom strujnom mjernom transformatoru. Kliješta se otvaraju i zatvaraju oko vodiča protjecanim strujom kako bi se formirala magnetska petlja oko tog vodiča, na taj način kliješta određuju jačinu magnetskog polja oko vodiča i velikom brzinom daju očitavanje većinom u digitalnom obliku na display.



Slika 7.1: Mjerenje strujnim kliještima

Najbitnije svojstvo strujnih kliješta je to da se ona koriste na takav način da strujni krug ostane zatvoren tijekom mjerenja i ne prekida se normalno funkcioniranje postrojenja niti isključenjem određenog dijela postrojenja niti prekidom strujnog kruga. Koristimo ih za mjerenje veličina reda par stotina ampera do max. 5kA. Služe za mjerenja većih struja u pogonima, većinom hidroelektranama i manjim postrojenjima. Karakterizira ih visoka točnost i zadržavanje prikazane vrijednosti na display-u. Kod kvalitetnih izvedbi imamo i opciju pohranjivanja izmjerene vrijednosti za dodatnu analizu i sistematiziranje mjerenja. Promjer čeljusti varira od izvedbe do izvedbe.

Standardna strujna kliješta, osnovna izvedba

Kod standardnih izvedbi strujnih kliješta glavni utjecaj na njihovu izradu je cijena dok je kvaliteta u drugom planu. Bitna je jednostavnost uporabe ali i mogućnost izvedbe sa multimetarskim funkcijama za mjerenje struje, napona i otpora. Većinom je mjerenje digitalno iako postoje izvedbe sa analognim izlazom. Mjerna područja su različita s obzirom na proizvođače. Okvirno se može procijeniti da su prisutna 2 područja, prvo do 500A i drugo do 1kA. Njihova je upotreba učestala i može ih se primijetiti u općoj primjeni za istosmjerna i izmjenična mjerenja. Osim za mjerenje neke od veličina mogu se upotrijebiti za provjeravanje dali je vodič pod naponom [15].



Slika 7.2: Strujna kliješta sa “čeljustima“ na kabele

Vrhunska strujna kliješta, napredna izvedba

Osim mjerenja struje, napona i otpora izvedba uobičajeno ima funkcije mjerenja faktora snage, W, VA, Var, kWh, efektivne vrijednosti, faktora oblika, THD i frekvencije. Možemo izvršiti harmonijsku analizu, a moguće su izvedbe sa naprednim programskim paketima za analizu rezultata mjerenja [15].



Slika 7.3: Vrhunska strujna kliješta

Osjetljiva strujna kliješta

Osjetljiva strujna kliješta koriste se za mjerenje struja manjih iznosa, glavni cilj izvedbe je da budu praktična, malih težina i džepnih veličina. Mjerna područja su otprilike do max. 300-400A uz ostala mjerna područja višekratno umanjena od tog iznosa, npr. za izvedbu kliješta mjernog opsega od max. 300A ostala mjerna područja budu 30mA, 300mA i 30A uz rezoluciju od oko 0,01mA [15].



Slika 7.4: Osjetljiva strujna kliješta

9. TRANSFORMATOR ZA DETEKCIJU STRUJNE NESIMETRIJE FAZA



Slika 8.1: Trofazni SMT

Transformator za detekciju strujne nesimetrije faza u literaturi se naziva kablskim (ili kablovskim) transformatorom. Ovi nazivi nisu često korišteni jer se pri opisu ovakvog tipa transformatora fokusiramo na njegovu namjenu a ne konkretno na vrstu izvedbe.

Kablски transformator također spada među ST-e za srednje napone, mada ne govorimo o klasičnom mjerenju određene veličine. Kablски transformator ovakvog tipa konstrukcijski je izveden kao provodni (obuhvatni) s time što za razliku od klasičnog obuhvatnog transformatora koji se radi za niske napone (obuhvaća samo jednu žilu kabla ili samo jednu sabirnicu) kablски transformator ovoga tipa radi se za srednje napone i obuhvaća sve tri faze. Ako je kabel izveden kao trožilni onda zahvaća cijeli kabel sa žilama svih faza ili može ujedno zahvatiti tri jednožilna kabla.

Na pojedinu fazu u distribucijskim mrežama mogu biti spojena razna jednofazna trošila predstavljajući različite iznose tereta - ne može se računati na potpunu simetriju sustava. Zadatak ovakvog tipa transformatora je otkrivanje strujne nesimetrije faza koja može ukazivati na eventualni zemljospoj. Postavlja se na mjestu na kojem kabel ulazi u SN postrojenje, a sekundar mu je povezan na zemljospojnu zaštitu.

10. NEKONVENCIONALNI STRUJNI MJERNI TRANSFORMATORI

Konvencionalnim mjernim transformatorima nazivamo standardne izvedbe transformatora sa feromagnetskom jezgrom. Uzevši u obzir njihovu trajnost i pouzdanost tehnologija njihove izrade nije se znatno mijenjala stotinjak godina.

Nekonvencionalnim transformatorima (pretvaračima) smatramo izvedbe bez feromagnetske jezgre kao alternativu klasičnim transformatorima. Također, postoje izvedbe sa nestandardnom jezgrom od drugih feritnih materijala (osim željeza) koji imaju bolji odziv na brze promjene mjernih signala. Redovito imaju manje dimenzije i masu. Troškovi izrade su niži, a ugradnja je pojednostavljena.

Razvoj novih tehnologija kao što su elektronički sustavi zaštite, nadzora ili upravljanja elektroenergetskim sustavima uzrokuje potrebu za poboljšanjem postojećih mjernih transformatora ili korištenje modernih pretvarača. Nova tehnologija zahtijeva sve manju ulaznu snagu, paralelno sa time i ugradnja mjernih instrumenata mora biti takva da se mjerene ulazne vrijednosti snižavaju na prikladne razine za rad elektroničkih sklopova. Nekompatibilnost između konvencionalnih transformatora i modernih elektroničkih mjernih instrumenata (te uređaja zaštite) dolazi sve više do izražaja [10].

Strujni pretvarači umjesto izlaza vrijednosti u amperima sada mogu biti reda veličine miliampera.

Uobičajeno su prisutne napredne izvedbe mjernih pretvarača sa integriranim elektroničkim sklopovima u sklopu samog pretvarača. Time se ostvaruje maksimalna kompatibilnost sa digitalnim mjernim uređajima. Prednost nekonvencionalnih izvedbi su razne funkcionalne mogućnosti koje pružaju digitalni uređaji u sustavima mjerne i zaštitne tehnike (npr. razmjena digitalnih mjerenih vrijednosti). Karakteristike mjerenja su unaprijeđene, sigurnost je poboljšana, cijene se smanjuju. Instalacija je jednostavna, kao i održavanje i kalibracija.

Pod najbitnije nekonvencionalne pretvarače ubrajamo transformatore koji koriste:

- Hallovu sondu
- magnetooptički senzor
- svitak Rogowskog [8]

Fizikalne pojave po kojima funkcioniraju ovi pretvarači su Faradejev i Hallov efekt. Među poznatijim zakonitostima koje se primjenjuju nalazi se pravilo desne ruke za Lorentzovu silu te Lenzovo pravilo za inducirani napon [8].

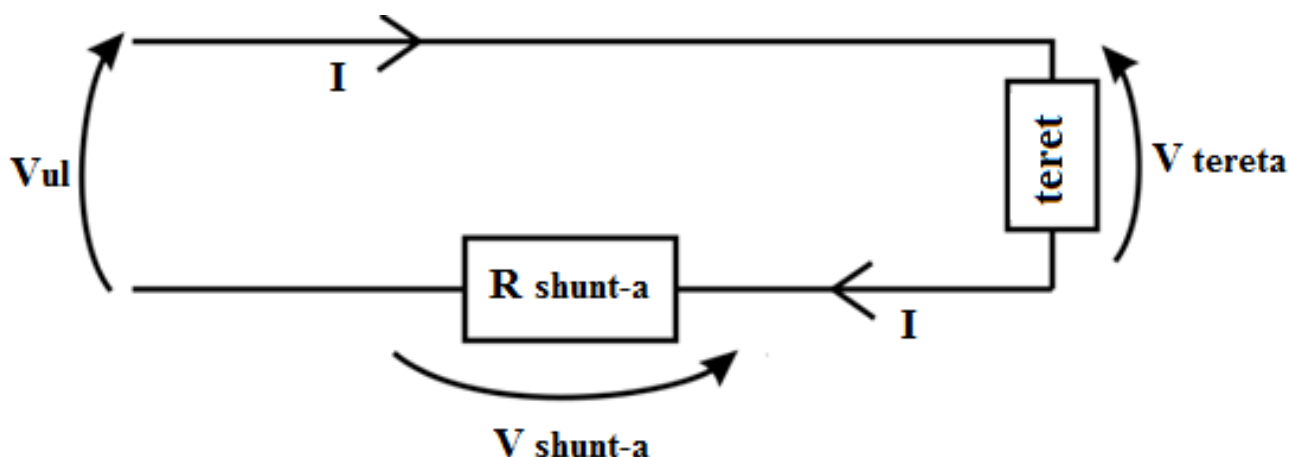
Također, sustavi koji mjere jakost magnetskog polja mogu se upotrijebiti za određivanje vrijednosti struje, jedan od primjera su magnetootpornički senzori:

- AMR senzor ("Anisotropic MagnetoResistance sensor")
- GMR senzor ("Giant MagnetoResistance sensor")

Postoje izvedbe jednostavnog mjerenja struje preko pada napona na otporniku (shuntu). Svaka od spomenutih izvedbi biti će detaljnije opisana u zasebnim poglavljima.

9.1. Mjerenje struje shunt otpornikom

Standardni SMT-i (sa feromagnetskom jezgrom) tijekom kratkog spoja dolaze u stanje zasićenja feromagnetske jezgre zbog istosmjerne komponente struje. Također, cijene klasičnih SMT-a drastično se povećavaju uzevši u obzir povećanje naponske razine na kojima se upotrebljavaju. Kod viših naponskih razina masa i dimenzije SMT-a moraju biti veće, pojavljuje se dodatni utrošak materijala, a izvedba mora biti kompleksnija i kvalitetnija. Suprotno tome, izvedba shunt otpornika je moguća po prihvatljivim cijenama, manjih dimenzija i mase uz mogućnost uporabe pri raznim naponima. Ne upotrebljava se feromagnetska jezgra tako da nema zasićenja željezne jezgre niti efekta ferorezonancije. U širokom spektru frekvencija otpornik je linearan, a nema ni utjecaja susjednih faza pri mjerenju.



Slika 9.1: Mjerenje struje padom napona na otporniku (shuntu)

Shunt otpornik spojen je na jednostavan način. Određivanjem pada napona na otporniku određena je i struja koja stvara pad napona prolaskom kroz otpornik poznatog iznosa. Otpornik je skoro u potpunosti omski (zanemariv iznos reaktancije).

Prilikom mjerenja važan je efektivni iznos struje jer se na otporniku javlja toplinsko opterećenje i gubici. Zbog toga je ova metoda mjerenja nepovoljna za mjerenja vrlo visokih struja. U pravilu toplinsko opterećenje ograničava mjerljiv iznos struje otprilike na maksimalnih 200A. Za struje u dopuštenom rasponu toplinski gubici su unutar podnošljivih granica. Ako bi se mjerile struje iznosa preko 200A trebalo bi se koristiti veći otpornik.

Mjerne komponente izložene su istom naponu kao i otpornik. Shodno tome, mjerenje shunt otpornikom u praksi vrši se na naponskim razinama do 30kV [12]. Mjerenje napona jednostavnije je nego mjerenje struje zbog velikog udjela harmoničkih članova i stalne promjene opterećenja.

Kvaliteta mjerenja shunt otpornikom ovisi o vrsti materijala od kojeg je izrađen otpornik (što uvjetuje vrstu izvedbe) i temperaturnim koeficijentom otpornika. Ne može se zanemariti utjecaj parazitnog kapaciteta pri visokim frekvencijama. Pri malim faktorima snage stvara se paraziti inuktivitet reda veličine par nH koji uvelike utječe na točnost mjerenja.

9.2. Zavojnica Rogowskog

Svitak (zavojnica) Rogowskog je sastavni dio elektrotehničkog uređaja za mjerenje izmjenične struje (ili strujnih impulsa). Zajedno sa primarnim vodičem stvara zračni transformator. Spiralno namotana zavojnica omotana je oko krutog materijala torusnog oblika (većinom plastična ili gumena cijev) tako da se početak jednog namota nalazi sa iste strane torusa kao i njegov kraj. Svitkom obuhvaćamo ravni vodič protjecan strujom koju želimo izmjeriti. Za razliku od konvencionalnih transformatora ovakva vrsta izvedbe ne zahtijeva uporabu željezne jezgre. Princip rada svitka usavršio je Walter Rogowski i po njemu je svitak dobio ime.



Slika 9.2: Razne izvedbe svitka Rogowskog

Torusna jezgra dopušta prolazak vodiča kroz nju. Taj vodič može biti obuhvaćen fleksibilnom zavojnicom koja ima otvorene krajeve tako da se ne utječe na vodič prilikom mjerenja. Drugi primjer je izvedba svitka kao dvije krute zasebno namotane polovice sa preciznim sistemom zaključavanja.

Svitak Rogowskog nema željeznu jezgru koja bi eventualno došla u zasićenje stoga je vrhunski linearan čak i kada je podvrgnut vrlo visokim iznosima struje. Zbog svojstva linearnosti primjenu nalazi u sustavima za prijenos električne energije i u nadzoru struje kod preciznih aparata za varenje ili pećima za taljenje. Svitci se koriste u svrhu ispitivanja kratkog spoja električnih generatora te kao senzori u sustavima za zaštitu električnih postrojenja. Zbog njihove visoke linearnosti mogu se koristiti za određivanje harmoničkog sastava struje (mjerenje nesinusnih valnih oblika s višim harmoničkim sastavom).

Kod mjerenja struja većih iznosa konvencionalni STM-i zahtijevaju povećanje broja sekundarnih namota da bi se održao konstantni iznos struje. Zbog toga je standardni SMT većih dimenzija od ekvivalentnog svitka Rogowskog. Cijene izrade svitaka su niže, a rizik od otvaranja priključaka sekundarnog namota ne postoji. Zbog niske indukcije sklop može reagirati na brze izmjene struje u rasponu nanosekundi.

Prema Lenzovom pravilu elektromagnetske indukcije magnetski tok inducirane struje uvijek je suprotan izvornome magnetskom toku. Smjer induciranoga napona i njime izazvane struje u strujnoj petlji je takav da poništava promjenu prvobitnog magnetskog toka kojim je napon induciran.

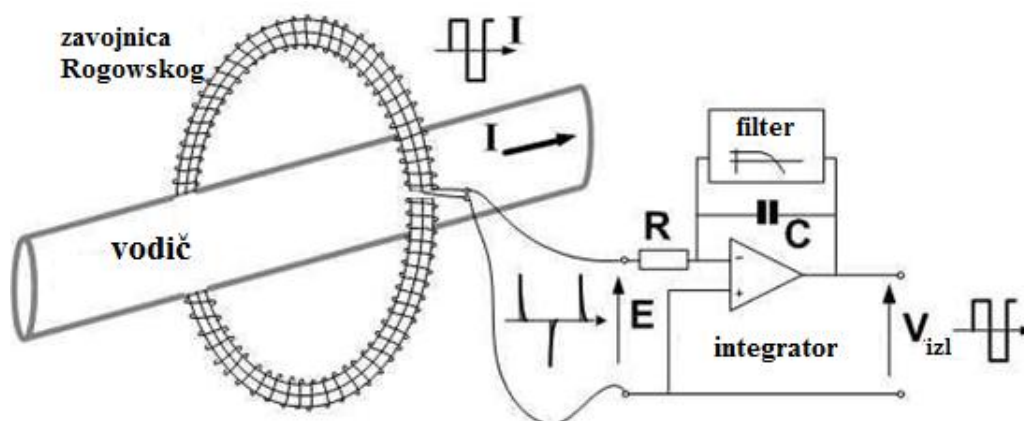
$$e = -N \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (9.1)$$

e - ukupni inducirani napon u svitku

N - broj namota

$d\phi(t)$ - promjena toka ϕ unutar jednog namota

dt - promjena vremena



Slika 9.3: Mjerenje svitkom Rogowskog

Svitak Rogowskog izveden je u obliku torusa bez magnetske jezgre. Promjena struje koja prolazi kroz primarni vodič (smješten kroz šupljinu torusa) uzrokuje promjenu magnetskog polja unutar samoga svitka. Mjerena struja pretvara se u naponski signal koji se integrira tako da bude proporcionalan struji kroz primarni vodič.

$$v(t) = \frac{-AN\mu_0}{l} \frac{dI(t)}{dt} \quad (9.2)$$

$A = \pi r^2$ - površina presjeka (za jednu od manjih petlji)

N - broj jednoliko raspoređenih zavoja

$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \left[\frac{Vs}{Am} \right]$ - magnetska konstanta

$l = 2R\pi$ - duljina torusa

I - primarna struja obuhvaćena svitkom

$\frac{dI(t)}{dt}$ - promjena struje kroz svitak

Ovi pretvarači ponekada se nazivaju i di/dt pretvaračima zbog člana $dI(t)/dt$ u formuli za napon.

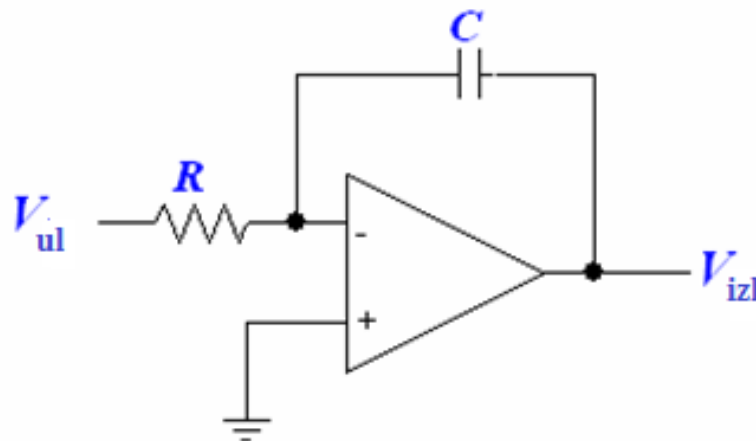
Svitak se sastoji od N broja jednoliko raspoređenih namota. Kvaliteta svitka kao pretvarača ovisi o stalnosti gustoće zavoja N po jedinici duljine tijela. Izvedbom sa zavojima namotanim na kruti neelastični materijal izbjegavamo savijanje svitka. Time smanjujemo odstupanje zavoja od idealnog položaja. Položaj bi trebao biti takav da stalna površina i namoti budu okomiti na zamišljeni centralni prolaz torusne linije.



Slika 9.4: Torus presječen ravninom

Preraspodjela toka je nejednolika na različitim udaljenostima od vodiča. Zbog toga je važna pravilna geometrija sonde (time i vrsta materijala od kojeg je izrađena jezgra) uz utjecaj frekvencije. Gustoća i čvrstoća namota te promjer zavojnice bitni su za održavanje imuniteta na vanjska polja, kao i za održavanje niske osjetljivosti na pozicioniranje mjernog provodnika. Aproksimacijom presjeka torusne jezgre kao pravokutnog presjeka mogle bi se prikazati pojednostavljene jednadžbe svitka. Dobiveni inducirani napon na izlazu iz sonde derivacija je mjerene struje (magnetskog toka koji je ulančan u svitku) što znači da je napon induciran u zavojnici proporcionalan promjeni struje u ravnom vodiču.

Da bi prikaz mjerene veličine bio realan na izlaz sonde postavlja se aktivni integrator sa operacijskim pojačalom. Pomoću njega napon na izlazu sonde integrira se tako da bude proporcionalan struji kroz primarni vodič.



Slika 9.5: Sklop integratora

Ako je struja nesinusnog valnog oblika napon je potrebno integrirati po formuli:

$$V_{out} = \int v dt = \frac{-AN\mu_0}{l} I(t) + C_{integracije} \quad (9.3)$$

Elektronički integrator (u krugu izlaza iz svitka) pruža izlazni signal proporcionalan struji. Signalni procesori sa ugrađenim analogno/digitalnim pretvaračem pružaju mogućnost digitalne obrade signala čime svitak Rogowskog postaje upotrebljiv u brojljima kako u kućanstvima tako i u industriji.

PREDNOSTI:

- Niska cijena
- Krajnje jednostavna izvedba
- Male dimenzije i masa
- Jednostavna ugradnja i primjena
- Savitljivost i rastezljivost
- Bez potrebe održavanja
- Mogućnost dobre izolacije (galvanska izolacija izlaza)
- Niska potrošnja uz niski temperaturni pomak i temperaturnu neovisnost
- Mogućnost prijenosa mjernog instrumenta sa svitkom
- Mjerenje uz različite frekvencije (frekvencijski raspon od 10Hz do 1MHz)
- Raspon iznosa mjerenih struji od 10A do reda MA (većinom za velike iznose)
- Linearnost u vrlo širokom rasponu amplitude 0,1kA do 100kA
- Pogodnost mjerenja velikih udarnih i tranzijentnih struja

NEDOSTATCI:

- Mjerenje samo izmjenične struje (zavojnica nema odziva za DC)

Većina komercijalnih senzora koriste baterije za napajanje elektroničkih dijelova dok tradicionalni (konvencionalni) transformatori ne zahtijevaju krug integratora. Iako ni oni nemaju odziv na DC njima se mogu mjeriti vrlo sporo mijenjajuće struje sa frekvencijom komponenti 1Hz ili niže.

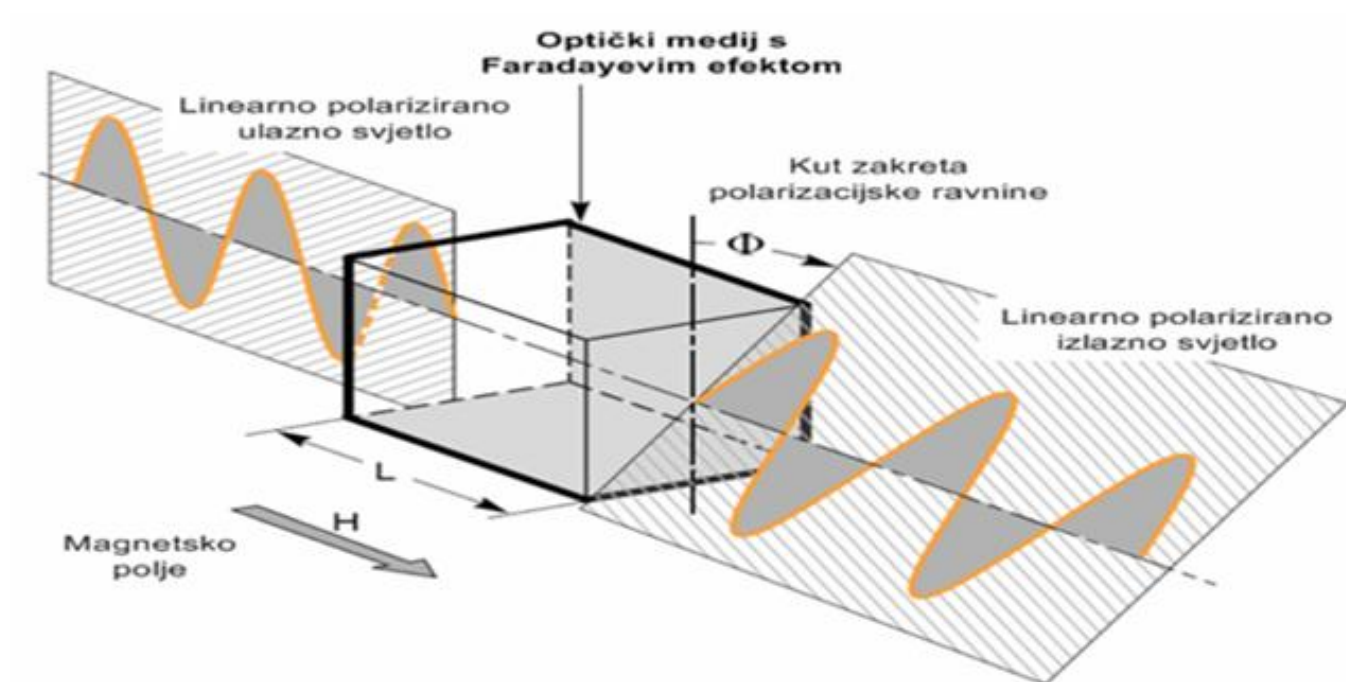
- Potreba za korištenjem integratora

Izlazni signal iz zavojnice treba biti obrađen integratorom da bi dobio svoj prepoznatljiv oblik strujnog vala. Krug integratora zahtijeva zaseban izvor (uobičajeno između 3 do 24V DC).

9.3. Magnetooptički pretvarač

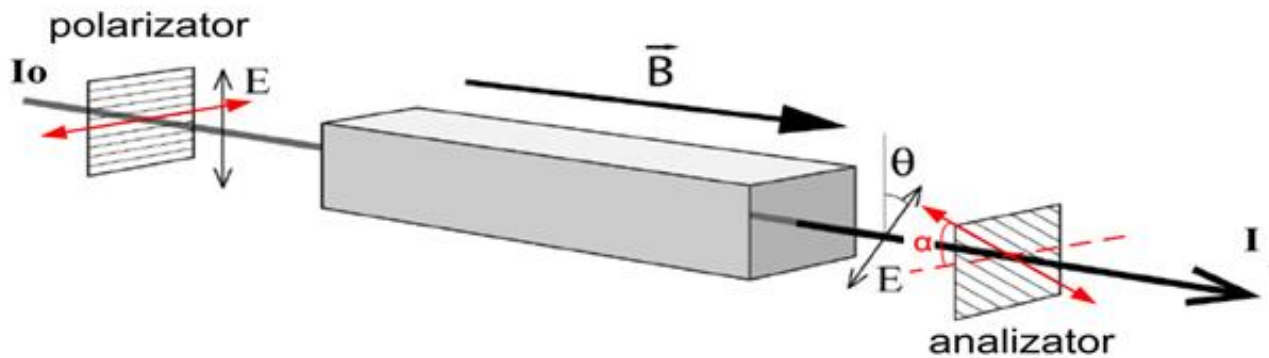
Polarizirana svjetlost je vrsta svjetlosti kod koje elektromagnetski valovi titraju samo u jednoj ravnini. Pri prolasku polarizirane svjetlosti kroz magnetsko polje stvara se zakret kuta polarizacije svjetlosti. Strujni optički mjerni pretvarač bazira se na tom efektu poznatom kao magnetooptički efekt (Faradejev efekt, učinak).

Općenito, Faradejev efekt se definira kao pojava magnetske rotacije polarizirane svjetlosti kroz neko sredstvo. Polarizirana svjetlost usmjerena je usporedno sa magnetskim poljem. U slučaju magnetooptičkog elementa za mjerenje većinom se radi o staklu ili optičkoj niti.



Slika 9.6: Faradejev magnetooptički efekt

Pri utjecaju vanjskog magnetskog polja dolazi do zakretanja ravnine polarizacije, a sam kut ovisi o iznosu magnetskog polja. Ostali faktori koji nisu direktno vezani za mjerenje nego postoje kao utjecajni parametri su frekvencija svjetlosti, duljina puta kojeg prelazi svjetlost, utjecaj temperature [16].



Slika 9.7: Magnetooptički princip rada pretvarača

- I_0 – intenzitet ulazne zrake
- I – intenzitet izlazne zrake
- E – ravnina polarizacije
- B – magnetsko polje
- α – kut između polarizatora i analizatora
- Φ – kut zakretanja

U kristal dovodimo svjetlost svjetlovodnim kabelom kroz polarizator. Na izlazu je elektronički uređaj koji služi za mjerenje promjene intenziteta svjetlosti. Svjetlovodnim kabelom odvodimo svjetlost kroz analizator da bi ju mogli proslijediti do elektroničkog uređaja za mjerenje. Pod djelovanjem magnetskog polja dobija se zakretanje ravnine polarizirane svjetlosti. Taj zakret kao promjena kuta povezan je sa promjenom intenziteta svjetlosti struje I pri njenom prolazu kroz optički kabel [16].

U optičkom mediju ravnina polarizacije zakretati će se proporcionalno jakosti magnetskog polja po formuli [17]:

$$\Phi = V \int H dl \quad (9.4)$$

- Φ – kut zakreta
- l – efektivna duljina optičkog materijala u smjeru zrake
- H – jakost magnetskog polja u smjeru zrake
- V (ili C) – Verdetova konstanta optičkog medija (materijala kroz koji prolazi svjetlost)

Kut zakretanja zrake α iznosi:

$$\alpha = l \cdot H \cdot V \quad (9.5)$$

Preko kuta α mjeri se intenzitet izlazne zrake ovisno o kutu zakreta Φ

- l – efektivna duljina optičkog materijala u smjeru zrake
- H – jakost magnetskog polja u smjeru zrake
- V (ili C) – Verdetova konstanta optičkog medija
 - specifična rotacija [o/Tm] tj. [$T^{-1}m^{-1}$]
 - ovisi o temperaturi i valnoj duljini

Verdetova konstanta

$$V = V' \cdot \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad (9.6)$$

λ – valna dužina svjetlosti

n – koeficijent loma

$\frac{dn}{d\lambda}$ – disperzija (omjer koeficijenta loma i valne dužine svjetlosti)

$$V' = -\frac{e}{2 \cdot c \cdot m_e} \quad (9.7)$$

e – osnovni naboj

c – brzina svjetlosti

m_e – masa elektrona

Konačno, promjena jakosti svjetlosti I_{izl} određuje se pomoću analizatora.

Izlazna struja računa se pomoću kuteva α i Φ .

α – kut zakretanja polarizacijske ravnine uslijed djelovanja magnetskog polja.

Φ – kut zakreta polarizacijske ravnine analizatora u odnosu na polarizacijsku ravninu polarizatora.

Kut Φ zakreće se suprotno od smjera zakretanja polarizacijske ravnine koju stvara magnetsko polje. Jednostavno rečeno, kut Φ je kut između polarizacijskih ravnina polarizatora i analizatora.

$$I_{izl} = I_{ul} \cdot \cos^2(\Phi - \alpha) \quad (9.8)$$

I_{iz} – intenzitet svjetlosti nakon prolaska kroz analizator

I_{ul} – početni intenzitet svjetlosti nakon prolaska kroz polarizator

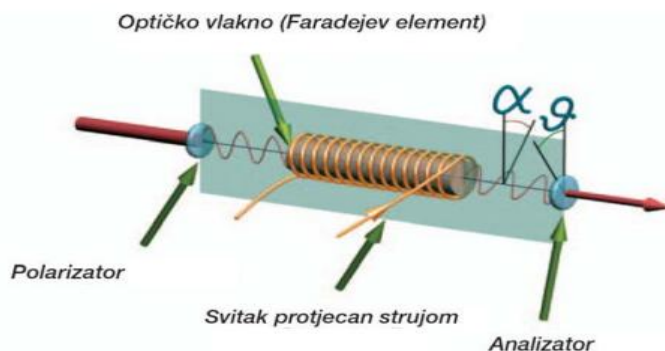
α – kut zakreta polarizacijske ravnine zbog djelovanja polja

Φ – kut zakreta polarizacijske ravnine analizatora prema polarizacijskoj ravnini polarizatora

Ovaj zakon je poznat kao Malusov zakon koji intenzitet upadne polarizirane svjetlosti dobivene s pomoću polarizatora povezuje sa intenzitetom svjetlosti propuštene kroz analizator.

Obilježje koje krasi optičke strujne mjerne pretvarače (nekonvencionalne transformatore) je linearnost koju postizemo različitim izvedbama pogodnim za uporabu u određenim situacijama. Najčešće izvedbe biti će u kratko opisane.

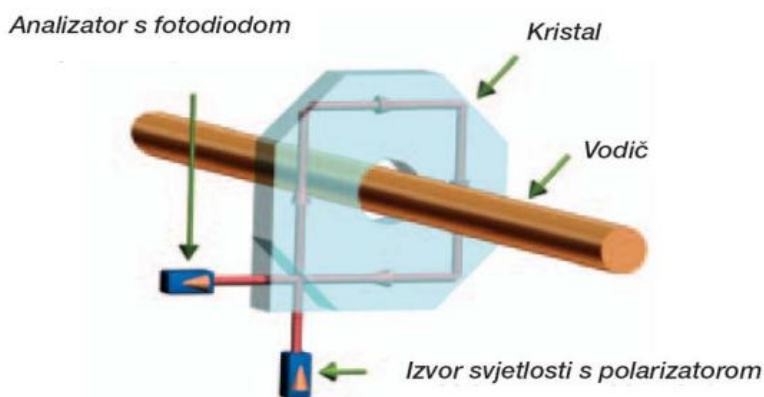
Izvedbe magnetooptičkog pretvarača



Slika 9.8: Izvedba sa optičkim vlaknom

Struja koja teče kroz namot može biti izmjerena posredno preko mjerenja jakosti svjetlosne zrake i određivanja jakosti polja H . Kod konfiguracije sa optičkim vlaknom nema gubitaka niti zasićenja jezgre, ne postoji opasnost od eksplozije. Sekundarni krug (svjetlovod) je visokonaponski izoliran. Konstrukcija transformatora je lagana i kompaktna, bez upotrebe izolacijskih plinova ili ulja. Transformator ne pada pod utjecaj elektromagnetskih smetnji (EMF), vrlo je visoke preciznosti pri mjerenjima struje raspona između 1A i 10kA, uz široki spektralni pojas [16].

Nedostatak ovih transformatora je visoka cijena ako ju usporedimo sa cijenama klasičnih strujnih transformatora. Preciznije se možemo izraziti pojmom *relativno visoke cijene* zbog kvalitete i napredne tehnike korištene u izradi nekonvencionalnih transformatora. Sam element mora se uklapati u cijeli sistem čiji postaje dio tako da se ova tehnologija koristi samo u novim postrojenjima. Također, potrebna ja posebna priključna oprema za ovaj tip transformatora.



Slika 9.10: Izvedba sa optičkim kristalom

Ravnine polarizatora i analizatora međusobno su zakrenute za 45° . Time usmjeravamo zraku svjetlosti u kristalu mjernog uređaja pomoću totalne refleksije. Česta praktična izvedba ovog tipa je kao prsten kojim se navodi zraka svjetlosti tako da obiđe udaljenost oko vodiča u najmanjoj mogućoj udaljenosti [16].

Izvedbom sa optičkim kristalom smanjuje se geometrijsko odstupanje koje nastaje zbog utjecaja termičkih rastezanja, vibracija i sličnih utjecajnih faktora. Znatno se umanjuje utjecaj susjednih vodiča, a mjerenje nije ovisno o položaju vodiča.

9.4. Mjerila potrošnje električne energije

Na prvo mjesto uporabe kod mjerenja potrošnje električne energije stavljaju se razni tipovi magnetometara. Magnetometri su uređaji za mjerenje magnetskog polja. Za potrebe analize zanimljivi su moderni magnetometri iz zasebne skupine koje zovemo vektor-magnetometri [16]. Takvi magnetometri mjere samo komponentu magnetskog polja paralelnoj s mjernom osi instrumenta. U toj skupini imamo **Hallovu sondu i magnetootpornički instrument**.

U klasičnom indukcijskom brojilu primijenjen je najjednostavniji princip rada; pokretna pločica pod utjecajem je magnetskog polja koje ju zakreće i po poznatim formulama može se dovesti u korelaciju broj okretaja pločice indukcijskog motora sa utrošenom električnom energijom te prikazati stanje na mehaničkom brojaču.

Moderna elektronička brojila koriste elektroničke sklopove za množenje napona i struje te za integraciju. Logičkim modulima izvršava se množenje struje i napona te se konačno množi sa vremenom koje je proteklo. Takav proračun predstavlja iznos preuzete energije.

U smislu transformacije jednog oblika u drugi zanimljivo je netipično mjerenje iznosa struje. Iako se ne radi o klasičnom direktnom mjerenju na sekundaru i klasičnoj transformaciji *primar-indukcija jezgre-sekundar* svejedno je riječ o transformaciji jednog oblika energije u drugi. Stoga Hallovu sondu i magnetootporničke instrumente svrstavamo pod nekonvencionalne transformatore (pretvarače) – tehnologiju koja će s vremenom uvelike istisnuti uporabu klasičnih SMT-a.

Kod modernih mjerila potrošnje električne energije najčešće je u uporabi Hallov osjetnik napona u kojem je inducirani napon razmjernan struji opterećenja. Korak sa tom tehnologijom prati i zaslon sa tekućim kristalima (LCD) za prikaz preuzete električne energije. Na polju modernih elektroničkih brojila klasični SMT-i postaju sve rjeđi kao i uporaba osjetljivog shunt otpornika.

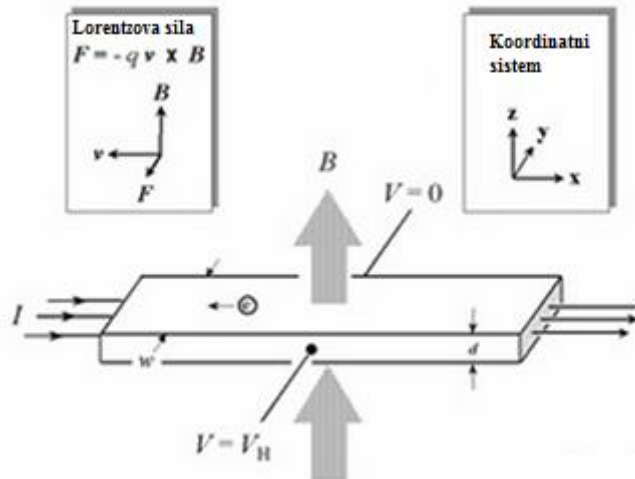


Slika 9.11: Moderno mjerilo sa LCD prikazom

9.5. Hallova sonda

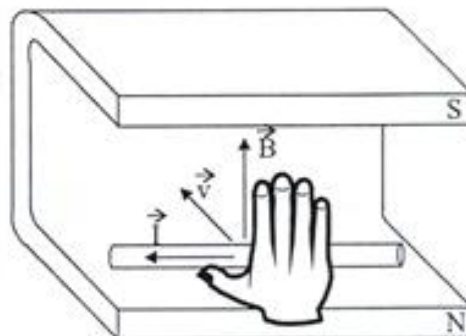
Hallova sonda funkcionira na temelju Lorentzovog pravila za silu koja djeluje na električni naboj q . Naboj q giba se brzinom v unutar magnetskog polja indukcije B . Ako promatramo Lorentzovu silu čisto kao magnetsku može se prikazati formulom [16]:

$F = q (v \times B)$ ili $F = - q (v \times B)$; ovisno dali promatramo pozitivni ili negativni naboj



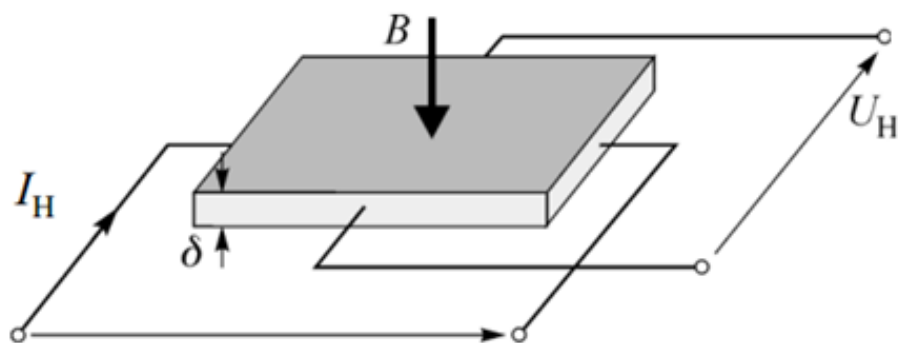
Slika 9.12: Lorentzovo pravilo za silu

Orijentacija sile određuje se pravilom desne ruke:



Slika 9.13: Pravilo desne ruke

Postavimo desni dlan tako da prsti pokazuju smjer i orijentaciju silnica magnetskog polja, palcem pokazujemo smjer struje i tada sila ima orijentaciju od dlana. Ako naboj uzmemo kao negativan onda će sila imati suprotan smjer uz jednaki intenzitet.



Slika 9.14: Vodljiva pločica Hallove sonde

Vodič je protjecan električnom strujom, ta struja veličine I protječe kroz vodljivu pločicu debljine δ koja je pod utjecajem magnetskog polja B i okomito izložena magnetskim silnicama. Magnetsko polje je okomito na smjer struje I , utječe na nositelje naboja unutar pločice prema Lorentzovom pravilu. Lorentzova sila magnetskog tipa djeluje na naboje. Okomita je na smjer magnetskog polja i struje. Kao rezultat naboji se nakupljaju na jednoj strani pločice do te mjere da nakupljanje naboja stvara napon kojeg je moguće izmjeriti na poprečnim krajevima. Magnetske indukcije transformira se u mjerljiv napon koji je rezultat sile magnetskog polja na naboje u gibanju.

Napon mjeren na y (poprečnoj) osi jednak je integralu električnog polja duž y osi. Ako duž x osi pustimo konstantnu struju Hallov napon možemo prikazati formulom:

$$U_H = R_H \cdot \frac{BI_H}{\delta} \quad (9.9)$$

δ (ili d) – debljina pločice

R_H – Hallova konstanta koja ovisi o materijalu od kojeg je pločica napravljena (silicij-indij-antimon, indij-arsen...itd.)

Hallova konstanta vezana je za pokretljivost nosioca naboja i njihovu koncentraciju u poluvodičima (ili metalima). Metali imaju veliku koncentraciju nosioca naboja i malu pokretljivost naboja – zato je Hallov efekt slabiji. Poluvodiči imaju veliku pokretljivost naboja sa nižom koncentracijom nosioca naboja. Zbog toga je Hallov efekt u poluvodičima vrlo izražen i pogodan za mjerenje. Uz pojavu naglog razvoja poluvodiča došlo je do detaljnijeg proučavanja Hallovog efekta.

Hallov napon može se izraziti preko elementarnog naboja q i gustoće pokretnih nositelja naboja:

$$V_H = \frac{I \cdot B}{n \cdot q \cdot d} \quad (9.10)$$

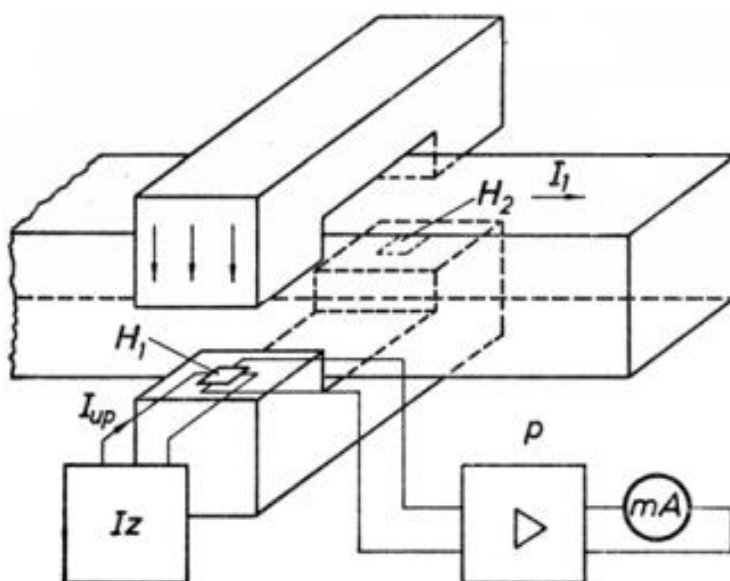
I – jakost električne struje kojom je pločica protjecana

B – jakost magnetskog polja u kojem je smještena pločica

q – elementarni naboj

n – gustoća pokretnih nositelja naboja

d (ili δ) – debljina pločice



Slika 9.15: Mjerenje struje Hallovom sondom

Kroz prozor željezne jezgre položen je vodič protjecan strujom I_1 koju se želi izmjeriti. U zračnom rasporu jezgre može se nalaziti jedna ili više Hallovih sondi, H_1, H_2, \dots itd. Hallov napon razmjernan je struji uz konstantnu upravljачku struju I_{up} .

$$U_H = R_H \cdot \frac{BI_H}{\delta} \quad (9.11)$$

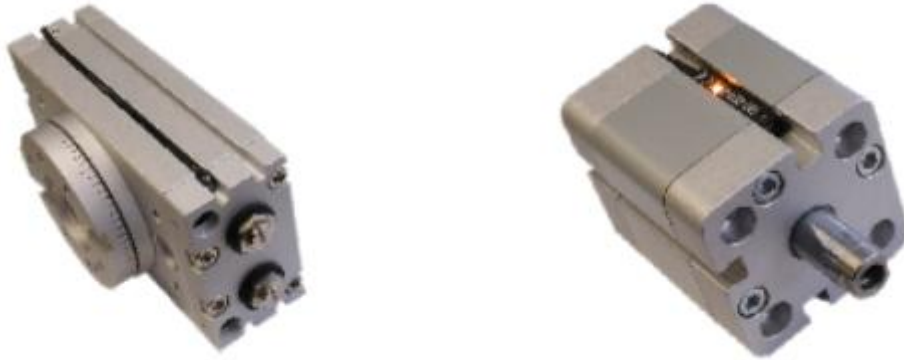
Polazeći od osnovne formule za Hallov napon uočava se direktna povezanost iznosa Hallovog napona u proporcionalnom odnosu sa jačinom magnetskog polja B stvorenog protjecajnom strujom. To je ustvari struja koju želimo izmjeriti.

Hallova sonda pogodna je za mjerenje istosmjernih struji max. do iznosa oko 100kA uz pogrešku u mjerenju od $\pm 10^{-3}$. Zbog dobre linearnosti Hallovog pretvornika granice pogrešaka ne prelaze 1%. Kod mjerenje izmjeničnih struja nije dovoljan samostalni sklop sonde nego i dodatni elektronički sklopovi za pretvorbu u digitalne oblike signala te za daljnju obradu.

Primjeri korištenja Hallovog senzora van područja mjerenja potrošnje električne energije su trenutno očitavanje aplikacija, detekcija printera u nedostatku papira te provjere dali je otvoren poklopac printera. Također, primjenu nalazi u mnogim principima mehatroničkih sustava u kojima ne postoji direktna mehanička poveznica, npr. u autima za mjerenje brzine ili okretaja motora. Tada dolazi do izražaja svojstvo da pri mjerenju nema direktnog kontakta Hallove sonde sa radnim dijelovima, što znači da nema ni habanja (trošenja) te se sklop ne mora gotovo nikada mijenjati niti podmazivati.

9.6. Magnetoopornički senzori magnetskog polja

Magnetoopornički senzori su jedna od mogućih izvedbi senzora za mjerenje jakosti magnetskog polja. Mjerenjem jakosti magnetskog polja indirektno smo izmjerili vrijednost struje. Osim za posredno mjerenje struje magnetoopornički senzori koriste se u elektroničkim kompasima, kod mjerenja broja okretaja...isl. [18]



Slika 9.16: *Senzori magnetskog polja*

Magnetooporničke senzore dijelimo u dvije grupe:

- AMR senzori - "Anisotropic MagnetoResistance sensors"
- GMR senzori - "Giant MagnetoResistance sensors"

9.6.1. AMR senzor

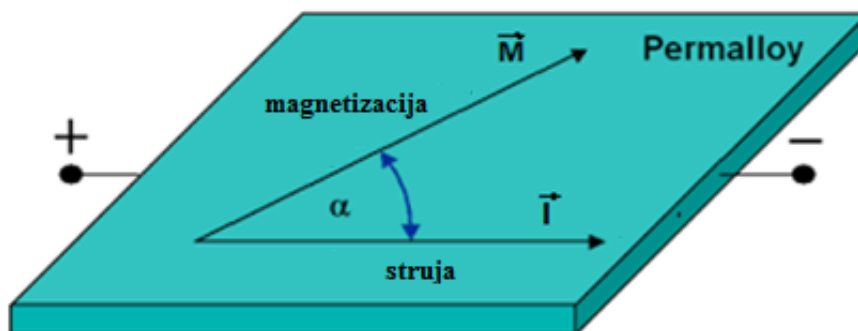
Teorija AMR magnetooporničkih senzora bazira se na kompleksnim feromagnetskim procesima unutar tankog lima većinom izrađenog od legure poznate kao "permalloy". Permalloy je meka magnetna legura (80% Ni, 20% Fe) koja pokazuje svojstvo značajne promjene otpora pri utjecaju magnetskog polja. Pojavu promjene otpora pri utjecaju vanjskog magnetskog polja nazivamo magnetoopornički efekt [18].



Slika 9.17: *Traka od permalloy legure*

Fizička svojstva materijala mogu biti izotropna i anizotropna. Izotropna svojstva su ona koja ne ovise o smjeru jer su skalarno određena brojičanom vrijednošću: masa, gustoća, talište..itd. Anizotropna svojstva su vektorski određena, veličinom i smjerom. Npr. uska staklena pločica zakrivljena pod pritiskom ima promjenjivi indeks loma svjetlosti s obzirom na smjer.

Jedno od vektorski određenih anizotropnih svojstava je magnetizam (sa različitim varijacijama vrijednosti u određenim smjerovima). Kod materijala kao permalloy tanki limovi se valjaju u hladnom ili toplom stanju te im magnetska svojstva postaju gotovo potpuno uniaksijalno (jednosmjerno, u smjeru osi) anizotropna pri nanošenju na silicij (supstrat).



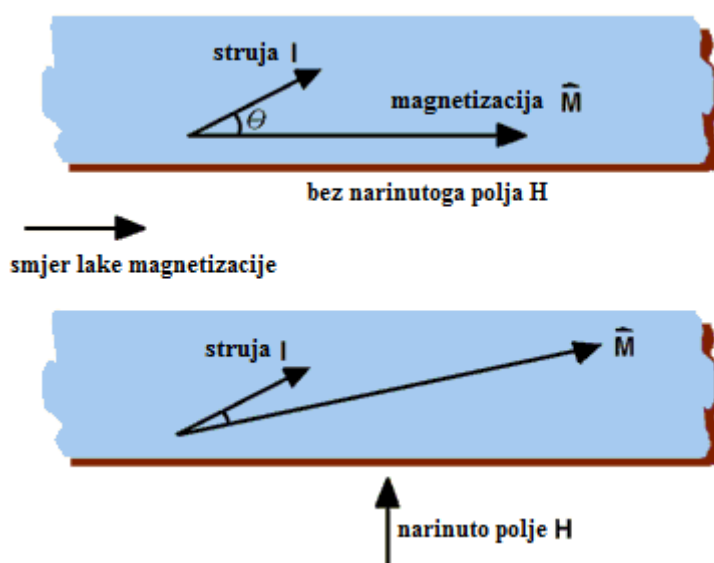
Slika 9.18: Kut između smjera struje i vektora magnetizacije

\vec{M} – vektor magnetizacije

\vec{I} – smjer struje (kut 0° , pokazano kao "x" os)

α – kut između smjera struje i vektora magnetizacije

Električna otpornost je ovisna o promatranom kutu između smjera električne struje i smjera magnetizacije (postoje magnetootporničke varijacije između ta dva kuta).



Slika 9.19: Pomicanje kuta magnetizacije prilikom narinutog vanjskog magnetskog polja H

Vanjsko magnetsko polje narinuto je okomito na smjer toka struje, dolazi do rotacije vektora magnetizacije. Otpor se mijenja uslijed pokušaja da se vektor magnetizacije postavi u smjeru vanjskog narinutoga magnetskog polja.

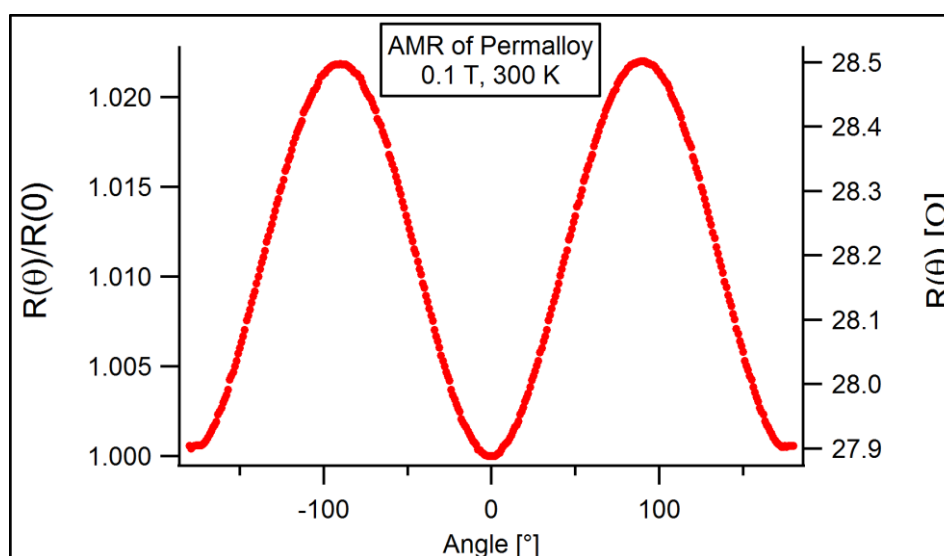
Ovisno o jačini magnetskog polja i kutu između vektora magnetizacije i smjera struje mijenja se otpor po formuli:

$$R(\alpha) = R_0 + \Delta R_0 \cos^2 \alpha \quad (9.12)$$

R_0 - otpor pri $\alpha = 90^\circ$

ΔR_0 - oko 2-3% od vrijednosti R_0 (za permalloy)

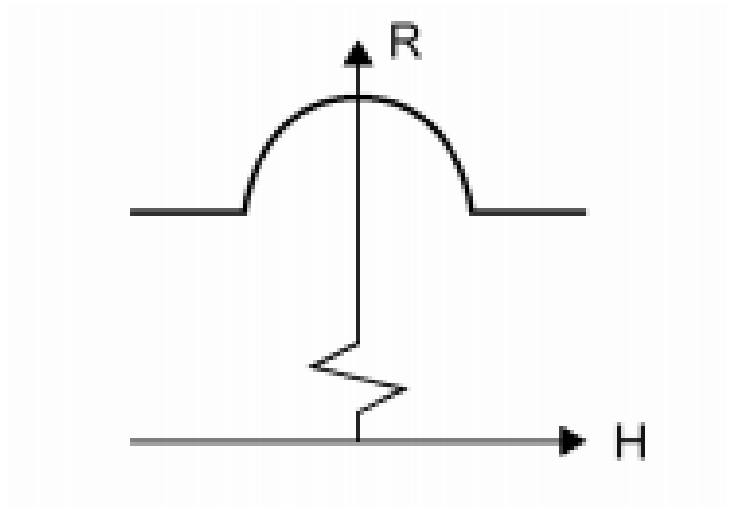
$R(\alpha)$ - promjena otpora (uz promjenu kuta α ovisno o jačini mjenjenog magnetskog polja)



Slika 9.20: AMR permalloya

Otpornost tankog sloja permalloya pokazana je kao funkcija kuta uslijed narinutoga vanjskog magnetskog polja.

Također, otpor R može se prikazati preko nelinearne karakteristike ovisne o vanjskom narinutom polju H . Karakteristika ima malu osjetljivost za male iznose narinutoga polja H te daje isti iznos za vrijednosti polja $+H_y$ i $-H_y$. To znači da AMR senzor izveden na ovaj način može registrirati samo magnitudu (jačinu) narinutoga polja ali ne i smjer.



Slika 9.21: Nelinearna karakteristika magnetootpornika

Kod nelinearne karakteristike vrijedi:

Za $H_Y \leq H_0$

$$R = R_0 + \Delta R_0 \left(1 - \frac{H_Y^2}{H_0^2} \right) \quad (9.13)$$

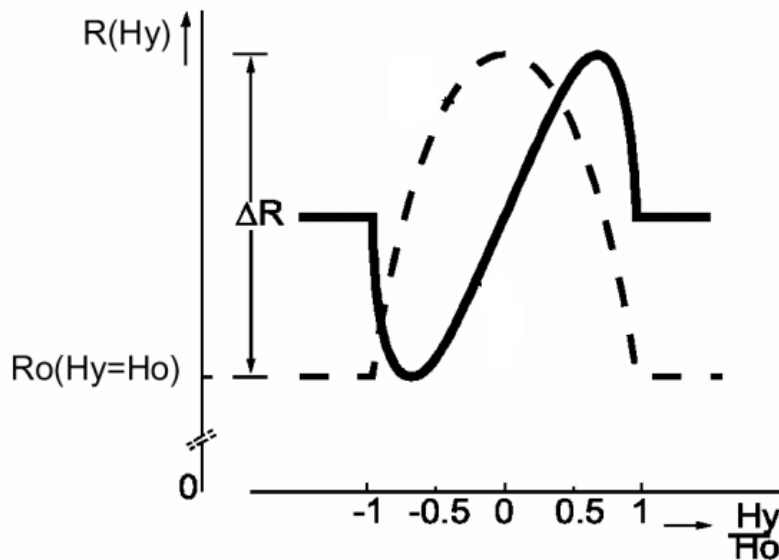
Za $H_Y > H_0$

$$R = R_0 \quad (9.14)$$

Poželjna je što linearnija karakteristika.

Nanošenjem aluminijskih traka na permalloy možemo dodatno zakrenuti kut između smjera struje i vektora magnetizacije. Materijal aluminij ima jaču vodljivost od permalloya i postavljanje aluminijskih traka spiralno na permalloy pod kutem od 45° (sram smjera magnetizacije) doći će do željenog zakretanja kuta između smjera struje i vektora magnetizacije. Postiže se kut od -45° [18].

Osigurava se linearna karakteristika koja će biti primjenjiva za manje iznose H_Y narinutoga vanjskog polja koje mjerimo, uz mogućnost određivanja smjera vektora.

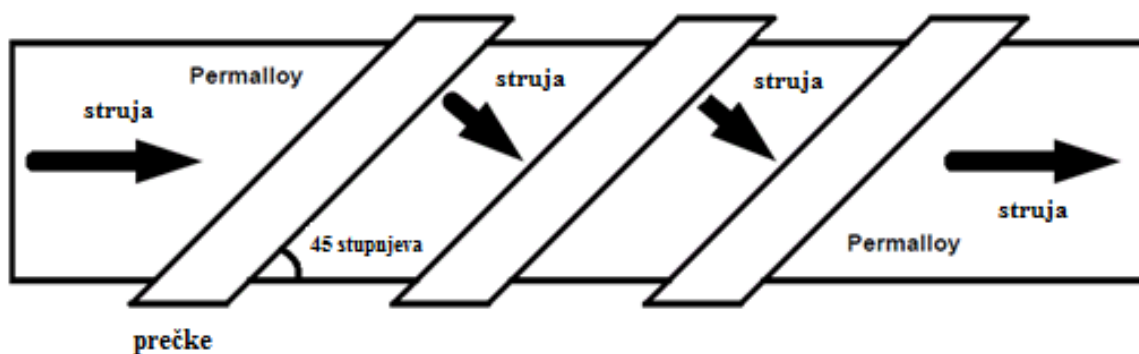


Slika 9.22: Linearizacija krivulje magnetootpornika

H_Y - mjereno polje

H_0 - konstanta ovisna o materijalu

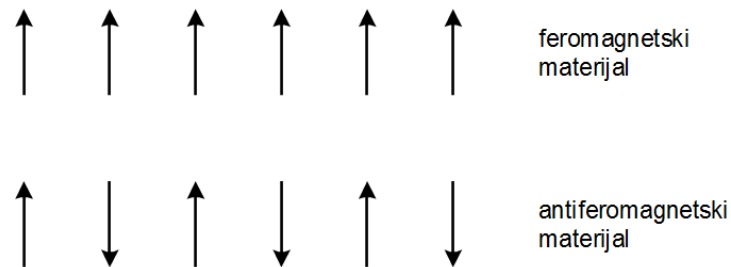
Na slici je prikazana promjena otpora R kao funkcija mjenenog polja H_Y . Isprekidanom linijom prikazana je standardna R - H karakteristika bez spiralnog isprugivanja permalloya aluminijskim trakama. Punom linijom prikazana je linearna R - H karakteristika permalloya sa spiralnim aluminijskim trakama.



Slika 9.23: Izvedba magnetootpornika od permalloya sa nanesenim trakama aluminija

9.6.2. GMR senzor

GMR senzori ("Giant MagnetoResistance Sensors") su još jedna su od mnogih izvedbi za indirektno mjerenje struje putem mjerenja magnetskog polja. Dobili su naziv po velikoj promjeni otpora pri izlaganju spoja vanjskom magnetskom polju. Njihov naziv na prvi pogled sugerira robusnost dok se zapravo radi o minijaturnim dimenzijama. Možemo govoriti o konkretnom ulasku u obećavajuće područje nanotehnologije. Promjene otpora senzora pri izlaganju vanjskom magnetskom polju su u rasponu od 10 do 20% dok su kod ostalih tipova magnetskih senzora u područjima od nekoliko postotaka [18].



Slika 9.24: Magnetski momenti u materijalima

Međusobni utjecaj magnetskih momenata susjednih atoma kod feromagnetskih materijala je takav da su oni jednakih iznosa, paralelni i istog smjera. Kod antiferomagnetskih materijala radi se o paralelnom ali suprotnom utjecaju magnetskih momenata.



Slika 9.25: Struktura slojeva bez utjecaja vanjskog magnetskog polja

- A – vodljivi (nemagnetski) srednji sloj
- B – vanjski slojevi legure
- C – utjecaj struje

Struktura GMR senzora sastoji se od slojeva feromagnetskih legura koje su kao u sendviču pritisnuti sa gornje i donje strane ultra tankog nemagnetskog vodljivog srednjeg sloja. Ako nema utjecaja magnetskog polja magnetski momenti u vanjskim slojevima B imaju suprotni smjer. Otpor struji C je veliki.

Nemagnetski sloj je najčešće izrađen od bakra koji je općenito razmatrano vrlo dobar vodič. Ipak, kada je izrađen jako tanak (debljine par atoma) elektroni koji se rasprše uzrokuju da se otpor bakra značajno poveća. Optimalna debljina slojeva poboljšava svojstva antiparalelnog spoja. Time je osigurano stanje visokog otpora kada nema narinutoga vanjskog polja.



Slika 9.26: *Struktura slojeva uz utjecaj vanjskog magnetskog polja*

- A – vodljivi (nemagnetski) srednji sloj
- B – vanjski slojevi legure
- C – utjecaj struje
- D – narinuto vanjsko magnetsko polje

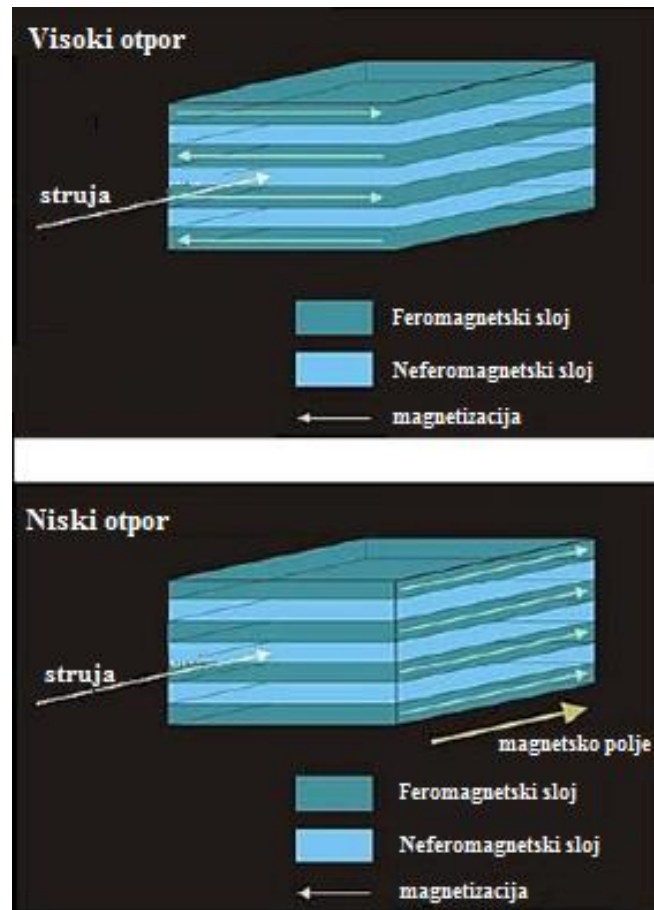
Utjecaj vanjskog magnetskog polja D savladava antiferomagnetski spoj. Otpor pada kada vanjsko polje nadvlada antiparalelni spoj i kada se momenti unutar magnetskih slojeva B poravnaju.

Kvantna mehanika GMR senzora može se usporediti sa lopticama koje polažemo između dva paralelna rotirajuća valjka. Ako bi rotacije obaju valjaka bile u istom smjeru loptice bi lako prošle kroz prostor između. Ako bi smjer rotacije valjaka bio međusobno suprotan tada bi loptice bile nabacivane uokolo, raspršene, a prolaz bi bio otežan (analogija otpora).

Kvantna elektromehanika definira "spin" kao osobinu elementarne čestice, kao mehanički moment ili zamah (jednostavnu rotaciju nabijene čestice naboja). U GMR uređajima prvi magnetski sloj određuje spin elektrona. Drugi sloj raspršuje elektrone izrazito jako ako magnetski moment nije poravnat sa početnim polariziranim momentom. Ako je magnetski moment drugog sloja poravnat spram prvoga dopušta se prolazak "spinova". Otpor se stoga mijenja ovisno dali su magnetski momenti paralelni (mali otpor) ili antiparalelni (veliki otpor).

Za primjer možemo uzeti izvedbu od slojeva kobalta i željeza sa bakrom koji dijeli slojeve kao srednji sloj neferomagnetskog materijala. Kobalt ima tvrdi magnetizaciju koja se zadržava unatoč utjecaja vanjskog polja, a željezo krasi meka magnetizacija koja će pratiti smjer vanjskog magnetskog polja. Smjer struje nije bitan pri ovom efektu. U širokom rasponu meki magnetski materijal prati smjer vanjskog polja. Tvrdi materijal ostaje nepromijenjen tako da otpor ovisi samo o orijentaciji magnetskog polja [18].

Slojevi moraju biti toliko tanki da raspršivanje elektrona bude utjecajni faktor na otpor spoja. U izradi se često koriste elementi nikal, željezo, bakar i kobalt. Slojevi su tanki, reda veličine nekoliko nanometara (npr. 3nm za senzore koji se koriste u medicini). Koliko su to male veličine može se pokazati primjerom da je debljina od 3nm oko 10,000 puta tanja od debljine papira. U praksi GMR senzori izrađuju se od višestrukih slojeva magnetskih i nemagnetskih materijala da bi se poboljšala osjetljivost.



Slika 9.27: Magnetski i nemagnetski slojevi kod GMR senzora

Prednost GMR senzora nad AMR senzorom i Hallovom sondom je to da nisu osjetljivi na promjene širine zračnog raspona. AMR senzor i Hallova sonda reagirati će na jakost magnetskog polja tako da najmanja promjena razmaka između magneta i senzora uzrokuje promjene u amplitudi signala. GMR senzori reagiraju na smjer magnetskog polja neovisno o jakosti. Dopušteni su veliki zračni raspori.

10. ZAKLJUČAK

Strujni mjerni transformatori su među najpouzdanijim dijelovima elektroenergetskih postrojenja. Klasične izvedbe transformatora sa feromagnetskom jezgrom jednostavne su, dugog radnog vijeka i prihvatljivih cijena. Iako postoje moderne po principu rada tehnološki naprednije izvedbe konvencionalni transformatori sa feromagnetskom jezgrom zasigurno će ostati neizostavni dio elektroenergetskih postrojenja još dugu niz godina.

Konvencionalne izvedbe konkurentne su na tržištu stoga je razvoj nekonvencionalnih transformatora usporen i postavlja se pitanje koji tempom će se rasprostraniti novije tehnologije SMT-a.

Razvoj alternativnih modela SMT-a dolazi paralelno sa općim razvojem tehnologije i kompatibilnošću novijih vrsta izvedbi sa mikroprocesorskom tehnologijom koja se koristi u modernim elektroničkim mjernim instrumentima i sustavima zaštite. Moderna tehnologija zahtijeva sve manju ulaznu snagu, paralelno sa time izvedba mjernog sustava mora biti takva da se mjerene ulazne vrijednosti snižavaju na prikladne razine za rad elektroničkih sklopova. Razvoj elektroničkih sustava zaštite, nadzora i upravljanja elektroenergetskim sustavima uzrokuje potrebu za poboljšanjem postojećih mjernih transformatora ili korištenje modernih pretvarača. Nekompatibilnost između konvencionalnih transformatora i modernih elektroničkih mjernih instrumenata (te uređaja zaštite) dolazi sve više do izražaja.

11. LITERATURA

- [1] Bego, V.: Mjerni transformatori, Školska knjiga, Zagreb, 1977.
- [2] Pravilnik o mjeriteljskim i tehničkim zahtjevima za mjerne transformatore u mjernim grupama za mjerenje električne energije, državni zavoda za mjeriteljstvo, («Narodne novine» broj 163/03), Zagreb 2006.
- [3] International standard IEC 60044-1, Instrument transformers - Part 1: Current transformers, 2003-02
- [4] Gašparac, I., Cettolo, M.: Električni strojevi - upute za laboratorijske vježbe, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb
- [5] Ljubičić, V., Ravlić, V.: Izbor strujnih mjernih transformatora i udešenje relejne zaštite u TS 110/10(20) kV DOBRI, Zagreb 2002.
- [6] International standard IEC 60044-1, Instrument transformers - Part 1: Current transformers, pp. 13-83, 2003.
- [7] Požar, H.: Visokonaponska rasklopna postrojenja, Zagreb 1990.
- [8] Krajtner, D.: Izbor i dimenzioniranje strujnih i naponskih transformatora za zaštitu i mjerenje, diplomski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva
- [9] Vujović, P., Vukašinović, S.: Izbor parametara lineariziranih jezgara za visokonaponske strujne mjerne transformatore, XV. savjetovanje elektroenergetičara, 1981. Referat broj 12.02.
- [10] Fernežir D., Čerina Z., Ivanković I.: Integrirani sustav regulacije i nadzora energetskih transformatora, 7. simpozij o sustavu vođenja EES-a Cavtat, 2006.
- [11] I. G. Kuliš, „Zemljospojna zaštita u rezonantno uzemljenim razdjelnim elektroenergetskim mrežama“, doktorski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [12] V. Komen, V. Sirotnjak, R. Čučić, „Iskustva u pogonu razdjelnih mreža sa shunt prekidačem“, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO Cired, 1. savjetovanje, Šibenik, 18. - 21. svibnja 2008.
- [13] D. Močinić, Ž. Grgurić, R. Čučić, B. Krstulja, „Modeliranje uzemljenja distribucijske mreže u NMS sustavu Elektroprimorja Rijeka“, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije HO Cired, 2. savjetovanje, Umag, 16.-19. svibnja 2010
- [14] 6001 IEC, Technical Committee No 38 (Secretariat) 61: Instrument transformers, May 1987.

[15] Tectra katalog mjerne i ispitne tehnike, s Interneta
tectra.hr/opceniti/strujna-klijesta/

[16] K. Bičanić, I. Kuzle., T. Tomiša: „Nekonvencionalni mjerni pretvarači“, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2006.

[17] Komlenac S.: Električna mjerenja, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek 2003

<https://id.scribd.com/doc/188291743/Elektricna-Mjerenja-Skripta-StanislawKomlenac>

[18] Mjerni pretvornici - mjerenje magnetskog polja, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, s Interneta

https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Mjerenje-Magnetskog_Polja.pdf

12. SAŽETAK

U ovome radu sistematično se obrađuje tema strujnih mjernih transformatora počevši od osnovnih principa funkcioniranja transformatora. Detaljno je opisana problematika konvencionalnih transformatora s obzirom na zasićenje jezgre.

Proanaliziran je pravilnik na državnoj razini o mjeriteljskim i tehničkim zahtjevima za mjerne transformatore da bi se u nastavku rada detaljnije analizirali parametri strujnih transformatora sa strane elektrotehničke struke. Opisane su podjele prema klasama točnosti i moguće opcije za uzemljenje zvjezdišta transformatora.

Objašnjene su najčešće izvedbe strujnih transformatora s posebnim naglaskom na moderne nekonvencionalne izvedbe koje nazivamo i nekonvencionalnim pretvaračima. Prikazana je mogućnosti neizravnog mjerenja struje mjerenjem intenziteta magnetskog polja sensorima ili mjerenjem napona na shunt otporniku.

ABSTRACT

This thesis systematically observes current measuring transformers theme starting with the basic functioning principles of a transformer. It also describes in details the problems of conventional transformers due to the saturation of the core.

Thesis contains analysis of the regulations at the state level for measurement and technical requirements of the current transformers. Further analysis of the parameters of current transformers has been made on the scientific field of electrical engineering. Thesis describes division into classes of accuracy and possible options for the transformer grounding.

The most common implementations of current transformers have been explained with special emphasis on modern unconventional types which are also called unconventional converters. Thesis also shows alternative possibilities for indirect measurement of current by measuring the intensity of the magnetic field with sensors or by measuring the voltage at the shunt resistor.

Ključne riječi i popis kratica:

SMT – strujni mjerni transformator

ST – strujni transformator (engl. CT – "current transformer")

SN – srednji napon (ili srednjenaponski)

DC – "direct current" (istosmjerna struja)

AMR – "Anisotropic MagnetoResistance" (oznaka za vrstu senzora)

GMR – "Giant MagnetoResistance" (oznaka za vrstu senzora)