

# Mjerenje velikih istosmjernih struja pomoću posebnih mjernih transformatora

---

Juzbašić, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:072008>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I**  
**INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Stručni studij**

**MJERENJE VELIKIH ISTOSMJERNIH STRUJA**  
**POMOĆU POSEBNIH MJERNIH TRANSFORMATORA**

**Završni rad**

**Marko Juzbašić**

**Osijek, 2022.**

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. POJMOVNO ODREĐENJE ISTOSMJERNE STRUJE .....	2
2.1. Povijesni pregled.....	2
2.2. Pojam istosmjerne struje .....	3
2.3. Istosmjerni strujni krug .....	4
2.4. Izvori istosmjerne struje.....	5
3. POJAM MJERNIH TRANSFORMATORA .....	6
3.1. Mjerni transformatori.....	6
3.2. Karakteristike mjernih transformatora .....	10
3.3. Funkcionalnost mjernih transformatora .....	11
3.4. Izvedbe mjernih transformatora .....	12
3.5. Kombinirani mjerni TRAFO-i .....	14
3.6. Izolirani plinom mjerni TRAFO .....	15
4. RAD I FUNKCIONALNOST MJERNIH STRUJNIH TRANSFORMATORA .....	17
4.1. Osnovni parametri.....	17
4.2. Pogreške strujnih mjernih transformatora.....	18
4.3. Snaga SMT-a .....	19
4.4. Faktor sigurnosti SMT-a .....	20
5. MJERENJE ISTOSMJERNE STRUJE .....	21
5.1. Strujni transformator za mjerenje istosmjerne struje .....	21
5.2. Primjeri mjernih transformatora.....	23
5.3. Tolerancija istosmjerne struje .....	24
5.4. Princip i dizajn transformatora za mjerenje istosmjerne struje .....	25
5.5. Odziv istosmjerne struje.....	25
6. Metode mjerenja velikih istosmjernih struja.....	26
6.1. Strujni transformator istosmjerne struje.....	26
6.2. Mjerenje velikih istosmjernih struja strujnim jarmom i Hallovom sondom .....	27
6.3. Tehnika mjerenja istosmjernih struja velikih vrijednosti pomoću strujnog jarma sa magnetski tokom koji je kompenziran .....	28
6.4. Magnetooptički strujni transformator .....	29
7. ZAKLJUČAK .....	30

<b>SAŽETAK</b> .....	31
<b>ABSTRACT</b> .....	31
<b>LITERATURA</b> .....	32
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	34

## 1. UVOD

U ovome radu će se raspravljati o temama vezanim uz transformatore koji mjere istosmjernu struju. Strujni transformator (CT) je vrsta transformatora koji se koristi za mjerenje istosmjerne struje.

Strujni transformatori, zajedno s naponskim ili potencijalnim transformatorima, su mjerni transformatori. Mjerni transformatori skaliraju velike vrijednosti napona ili struje na male, standardizirane vrijednosti kojima se lako rukuje za mjerne instrumente i zaštitne releje. Instrumentalni transformatori izoliraju mjerne ili zaštitne krugove od visokog napona primarnog sustava. Strujni transformator osigurava sekundarnu struju koja je točno proporcionalna struji koja teče u njegovoj primarnoj. Strujni transformator predstavlja zanemarivo opterećenje primarnog kruga.

Strujni transformatori su strujno osjetljive jedinice elektroenergetskog sustava i koriste se u proizvodnim stanicama, električnim trafostanicama te u industrijskoj i komercijalnoj distribuciji električne energije.

## 2. POJMOVNO ODREĐENJE ISTOSMJERNE STRUJE

### 2.1. Povijesni pregled

Istosmjernu struju proizvela je 1800. baterija talijanskog fizičara Alessandra Volte, njegova Voltova gomila. Još nije bila shvaćena priroda kako struja teče. Francuski fizičar André-Marie Ampère pretpostavio je da struja putuje u jednom smjeru od pozitivnog prema negativnom. 5)

Kada je francuz Hippolyte Pixii distributer uređaja napravio prvi električki dinamo generator 1832., tada je otkrio, kako kroz žičane petlje prolazi upotrjebljeni magnet svakih pola okreta, uzrokuje okretanje toka električne energije, stvarajući izmjeničnu struju. Na Ampèreov prijedlog, Hippolyte Pixii je poslije nadodao komutator, tip "prekidača" gdje osovinski kontakti rade s "četkičastim" kontaktima za proizvodnju istosmjerne struje.

Električna energija počinje se praviti u elektranama kasne 1870-te i rane 1880-te godine. U početku su oni bili postavljeni za napajanje lučne rasvjete (popularne vrste ulične rasvjete) koja radi na velikom naponu većem od 3000 volti izmjenične i istosmjerne struje. Nakon što je 1882. Godine izumitelj Thomas Edison lansirao svoj električni "uslužni program" temeljen na žarulji sa žarnom niti uslijedila je velika konzumacija istosmjerne struje malog napona za unutarnju rasvjetu u kućanstvima i prostorima za posao. 8)

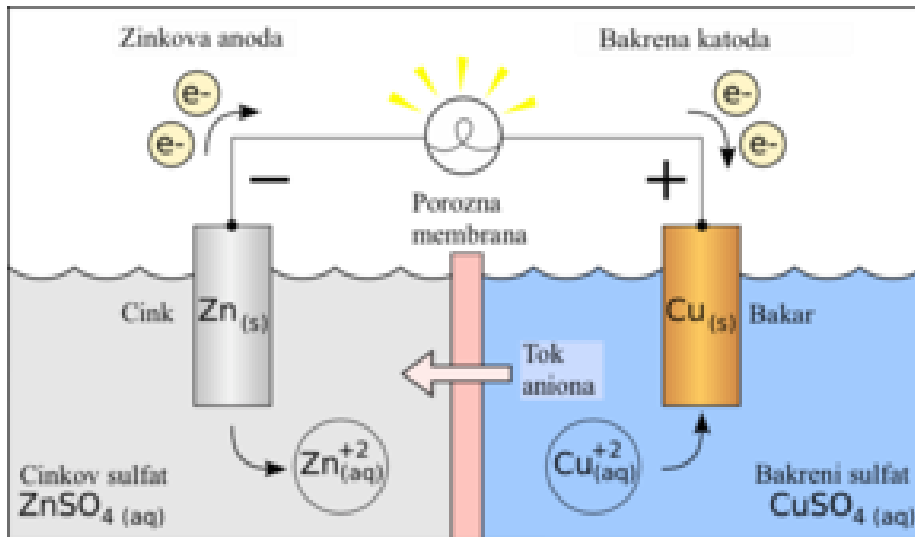
Zbog značajnih prednosti izmjenične struje u odnosu na istosmjernu struju u korištenju transformatora za podizanje i snižavanje napona kako bi se omogućile mnogo veće udaljenosti prijenosa, istosmjerna struja je tijekom sljedećih nekoliko desetljeća zamijenjena izmjeničnom strujom u isporuci električne energije.

Sredinom 1950-ih razvijen je visokonaponski prijenos istosmjernom strujom, koji je sada opcija umjesto visokonaponskih sustava izmjenične struje na velike udaljenosti. Za podmorske kabele na velikim udaljenostima, ova DC opcija je jedina metoda koja je moguća za izvesti. izmjenična struja se transportira do transformatorske stanice, u kojoj se primjenjuje ispravljač za pretvorbu energije u istosmjernu struju, to služi za sustave kojima je potrebna istosmjerna struja, kao što su sustavi napajanja treće tračnice.

## 2.2. Pojam istosmjerne struje

Istosmjerna struja (DC) je jednosmjerni tok električnog naboja. Elektrokemijska ćelija je najbolji primjer istosmjerne struje. Istosmjerna struja ima mogućnost da prolazi kroz vodiče kao što su žice, ali može prolaziti i poluvodičima, kroz vakuum u elektronskom i ionskom snopu, pa čak i kroz izolatore. Struja teče u istome smjeru, za razliku od izmjenične struje. Galvanska struja je naziv koji se ranije koristio za ovu vrstu struje . 5)

Slika 1. Prikaz istosmjerne struje. 14)



Istosmjerna struja može se preoblikovati u izmjeničnu struju putem pretvarača. Istosmjerna struja može se pretvoriti iz izvora izmjenične struje korištenjem ispravljača, pretvarač mora posjedovati elektromehaničke parametre ili elektroničke parametre, ti parametri dopuštaju da struja prolazi jedino u jednom pravcu.

Vrlo velike količine električne energije dobivene putem istosmjerne struje upotrebljavaju se za željeznice te se koriste u topljenju aluminija i drugim elektrokemijskim procesima. Istosmjerna struja posjeduje mnogo namjena, od velikih izvora napajanja elektroničkih sustava do punjenja baterija. Struja velikoga napona koristi se za prijenos velike količine energije s udaljenih proizvodnih mjesta ili za međusobno povezivanje električnih mreža izmjenične struje.

Istosmjerna struja (DC) je električna struja koja je jednosmjerna, tako da je tok naboja uvijek u istom smjeru. Za razliku od izmjenične struje, kod istosmjerne struje se smjer i jakost struje ne

mijenjaju. Koristi se u mnogim kućanskim elektronikama i u svim uređajima koji koriste baterije. 8)

Istosmjerna struja definirana je stalnim protokom elektrona iz područja visoke gustoće elektrona u područje niske gustoće elektrona. U krugovima koji uključuju baterije, to je ilustrirano stalnim protokom naboja od negativnog pola baterije do pozitivnog pola baterije. Mnogo je skuplje i teže promijeniti napon istosmjerne struje za razliku od izmjenične struje, što ga čini lošim izborom za visokonaponski prijenos električne energije. Međutim, za vrlo velike udaljenosti, HVDC prijenos može biti učinkovitiji od izmjenične struje

Termin istosmjerna struja koristi se za označavanje energetske sustava koji koriste samo jedan polaritet napona ili struje, te za označavanje konstantne, nulte frekvencije ili sporo promjenjive lokalne srednje vrijednosti napona ili struje.

Na primjer, napon preko istosmjernog izvora napona je konstantan kao i struja kroz istosmjerni izvor struje. Istosmjerno rješenje električnog kruga je rješenje u kojem su svi naponi i struje konstantni. Može se pokazati da se svaki valni oblik stacionarnog napona ili struje može rastaviti na zbroj istosmjerne komponente i vremenski promjenjive komponente nulte srednje vrijednosti; istosmjerna komponenta je definirana kao očekivana vrijednost ili prosječna vrijednost napona ili struje tijekom cijelog vremena.

Iako DC označava "istosmjernu struju", DC se često odnosi na "konstantni polaritet". Prema ovoj definiciji, istosmjerni naponi mogu varirati u vremenu, kao što se vidi u sirovom izlazu ispravljачa ili fluktuirajućem glasovnom signalu na telefonskoj liniji.

Neki oblici istosmjerne struje (kao što je ona koju proizvodi regulator napona) nemaju gotovo nikakvih varijacija u naponu, ali ipak mogu imati varijacije u izlaznoj snazi i struji.

### **2.3. Istosmjerni strujni krug**

Istosmjerni strujni krug je električni krug koji se sastoji od bilo koje kombinacije izvora konstantnog napona, izvora konstantne struje i otpornika. U tom su slučaju naponi i struje kruga neovisni o vremenu. Određeni napon ili struja kruga ne ovisi o prošloj vrijednosti bilo kojeg napona ili struje kruga. To implicira da sustav jednadžbi koje predstavljaju istosmjerni krug ne uključuje integrale ili derivacije u odnosu na vrijeme. 5)



Kada se kondenzator ili induktor doda istosmjernom krugu, rezultirajući krug nije, strogo govoreći, istosmjerni krug. Međutim, većina takvih sklopova ima istosmjerno rješenje. Ovo rješenje daje krugu napone i struje kada je krug u stacionarnom stanju istosmjerne struje. Takav se krug prikazuje sustavom diferencijalnih jednadžbi.

Rješenje ovih jednadžbi obično sadrži vremenski promjenjivi ili prolazni dio, kao i dio s konstantnim ili stacionarnim stanjem. Upravo je ovaj dio u stabilnom stanju istosmjerno rješenje. Postoje neki sklopovi koji nemaju istosmjerno rješenje. Dva jednostavna primjera su izvor konstantne struje spojen na kondenzator i izvor konstantnog napona spojen na induktor.

U elektronici je uobičajeno krug koji se napaja istosmjernim izvorom napona kao što je baterija ili izlaz istosmjernog napajanja nazivati istosmjernim krugom iako se misli na to da je krug napajan istosmjernom strujom.

#### **2.4. Izvori istosmjerne struje**

Ovaj oblik energije najčešće proizvode izvori kao što su solarne ćelije, baterije i termoparovi. Istosmjerna struja naširoko se koristi u niskonaponskim aplikacijama kao što su punjenje baterija, automobilske aplikacije, aplikacije u zrakoplovima i druge aplikacije niskog napona i niske struje. 12)

Svi današnji solarni paneli proizvode istosmjernu struju. Uobičajene primjene istosmjerne struje u PV industriji su prijenosni solarni sustavi i drugi uređaji izvan mreže. Ako ne koristite solarni pretvarač za pretvaranje istosmjerne u izmjeničnu struju, smanjit ćete troškove takvih sustava.

Danas se za distribuciju električne energije uglavnom koristi izmjenična struja, jer ima značajne prednosti u odnosu na istosmjernu struju u prijenosu i transformaciji. Jedna od najvećih prednosti istosmjerne struje je njezina mogućnost korištenja u posebnim primjenama.

Kad god prijenos izmjenične struje nije praktički izvediv ili moguće na velikim udaljenostima, koristi se istosmjerna struja. Jedna takva primjena su podmorski visokonaponski istosmjerni prijenosni vodovi.

Ovdje se električna energija proizvodi u obliku izmjenične struje, pretvara u istosmjernu struju na sklopnoj/terminalnoj stanici, prenosi podmorskom mrežom kabela, a drugu terminalnu stanicu ponovno pretvara u izmjeničnu struju i konačno isporučen kupcima.

### 3. POJAM MJERNIH TRANSFORMATORA

#### 3.1. Mjerni transformatori

Mjerni trafo-i su električni uređaji visoke točnosti koji se koriste za izolaciju ili transformaciju razina napona ili struje. Najčešća uporaba mjernih transformatora je upravljanje instrumentima ili mjerenje iz visokonaponskih ili visokostrujnih krugova, sigurno izoliranje sekundarnog upravljačkog kruga od velikih struja i napona. Primarni namot transformatora spojen je na visokonaponski ili jako strujni krug, a instrument ili relej spojeni su na sekundarni krug. 3)

Slika 2. Prikaz mjernog strujnog transformatora. 15)



Trafo-i se također mogu upotrebljavati kao izolacijski transformatori za korištenje sekundarnih veličina u faznom pomaku bez da utječu na drugu primarnu spojenu opremu.

Strujni transformatori (CT) su serijski spojeni tip mjernih transformatora. Dizajnirani su za prikazuju malo opterećenje na ispitivanom izvoru napajanja s točnim omjerima struje i fazni odnos kako bi se omogućilo precizno sekundarno priključeno mjerenje.

Strujni transformatori često se konstruiraju prolaskom jednog primarnog zavoja (bilo izoliranog kabela ili neizolirane sabirnice) kroz dobro izoliranu toroidalnu jezgru omotanu s mnogo zavoja žice. Ovo omogućuje jednostavnu implementaciju na visokonaponskim izolacijskim provodnicima mrežnih transformatora i drugim uređajima ugradnjom jezgre sekundarnog zavoja unutar visokonaponskih izolatora čahura i korištenjem prolaznog vodiča kao jednoslojnog primara. 3)

Strujna stezaljka koriste strujne trafo-e s razdvojenim jezgrama koji se lako mogu umotati oko vodiča unutar kruga. Ovo je metoda koja se obično koristi u prijenosnim instrumentima za mjerenje struje, ali se za stalne instalacije koriste tipovi strujnih trafo-a manjih cijena. Posebno konstruirani širokopojasni CT-ovi također se koriste, obično s osciloskopom, za mjerenje visokofrekventnih valnih oblika ili impulsnih struja unutar pulsirajućih energetskih sustava. Jedna vrsta daje IR izlazni napon proporcionalan mjerenoj struji; druga, nazvana Rogowskijeva zavojnica, potreban joj je vanjski integrator za pružanje proporcionalnog izlaza..

Strujni transformator je prikladno izveden mjerni transformator kod kojeg je pri normalnom pogonu struja sekundara gotovo proporcionalna struji primara, a njegova faza se razlikuje za kut koji je kod ispravnog spoja blizak nuli terminala od faze struje primara.

Smt se upotrebljavaju za mjerenje struja velikih vrijednosti, koje se zbog premašivanja njihovih mjernih područja ne mogu mjeriti direktnim uključenjem brojila. Galvanska izolacija mjernih uređaja od mjernog kruga koji je pod velikim naponom je još jedna pogodnost smt-a.

Namoti su namotani na tipičnoj feromagnetskoj jezgri (obično toroidalnoj ), namotanoj iz jedne ploče transformatora. Primarna struja “  $I_p$  ” teče kroz primarni namot, koji se transformira s primarne strane na sekundarnu stranu transformatora. U sekundarnom namotu teče sekundarna struja " $I_s$ ", koja napaja elektroničke sklopove mjernih instrumenata, mjerača ili releja. 3)

Namoti transformatora pažljivo su međusobno izolirani, što štiti od prekida visokog napona s primarne strane na sekundarni krug. Zbroj svih struja u magnetskom krugu je nula, jer je

sekundarni krug strujnog transformatora kratko spojen niskom impedancijom i u njemu teče struja koja gotovo u potpunosti kompenzira primarni tok.

Mjerni transformatori služe za napajanje mjernih instrumenata i točniji su od zaštitnih transformatora koji se koriste za napajanje zaštitnih releja. Zaštitni releji su manje precizni, ali zadovoljavaju zahtjeve u području ukupne pogreške u mnogo širem rasponu struja, koje premašuju nazivne vrijednosti i po nekoliko desetaka puta.

Zahvaljujući tome osiguravaju ispravan rad zaštita u uvjetima preopterećenja i nedostataka u elektroenergetskoj mreži. Ipak, mjerni transformatori su točniji, ali samo u uskom rasponu struja, pa čak i kod struja nešto većih od nazivnih, pokazuju veliku negativnu vrijednost pogreške mjerenja, što učinkovito štiti mjerne instrumente pričvršćene na njih od oštećenja tijekom preopterećenja ili kratkog spoja u elektroenergetskoj mreži. Stoga se mjerni i zaštitni transformatori ne mogu koristiti međusobno, čak i ako imaju isti nazivni prijenos i slične granične vrijednosti pogreške.

Induktivni nmt najčešće se izrađuju kao jednofazni. U trofaznim sustavima se upotrebljavaju trofazni transformatori ili se jednofazni transformatori priključuju u odgovarajući sustav. Naponski induktivni transformatori ovisno o broju sekundarnih namota, mogu imati više sekundarnih namota ili jedan sekundarni namot.

„ Prema primjeni nmt se dijele na:

- naponski trafo za mjerenje,
- dizajniran za napajanje instrumenata,
- naponske trafo-e za sigurnost,
- naponski trafo za mjerenja i zaštite.“ 7)

U jednofaznim naponskim transformatorima kao zaštita može postojati namot zaostalog napona, namijenjen povezivanju u nizu od tri jednofazna transformatora u otvoreni trokut kako bi se stvorila nulta komponenta napona u slučaju kvarova na zemlji, potiskujući ferorezonantne vibracije . Osnovni parametri naponskih transformatora su sljedeći:

- nazivni primarni napon,
- nazivni sekundarni napon,
- nazivni prijenos "  $K_n$  " (  $K_n = V_{1n}/V_{2n}$ ),

- nazivna razina izolacije,
- nazivna snaga,
- klasa točnosti ,
- nazivni koeficijent napona,
- toplinska granična snaga,
- napon ( $(K_n V_s - V_p / V_p) * 100$ ),
- kutna greška.

3)

Nmt služe za napajanje mjernih uređaja, koji se odlikuju visokom točnošću transformacija pri primarnim naponima bliskim nazivnim.

„Osim definiranja vrste i tipa trafo-a pri odabiru nmt, potrebno je uskladiti i ustanoviti iduće segmente:

- sustav povezivanja trafo-a ,
- nazivni napon primara,
- nazivni napon sekundara,
- nazivna snaga i razred točnosti.“ 7)

prilikom biranja trafo-a za mjerne sustave od velike je bitnosti odabir razreda točnosti trafo-a i njegove nazivne jačine trafo-a. Nazivna snaga trafo-a zavisi većinom o uređajima priključenim na sekundarni namot i zbroju nazivnih snaga uređaja. Sekundarno opterećenje trafo-a ne smije prijeći nazivno opterećenje te ne smije biti ispod od 25 posto nazivnog opterećenja da bi trafo radio unutar traženog razreda točnosti.

Naponske transformatore koji se koriste za napajanje zaštitnih sustava treba karakterizirati dovoljna točnost pretvorbe napona u uvjetima kvara gdje dolazi do izobličenja valnog oblika.

Strujni trafo-i prilagođeni su za mjerenje struja u krugovima koji radi velikog potencijala voda onemogućuju izravno spajanje mjernih uređaja. Pri tome se izmjerena struja pokušava što bolje preoblikovati sa što nižim faznim pomicanjem na određene vrijednosti pogodne za mjerenje standardnim načinima za očitavanje nižih struja i u konstantnom rasponu. 7)

Nazivni raspon preobrazbe strujnog trafo-a određen je rasponom njegove nazivne struje primara i nazivne struje sekundara, to jest rasponom broja zavoja namota sekundara i primara.

Nazivna vrijednost struje sekundara je standardizirana, za strujni transformator za mjerenje je 5 ampera, a za strujni transformator za relejnu zaštitu je 5 ampera i 1 amper. Nazivna vrijednost struje primara ovisi gdje se primjenjuje strujni trafo i može se kretati od 1 amper do nekoliko tisuća. Standardne vrijednosti navedene struje primara su 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 i 75 ampera te decimalni višekratnici gore navedenog. Zbog razdvajanja visokog napona od mjernih instrumenata izrađuju se i strujni visokonaponski trafo-i koji imaju vrijednost navedene struje primara manje od 5 ampera. 3)

Raspoznavamo strujne trafo-e za velike naponske frekvencije i strujne trafo-e za mali napon. Osim toga, razdvajamo još i strujne trafo-e koji napajaju relejne zaštitne uređaje i strujne trafo-e za mjerenje.

U radu bi idealni strujni trafo imao iste sekundarne i primarne amperzavoje. Identična nadomjesna shema kao i za nmt važi i za smt , zbog toga će stvarni trafo prikazivati propisano nezadovoljstvo između struje primara i struje sekundara.

Međutim, za prolazak struje sekundara neophodan je stalan napon jezgre induciran u namotu sekundara čime se štiti pad napona u tome namotu i također u spojenom teretu. Neophodan je točan segment amper zavoja namota primara koji nije nadomješten amper zavojima sekundara za induciranje toga napona. Taj segment amper zavoja direktan je krivac faznoj i strujnoj grešci i uskraćuje se od struje primara. 4)

Time su snižavanja napona na namota impedancije u strujnom trafo-u od manjeg važnosti za njegovu grešku. U procesu snižavanja struje magnetiziranja u strujnim se trafo-ima pretežno biraju manje magnetske indukcije i primjenjuju jezgre od magnetskih sredstava velike permeabilnosti. Radi istog motiva otpor spojenog tereta ne smije prijeći odgovarajuću, kontinuirano manju vrijednost.

### **3.2. Karakteristike mjernih transformatora**

Od velike je važnosti da se pretvorbom vrijednosti ostavi poželjna najmanja ispravnost da bi mogli tu vrijednost sa sigurnošću i dalje koristiti. Strujni trafo-i trebaju točno prenijeti na sekundar primara u konkretnom momentu kada nastane kvar tako isto i u prijelaznom razdoblju

nakon nastajanja KS-a ili nekakve druge pogreške kako bi se relejnoj zaštiti osiguralo pravovremeno i ciljano djelovanje. 4)

Pogreške trafo-a radi brzih izmjena amplituda i pojava radi prijelaznih razdoblja mogu kao rezultat donijeti požuren i prekasno, neophodan rad zaštite. „Poveznica među potrebama korisnika koji utvrđuje kategoriju zaštite te mjerenja i distributera trafo-a ima pomoću IEC normi koje određuju ponašanje mjernih trafo-a:

- IEC 60044-1 Strujni trafo
- IEC 60044-2 Induktivni naponski
- IEC 60044-3 Kombinirani naponski
- IEC 60044-5 Kapacitivni naponski
- IEC 60044-6 Strujni trafo pri prijelaznim stanjima
- IEC 60044-7 Elektronički naponski
- IEC 60044-8 Elektronički strujni “ 3)

Nazivne razine mjernih trafo-a ustanovljene su mjestom mjernih trafo-a koji se nalaze u postrojenju, razinom struja KS-a, naponskom vrijednosti, prijenosnim rasponom te za šta će se on koristiti – mjerenje ili zaštita.

### **3.3. Funkcionalnost mjernih transformatora**

Vođenje, kontrola i štíćenje električnih postrojenja, uređaja i mreža traži mjerenje različitih električnih veličina: snage, frekvencije, struje, energije, napona, faznog pomaka i tako dalje. Spektar vrijednosti glavnih veličina u elektrotehnici: struje i napona, koje treba mjeriti izuzetno je visok. Struje i napone velikih vrijednosti je ne moguće mjeriti direktno, pa se zbog toga koriste strujni i naponski mjerni trafo-i koji struju i napon prilagode na razine vrijednosti pogodne za mjerni sustav. 3)

Direktno mjerenje struje i napona preporučljivo je do vrijednosti koje podupiru verzije digitalnih i analognih mjernih uređaja, posebno sa gledišta termičke i naponske granice.

„Prednosti mjernih trafo-a su velike, a to su:

- mjerni trafo-i stavljaju mjerene veličine na propisane preoblikovane vrijednosti, to su struje od 1 amper i 5 ampera, a naponi od 100 volti, 200 volti, 100/ 3 volti i 200/ 3 volti;

- radi izmjerene energije pomoću mag polja mjerni uređaji su izolirani to jest galvanski razdvojeni od velikih napona u krugu;
- uporaba mjernih trafo-a u mjernome krugu omogućava smještaj mjernih uređaja i instrumenata na velikoj linearnoj udaljenosti od strujnog kruga, čime se jednako ne dozvoljava utjecaj nerijetko jakih električnih i magnetskih polja na rad instrumenata;
- odgovarajućim verzijama mjernih trafo-a, posebno strujnih transformatora, zaštićuju se mjerni instrumenti i uređaji od štetnog termičkog i dinamičkog utjecaja struja ks-a u strujnom mjernom krugu. “

4)

Mjerni trafo je električni magnetski uređaj koji je sastavljen od sekundarnog i primarnog namota stvorenih oko jezgre te od jezgre napravljene od materijala koji je magnetski. Namoti spojeni jezgrom dijele zajednički magnetski tok. Sekundarni i primarni namot mogu biti stavljeni radijalno oko stupa jezgre, što je najučestaliji princip izvedbe i na posebnim jarmovima jezgre .

Namoti su izolirani međusobno zavisno o veličini napona u krugu. Dok se na sekundarne spajaju zaštita ili mjerni uređaji, primarni se namoti spajaju u mjereni krug mjerene veličine. Koriste se dvije varijante mjernih trafo-a, strujni i naponski, te njihove metode priključka u krug.

### **3.4. Izvedbe mjernih transformatora**

„Epoksidni mjerni trafo: Mjerni trafo izolirani epoksidnom smolom prave se i za napone do 110 kilovolta a praktički su skroz izbacili sva ostala rješenja za nazivne napone do 35 kilovolta. Prilikom kreiranja takvog trafo-a prije nego što se on se on ulijeva u primjerenim kalupima epoksidnom smolom, najprije se kreira i izrađuje cijeli aktivni dio. “ 6)

Postignute su konstrukcije manjih dimenzija dosta pogodne za ugradnju u rasklopna postrojenja u nebitno kojem položaju na osnovi velikih izolacijskih svojstava epoksidnih smola i ovakvog tehnološkog procesa. Epoksidni naponski transformatori izrađuju se za nazivne napone do 110 kV, jednopolno ili dvopolno izolirani. Mogu se ugraditi u bilo kojem položaju te su redovito prikladni samo za unutrašnju montažu.

„Uljni mjerni transformatori: Primjenjuju se za nazivne napone veće od 35 kV, posebice za vanjsko ugrađivanje. Sekundarni i primarni namot te jezgra međusobno su izolirani papirnatim



zavojem i nalaze se u uljnom kotlu. Kako bi se smanjila veličina i masa, porculanski vodiči i kotao su čvrsto pritisnuti na aktivnom dijelu trafo-a.“ 3)

Transformator je hermetički zatvoren kako bi se spriječilo prodiranje vanjske vlage u ulje, što bi smanjilo njegovu dielektričnu čvrstoću. Proširenje ulja, to jest korekcija njegove veličine prilikom izmjene temperature, omogućena je savitljivom ovojnicom (guma), koja ima mogućnost osiguranja skoro nepromjenjivog tlaka u trafo-u.

„Uljni naponski induktivni trafo-i dijele se u 3 vrste:

- naponski trafo sa zatvorenom jezgrom
- naponski trafo s otvorenom jezgrom
- kaskadni naponski trafo

naponskom trafo-u sa zatvorenom jezgrom, sekundarni i primarni namot nalaze se na jednoj jezgri koja je na potencijalu zemlje. Namoti se najčešće dizajniraju u slojevima s papirom obloženim uljem kao među slojnom izolacijom.“ 4)

„Aktivni dio je postavljen u kućište koje je uzemljeno:

- sa zatvorenom jezgrom, Trench VEOT
- sa otvorenom jezgrom, Končar VPU
- kaskadni, VEOS Kod naponskog transformatora sa otvorenom jezgrom ona poprima oblik stupa, a magnetski tok se zatvara kroz zrak. Jezgra je smještena okomito, a na nju su namotani sekundarni, a zatim primarni namot. „

Među njima je postavljen izolatorski cilindar sa integriranim kondenzatorskim ekranima za podjelu napona. Ovakvom predstavom se značajno umanjuju oblici trafo-a te se olakšava izoliranje zato što se izolacija ka jarmu izgubi.

Naponski trafo s jezgrom koja nije zatvorena predstavlja iduće prednosti za razliku od obične izvedbe: mjesto napona primara prema dužini visine trafo-a prilagođava podjelu napona radne frekvencije prema izolatoru, također pruža veću hladnu površinu namota što je potrebno radi velikog zagrijavanja. Zbog mjesta gdje se nalazi aktivni dio samoj građi aktivnog dijela te dobrim toplinskim karakteristikama dosta jako se može toplinski opterećivati, naime svaka grupa napona primara je galvanski spojena sa ekranima koji se nalazi u izolatorskom cilindru, što za

rezultat daje podizanje longitudinalnih kapaciteta namota primara te ga pravi jako izdržljivim na prenapone koji mogu biti brzi i atmosferski. 3)

Jezgra koja nije zatvorena posjeduje prilično visoku struju magnetiziranja iz čega možemo zaključiti da je krivulja magnetiziranja polegnuta ka apscisi. Krivulja magnetiziranja se ne križa sa u-i karakteristikama mreže što znači da ne posjeduje sjecište sa pravim kapacitetima koji čine nastanak ferorezonancije. Zbog toga nije moguć nastanak ferorezonancije na naponskom trafo-u sa otvorenom jezgrom. Takav princip u kombiniranju sa strujnim inverznim trafo-om ima rješenje koje je izvedivo za kombinirani trafo.

### **3.5. Kombinirani mjerni TRAFO-i**

Za treći tip mjernih trafo-a, uz strujne trafo-e i naponske trafo-e, možemo staviti njihovu varijantu, a to je kombinirani mjerni trafo.

Taj princip zahtjeva da mjesto u kojem će biti naponski i strujni trafo budu zajedno u jednom kućištu.

„Možemo prepoznati nekoliko raznih tehničkih strategija kombiniranih trafo-a:

- Inverzni strujni trafo postavljen u središtu kombiniranog trafo-a dok je induktivni zatvorenom jezgrom trafo postavljen dole u trafo- u u odvojenom metalnom kućištu
- Ključna izolacija strujnog trafo-a se upotrebljava kao veliko naponski djeljenik naponskog kapacitivnog trafo-a. Induktivna postrojba s među naponskim trafo-om je postavljena u razdvojeno kućište
- Kombinirani trafo s izolacijom od SF<sub>6</sub>, tamo su obično naponski i strujni trafo postavljeni u središtu kombiniranog trafo-a
- druga solucija pokazuje spojeni trafo s naponskim trafo-om sa ne zatvorenom magnetskom jezgrom i inverznim strujnim trafo-om. “ 6)

„Dijelovi kombiniranih trafo-a su:

- glave u kojima su postavljene namoti sekundara strujnog trafo-a i jezgre,
- nosivi izolator kod kojeg idu sekundarni izvodi strujnog trafo-a,
- posjeduje otvorenu magnetsku jezgru, namote sekundara te primara naponskog kućišta i trafo-a.“

- „Pogodnosti buduće strategije za razliku od već postojećih su:
  - zaposjedanje malog objekta postavljanjem namota sekundara naponskog trafo-a unutra u noseću cijevi i otvorene jezgre,
  - namot primara naponskog trafo-a postavljen prema visini nosećeg izolatora podešava podjelu napona prema visini trafo-a radi čega ne zauzima puno prostora,
  - pravilna podjela težine u transformatoru naponskog namota trafo-a u noseći izolator i postavljanjem jezgre. “

### **3.6. Izolirani plinom mjerni TRAFO**

Osim ulja ili epoksidnih smola koji služe kao izolatorski element, primjenjuje se plin sumporni heksafluorid (SF<sub>6</sub>). Taj plin ima vrlo dobra izolacijska obilježja, te ne može ih izgubiti s vremenom a ni pod djelovanjem najvećih termičkih i električnih opterećenja, taj plin je krut, nije toksičan i ne može se zapaliti.

Postoje 2 metode uporabe mjernih trafo-a koji su izolirani plinom:

1. ugradbeni izolirani plinom mjerni trafo-i – to su trafo-i koji se postavljaju u atmosferu. Nemaju veliku razliku sa izvedbama mjernih trafo-a koji su izolirani uljem. „Pogodnosti SF<sub>6</sub> mjernih trafo-a su:
  - ne može ostariti,
  - male je mase i dizajniran je tako da bude izdržljiv,
  - zaštitni disk pruža sigurnost da ne dođe do eksplozije,
  - može se reciklirati i ekološki je odobren,
  - omogućava izmjene dielektričnih karakteristika izmjenom tlaka plina
  - omogućava kontrolu na daljinu tlaka koji se nalazi u postrojenju.
2. mjerni trafo-i služe za ugrađivanje u izoliranim postrojenjima koja su štićena plinom. Kod takvog slučaja se upotrebljavaju standardni induktivni mjerni trafo-i koji su namijenjeni plinskom izolacijskom elementu. Pored toga, kreću se upotrebljavati pretvornici napona ili struje, odnosno novi senzori s izlazom niskonaponskog signala prilagođeni drugoj opremi temeljeni prema mikroprocesorskoj tehnici. Više ćemo reći o tim sensorima u sljedećim poglavljima. U GIS postrojenjima najčešće upotrebljavamo djelatelja napona i prema bazi konvencionalnih transformatora strujne pretvornike.“ 6)

- „ - naponski SF6 trafo Rov SVS
- strujni SF6 trafo Trench SAS
- kombinirani SF6 mjerni trafo SVAS.

specijalne značajke te kriteriji za naponske mjerne trafo-e, nazivne vrijednosti primarnog napona, nazivne karakteristike, normalne vrijednosti nazivnog napona primara jednofaznih i trofaznih trafo-a koji se upotrebljavaju među vodovima ili jednofaznom sustavu i trofaznom sustavu bit prema normi IEC 60038 jedna od razina napona sustava.“

Uobičajene razine nazivnog napona sekundara biraju se po nužnosti lokacije tamo gdje ćemo trafo upotrebljavati. Za trafo-e koji su jednofazni u jednofaznom sustavu ili priključeni unutar vodova trofaznog sustava, kao i za trofazne trafo-e važi u Europi:

- 100 i 110 volta,
- 200 volta se koristi za šire sekundarne krugove.

„Na dijelu Kanade i SAD-a upotrebljavaju se naponi: 115 volta za transport, 120 volta kod proizvodnje i 230 volta za šire sekundarne krugove. Kod trafo-a koji su jednofazni, upotrijebljeni u trofaznim sustavima unutar zemlje i faze, kojim je iznos napona primara podijeljena sa tri , tada će nazivni sekundarni napon postati jedna od spomenutih iznosa podijeljena sa tri , zbog čuvanja iznosa prenosivog omjera trafo-a.

Opaska: Gdje je god potrebno, nazivni raspon pretvaranja trebao bi biti jednostavni iznos. Ako se upotrebljava nešto od ovih iznosa: 10, 12, 15, 20, 15, 30, 40, 50, 60, 80 i njihovi višekratnici, pokriti će se veći dio normalnih nazivnih napona prema IEC 60038.“ 4)

## 4. RAD I FUNKCIONALNOST MJERNIH STRUJNIH TRANSFORMATORA

### 4.1. Osnovni parametri

„Osnovni parametri strujnog transformatora su:

- konstanta strujnog trafo-a ili prijenosni omjer, nazivna struja sekundara i nazivna struja primara,
- razred točnosti,
- nazivna razina napona za koju je namijenjen,
- nazivna frekvencija,
- nad strujni broj,
- toplinska kategorija izolacije, nazivna snaga svake jezgre, stalna toplinska struja, tipovi temeljne izolacije, broj žila, nazivna podnošljiva dinamička struja i nazivna kratkotrajna podnošljiva toplinska struja.“ 6)

Treba spomenuti da kada struja teče kroz namot primara strujnog trafo-a, nije dopušteno zadržati namot sekundara otvoren.

Radi toga što tog trenutka sva struja primara stvara magnetiziranje u jezgri strujnog trafo-a – nema sekundarnih amperažnih zavojnica koje bi bile u suprotnosti s primarnim amperažnim zavojnicama. To će dovesti do ulaženja strujnog trafo-a duboko u opterećenje, do najvećeg vrijednosti toka.

Zbog brze promjene fluksa pri promjeni smjera struje u namotu primara inducira se visoka vrijednost napona na namotima sekundara (posjeduje više zavoja). Napon posjeduje impuls zbog značajne nelinearnosti željeza, koja je prisutna pri tako velikim opterećenjima. 7)

Osim toga, budući da cijela struja primara utječe na magnetiziranje jezgre, struja se ugrije što rezultira taljenjem izolacije između ploča od kojih je jezgra sastavljena i gubitka magnetskih svojstava istih. listova, što strujni transformator čini neupotrebljivim.

## 4.2. Pogreške strujnih mjernih transformatora

Pogreške strujnih mjernih transformatora dijele se na: kutne pogreške i strujne pogreške . Strujna pogreška pokazuje između struje sekundara i struje primara pomnoženu s konstantom strujnog trafo-a postotnu razliku .

Prema vrijednosti pogreška će biti negativna ili pozitivna, dok se u načelu prima njezina apsolutna vrijednost. Kutna pogreška označava razliku između faznih kutova struje primara i sekundara. Razred točnosti strujnog trafo-a je dopuštena strujna pogreška kod nazivne primarne struje. „ Na primjer , kada se govori da strujni trafo ima razred točnosti 0,5 posto, to potvrđuje da je kod nazivne struje primara najveća dopuštena pogreška 0,5 posto. Međutim ako je, struja primara niža od nazivne, odnosno viša od 120 posto nazivne, strujna pogreška će biti i viša. Tako za strujni trafo razreda točnosti 0,5 posto dozvoljena je greška od 0,75 posto ako je struja primara 20 posto nazivne, odnosno 1 posto ako je struja primara 10 posto nazivne. “ 6)

Ništa nije zajamčeno kod slučaja struje primara koja je niža od 10 posto nazivne (inducirane) vrijednosti, radi čega se to uzima u obzir pri odabiru strujnog transformatora. Pogreška strujnog transformatora također ovisi o opterećenju koje kreiraju mjerni, zaštitni i pokazni instrumenti spojeni na sekundaru instrumenta. Ako je opterećenje niže za razliku od nazivnog (naznačenog na pločici strujnog trafo-a), strujna greška će biti viša od obilježenog razreda točnosti.

Prema pravilnicima IEC strujna greška se mora nalaziti unutar granice razreda točnosti za sekundarna opterećenja od 1/4 do 4/4 nazivne (inducirane) jačine strujnog trafo-a. Radi toga moramo pripaziti prilikom odabira strujnog trafo-a, jer nova digitalna zaštitna oprema i digitalni instrumenti imaju drastično niže trošenje jalove energije i djelatne od prošle elektroničke opreme. Stoga, točnost ovisi o faktoru snage sekundarnog opterećenja i prema pravilnicima IEC razred točnosti vrijedi do 0,8. Vrijednosti razreda točnosti strujnog trafo-a standardizirane su i imaju sljedeće vrijednosti: 0,1%, 0,2%, 0,5%, 1% i 3 posto. 7)

Razredi točnosti koje smo naveli strujnog trafo-a odnose se na strujne trafo-e za mjerenje. Strujni trafo-i koji se koriste za relejnu zaštitu posjeduju drugi sustav označavanja. Treba spomenuti da se strujni trafo-i mogu izraditi zasebno, te najčešće kao dio jednog strujnog trafo-a s dvije jezgre.

Radi toga prva jezgra posjeduje zasebni namot sekundara (za mjerenje, na primjer), dok druga jezgra jednakog strujnog trafo-a posjeduje tercijarni namot za zaštitu releja. Za mjernu jezgru

naznačena je vrijednost struje primara od 5 ampera, te za prolazak visokih struja kroz namot primara u slučaju ks i preopterećenja u primarnom krugu. Zaštitne jezgre moraju posjedovati veliku točnost i kod struja koje su 10 puta veće od obilježene struje primara u odnosu na mjerne jezgre.

Njihovi razredi točnosti označene su na sljedeći oblik: nPk, gdje je n broj koji označava postotak pogreške koju je napravio strujni trafo pri struji koja je k puta veća od obilježene struje primara. Dakle, imamo strujni trafo razreda točnosti 0,5 5P10, što nam otkriva da strujni trafo posjeduje najmanje dvije jezgre, mjerni namot sekundara klase točnosti 0,5% na jednoj jezgri i tercijarni zaštitni namot na drugoj jezgri, koji stvara struju. pogreška od 5% prilikom struja deset puta višim od nazivne . Primarni namot prirodno pokriva obje ove jezgre. 7)

### 4.3. Snaga SMT-a

„Budući da je elektromotorna snaga inducirana u namotu sekundara jednaka gdje je:

- broj zavoja sekundara,
- obilježena frekvencija
- presjek jezgara,
- magnetna indukcija u jezgri,“

Strujni transformatori rade s malom vrijednošću indukcije  $\{ B \}$ - kako bi se održala što veća točnost, a povećanje sile strujnog trafo-a ostvaruje se porastom poprečnog presjeka jezgre  $\{ a \}$ -. To posebno vrijedi za zaštitne jezgre, koje kod najniže struje trebaju sadržavati vrlo mali tok također i magnetsku indukciju kako ne bih došlo do preopterećenja kod struja kvara koje smiju postati 10 puta više od standardnih. Radi toga vrijedi načelo ako je viša jezgra i viša sila, veći i teži će biti strujni trafo. Snaga strujnih niskonaponskih trafo-a je uobičajeno 5VA, 10VA ili 15 voltampera. 10)

Pri izboru snage strujnog trafo-a, izuzev jačine instrumenta prilikom priključenja, potrebno je još uzeti u obzir duljinu spojnih vodova od strujnog trafo-a do uređaja koji ga napaja. Ukoliko su ti vodovi poprilično dugi, trebali biste preispitati uvećanje nazivne jačine strujnog trafo-a ili smanjenje nazivne struje sekundara sa 5 ampera na 1 amper. Također, naime kao što je

prethodno navedeno, morali bi znati da preopterećen strujni trafo može sadržavati veću strujnu pogrešku nego što je dopuštena razredom točnosti .

#### **4.4. Faktor sigurnosti SMT-a**

Najčešći element strujnog trafo-a je sigurnosni faktor. SMT konstruiran je na način da je u mogućnosti stalno raditi s 20 posto višom strujom od propisane. Daljnjim povećanjem struje primara strujni trafo dopijeva u preopterećenje, zato što se njegova mjerna pogreška povećava. Treba napomenuti da se ne može spriječiti porast struje primara preko 120 posto nazivne vrijednosti. 7)

Zasićenja i KS su nepredvidivi događaji u mreži, pa je njihovo sprječavanje nemoguće. Kvaliteta zaštite regulira kojom će se brzinom ti događaji zatvoriti u mreži. Potrebno je bilo kojom metodom zaštititi uređaje koji su priključeni na sekundar kojemu je označena struja obično 5 ampera. Budući da, kao što je već spomenuto, ST sekundar mora biti zatvoren, zaštita topljivim osiguračem je nedopustiva.

Sustav sigurnosti je iskoristivost prirodne karakteristike jezgara da prilikom porastu struje magnetizacije površ specifične razine svojstvo magnetiziranja uđe u preopterećenje.

Prema tome načinu povećava se pogreška strujnog trafo-a, što je i bolje jer je struja sekundara zbog toga niža, dok bi u slučaju da je jezgra magnetski linearna bila veća.

Nadstrujni broj ili sigurnosni faktor strujnog trafo-a označava relativnu vrijednost struje primara u odnosu na vrijednost navedenu na natpisnoj pločici kada strujna pogreška nadmašuje 10 posto. Mora se spomenuti da je ovaj faktor određen samo za mjernu jezgru i za nominalno opterećen strujni trafo, dok za zaštitnu jezgru, kao što je prije spomenuto, čak i pri struji puno većoj od nazivne, zasićenje se također ne smije pojaviti pod strujom. 7)

stanje smt-a u dijelu preko nazivne struje dokazuje nadstrujna komponenta. Potrošači koji su priključeni na sekundarnu stranu smt žele da se povećanje struje primara ne linearno reflektira na struju sekundara, iz razloga što bi ks uzrokovao štetu na mjernim uređajima. Dok preostali potrošači žele linearno “pravo“ reflektiranje primarne struje na struju sekundara, a to su zaštitni releji koji služe za različite kako bi mogli pravovremeno reagirati prilikom ks-a.



## 5. MJERENJE ISTOSMJERNE STRUJE

### 5.1. Strujni transformator za mjerenje istosmjerne struje

Mjerni strujni transformator za istosmjernu struju (CT) mogu biti pod jakim utjecajem istosmjerne komponente u izmjerenoj struji. Ovo je postao ozbiljan problem jer su istosmjerne struje vrlo česte u električnoj mreži. Povijesno gledano, stvaraju ih Geo magnetske oluje. Međutim, u posljednjem desetljeću sve češće nastaju iz pretvarača bez transformatora, koji su postali standard u solarnim i vjetroelektranama. 1)

Komponenta istosmjerne struje ovih pretvarača obično se kompenzira povratnom spregom kojom upravlja senzor istosmjerne struje. Većina ovih senzora su uređaji s Hallovim efektom, koji imaju veliki pomak s temperaturom i vremenom, što dovodi do kvara DC kompenzacije. Značajnu istosmjernu komponentu uzrokuju i polovični ispravljači, kojima varaju kupce kako bi smanjili račune za struju. U ovom slučaju, komponenta istosmjerne struje je 60% od I (50 Hz).

Bipolarna saturacija CT-a može se detektirati numerički, a informacije o primarnoj struji mogu se obnoviti različitim softverskim tehnikama i hardverskim tehnikama. Samo je mali broj autora primijenio slične tehnike za slučaj unipolarne saturacije. 2)

U ovom poglavlju definiraju se postojeće tehnike za povećanje otpora istosmjerne struje CT-ova i predstavljamo metodu za suzbijanje istosmjerne magnetizacije hardverskom povratnom spregom.

Tolerancija istosmjerne struje je dobro poznati problem kod kućnih mjerača električne energije koji se može manipulirati polovičnim ispravljanjem na strani potrošača. CT-ovi otporni na istosmjernu struju koriste dvije tehnologije:

Kompozitna jezgra transformatora koja se sastoji od jezgre visoke propusnosti i jezgre visokog zasićenja. Pokazano da ove jezgre mogu otkazati ako je faktor snage znatno niži od 1. Taj se učinak može samo djelomično kompenzirati numeričkom korekcijom faznog kašnjenja.

Jezgre visokog zasićenja izrađene žarenjem nanokristalnih traka pod stresom. Naponsko žarenje može se izvesti na namotanim jezgrama ili kontinuirano na vrpici prije namotavanja, unatoč krutosti nanokristalnih materijala. Žarenje pod stresom uvodi anizotropiju s laganom osi

okomitom na duljinu trake. Ovo smanjuje koercitivnost i permeabilnost, čini karakteristike magnetizacije linearnim i povećava polje zasićenja.

Zbog svoje niske propusnosti, ove jezgre pokazuju veliku faznu pogrešku reda veličine  $5^\circ$ . Međutim, zbog velike linearnosti jezgri, propusnost je konstantna pa je fazna pogreška konstantna u širokom rasponu izmjerenih struja. Konstantna fazna pogreška može se lako kompenzirati do konačne točnosti od  $0,05^\circ$ . 1)

Međutim, ovdje spomenute tehnike ne koriste se za konstrukciju većih CT-ova. Proizvođači obično ne dokumentiraju utjecaj komponente istosmjerne struje na točnost većih CT-ova, a na tu temu objavljen je samo mali broj radova.

Pokazat će se učinkovit način mjerenja istosmjernih struja u elektroenergetskoj mreži zaštitom strujnih transformatora, koji su već instalirani unutar cijele mreže. Ovo je, u nekim slučajevima, poželjno rješenje, uzimajući u obzir troškove i poteškoće povezane s instaliranjem novih magnetskih ili optičkih senzora istosmjerne struje na visokonaponskim vodovima i distribucijskim stanicama.

Nedavno je pokazano da je upotrebom uzbudnog transformatora niske impedancije i ručne kompenzacije moguće zadržati  $0,1\%$  točnosti mjerenja izmjenične struje ovih strujnih transformatora. Međutim, cilj povratne kompenzacije komponente istosmjerne struje suočava se s problemima stabilnosti. Glavni problemi ovdje su:

- Velika nelinearnost i histereza CT-a kada je prisutna istosmjerna struja.
- Izmjerene frekvencije i frekvencije pobudne struje su u neposrednoj blizini, tako da ih je teško razdvojiti analognim filtrom - filter mora biti strm, što pomiče fazu i ugrožava stabilnost. 2)

Automatska kompenzacija istosmjernog toka moguća pomoću digitalne povratne sprege. Također pokazujemo da se istosmjerno kompenzirani CT može napraviti s jednim namotom i bez pobudnog transformatora. Dizajn našeg uređaja stoga je jednostavniji od dvojezgrenog rješenja.

Mjerenja su vršena su na dva strujna transformatora:

- Široko korišten mjerni CT s jezgrom izrađenom od orijentiranog silicijskog čelik
- CT s nanokristalnom jezgrom niske remanencije. 2)

Prvo provjeravamo toleranciju na istosmjernu struju oba transformatora i kako rade u fluxgate modu. Na temelju ovog benchmarkinga odabiremo jednog od njih za konačni uređaj.

## 5.2. Primjeri mjernih transformatora

Obični CT1 strujni transformator tipa CLA 2.2 (MT Brno, Češka Republika) ima omjer struje od 500 A/5 A i nazivno izlazno opterećenje od 5 VA, što odgovara nominalnom opterećenju od 0,2  $\Omega$ . Za ovo opterećenje pogreška je ispod 0,1% od 5% do 120% nazivne primarne struje (FS) od 500 A. U mjerenjima opterećuje se ovaj CT pomoću senzorskog otpornika od 0,1  $\Omega$  kako bismo kompenzirali dodatne impedancije u mjernom krugu. Ovaj CT predstavlja klasu jeftinih uređaja srednjih performansi. Glavni nedostatak je visoka remanencija, koja dovodi do fatalne pogreške nakon što se CT magnetizira istosmjernom strujom. 1)

Slika 3. Prikaz mjernog uređaja CLA 2.2. Brno. 16)



Drugi transformator, CT2, s jezgrom od nanokristalnog materijala, predstavnik je visokoučinkovitih uređaja. Jezgra  $140/100 \times 20$  mm koju proizvodi NPAY ima visoku propusnost, nisku koercitivnost i nisku remanenciju. Zbog toga se može lako oporaviti od istosmjerne magnetizacije, čak i s niskom izmjerenom izmjeničnom strujom.

Ovaj transformator ima omjer struje od 500 A/1 A i nazivno izlazno opterećenje od 1 VA, što odgovara nominalnom opterećenju od 1  $\Omega$ . Manje izlazno opterećenje ovog transformatora prati tendenciju uređaja za korištenje kao elektronička mjerila snage i energije.

### **5.3. Tolerancija istosmjerne struje**

Kako bi se usporedilo oba izmjerena transformatora, prvo smo izmjerili utjecaj istosmjerne struje na njihovu točnost. Točnost je ispitana usporedbom CT-a s komparatorom struje Tettex 4764 (Tettex Instruments, Haefely Test AG, Basel, Švicarska), koristeći diferencijalnu metodu. Mjerenje pogreške izvršeno je SRS 830 digitalnim zaključanim pojačalom (Stanford Research Systems, Inc., Sunnyvale, CA, SAD). Točnost ove metode potvrđena je neovisnim mjerenjem korištenjem testnog seta Tettex 2767 automatskog transformatora (Tettex Instruments, Haefely Test AG, Basel, Švicarska). 1)

Istosmjerna struja je simulirana vanjskim namotom od 15 zavoja. Kako bi se spriječilo opterećenje transformatora malom impedancijom istosmjernog izvora, istosmjerni izvor je izmjenično rastavljen pomoću prigušnice s velikim induktivitetom.

Učinak velike istosmjerne struje je razoran: istosmjerna struja od 50 A u CT1 može uzrokovati 10% do 40% pogreške u mjerenju struje i snage. Pogreška amplitude za dati IDC smanjuje se s povećanjem izmjerene izmjenične struje. To je uzrokovano smanjenjem relativne asimetrije procesa magnetiziranja. Za AC oko 100 A pogreška doseže minimum, a za veće AC struje ponovno raste. To je vjerojatno uzrokovano ograničenjima snage našeg pojačala. 2)

#### **5.4. Princip i dizajn transformatora za mjerenje istosmjerne struje**

U ovom radu predstavljamo DC/AC strujni transformator s kompenzacijom povratne sprege temeljen na CT1 kako bismo pokazali potencijal našeg rješenja za poboljšanje performansi jeftinog CT-a.

Ova struja ima istosmjernu komponentu koja uzrokuje istosmjerni magnetski tok u jezgri. Mjerimo ovaj istosmjerni tok korištenjem principa fluxgate pomoću zaključanog pojačala 1 kao što je opisano u prethodnom odjeljku. CT se pobuđuje KEPCO BOP 50-8M pojačalom snage. Ovo pojačalo snage je istosmjerno spregnuto, a služi i za kompenzaciju istosmjerne komponente toka.

#### **5.5. Odziv istosmjerne struje**

Struja povratne kompenzacije kao funkcija izmjerene istosmjerne struje, karakteristika je prilično linearna, ali osjetljivost značajno opada za izmjerene izmjenične struje veće od 100 A. Utvrđeno je da ovaj učinak snažno ovisi o impedanciji u primarnom krugu. U standardnoj postavci ispitivanja, impedancija na 370 Hz u primarnom krugu testiranog CT-a je samo 9 mΩ. Ova impedancija je izračunata kao omjer primarnog napona od 0,408 V/370 Hz i primarne struje od 43,9 A/370 Hz). U ovom slučaju, CT radi praktički u načinu strujnog transformatora u obrnutom smjeru, tako da se pobudna struja ubrizgana u sekundarni namot transformira u vrlo veliku struju (obično 50 do 100 A) u primarnom krugu. 1)

Rezultirajući pobudni tok je vrlo malen, a istosmjerna osjetljivost jako ovisi o radnoj točki postavljenoj izmjerenom izmjeničnom strujom. Nakon što se primarna impedancija poveća, CT više ne radi u modu strujnog transformatora za pobudnu struju, pobudna struja ubrizgana u primarni krug pada ispod 1 A, a rezultirajući pobudni tok je puno veći.

Transformator je povremeno zasićen uzbudnom strujom, čak i bez izmjerene AC struje. U ovom slučaju, CT radi u odgovarajućem fluxgate modu. To čini odgovor na istosmjernu struju stabilnijim i manje ovisnim o vrijednosti izmjenične struje.

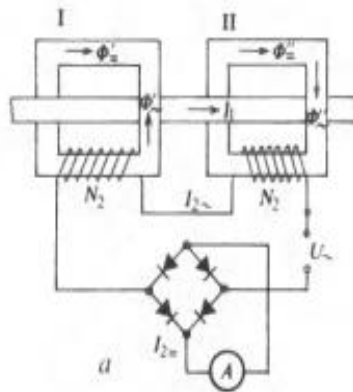
## 6. Metode mjerenja velikih istosmjernih struja

Zbog značajnih gubitaka u mjernom otporu, metoda mjerenja velikih istosmjernih struja pomoću šantova nije prikladna. Pri uobičajenom naponu šanta od 60 mV i struji od 10 kA dolazi do gubitka od 600 W, što otežava konstrukciju šanta, pa se većina metoda mjerenja velikih istosmjernih struja danas temelji na principu magnetskih transduktora.

### 6.1. Strujni transformator istosmjerne struje

Vod kojim prolazi mjerena struja  $I_1$  teče kroz 2 jezgre kvalitetnog magnetskog sadržaja sa gotovo pravokutnom krivuljom magnetiziranja. Sekundarni namoti su namotani oko jezgara i povezan je serijski na konstantni izmjenični napon  $U$ . U jednoj jezgri se izmjenični tok  $\Phi_{12}$ , koji je izazvan zajedničkom strujom  $I_2$  obaju sekundara, protivi toku  $\Phi =$  struje  $I_1$ , a u drugoj jezgri podudara s njim.

Slika 4. Prikaz strujnog transformatora istosmjerne struje (17)



Jezgra je prethodno magnetizirana do indukcije zasićenja primarnom strujom  $I_1$ . Izmjenični napon  $U$  inducira izmjeničnu indukciju  $B \sim$  u sekundarnim namotajima, čiji poluciklusi naizmjenično izvlače jednu jezgru iz zasićenja i tjeraju drugu jezgru dublje u zasićenje. Zbog izbacivanja jezgre iz zasićenja struja  $I_2$  teče kroz sekundarni svitak, kako bi se poništio amperzavoj  $I_1 N_1$  koji jezgru drži u zasićenju. Za idealnu pravokutnu prirodu jezgre vrijedi sljedeća jednakost:

$$I_1 N_1 = I_2 N_2,$$

a struja  $I_2$  ima pravokutni valni oblik.

Odstupanja karakteristika jezgre od idealnih rezultiraju pogreškom  $p_i$  srednje vrijednosti izmjerene sekundarne struje. Za ovu metodu granica pogreške je između 1 i 10 posto. Promjena priključenog izmjeničnog napona, primjerice od 10 posto, ne utječe značajno na rezultat mjerenja.

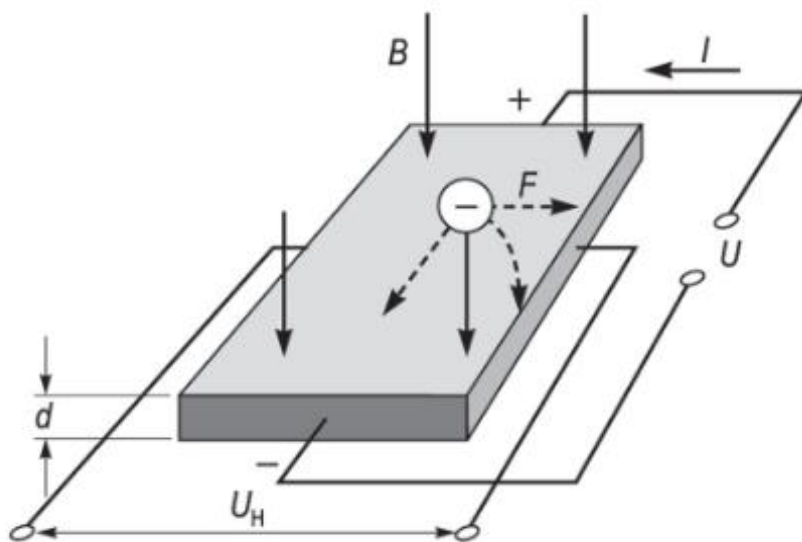
## 6.2. Mjerenje velikih istosmjernih struja strujnim jarmom i Hallovom sondom

Metoda rabi pretvornik magnetske indukcije u napon – Hallovu sondu. Hallova sonda je poluvodička pločica “uzdužno” protjecana upravljачkom strujom  $I$ . Uz prisustvo magnetskog polja indukcije  $B$  okomito na pločicu, sile na naboj u gibanju uzrokuju pojavu Hallova napona  $U_H$  na “poprečnoj” strani pločice:

U ovoj metodi koristi se Hallova sonda, pretvarač magnetske indukcije u napon. To je poluvodička pločica kojom “uzdužno” protječe upravljачka struja  $I$ . Sile na naboj u gibanju, uz prisustvo magnetskog polja indukcije  $B$  okomito na pločicu, uzrokuju Hallov napon  $U_H$  na “poprečnoj” strani pločice:

$U_H = R_H \frac{B I}{d}$ , gdje je  $R_H$  Hallova konstanta koja ovisi o materijalu pločice, a  $d$  debljina pločice.

Slika 5. Prikaz Hallove sonde. 18)



Izmjerena struja  $I_1$  protječe u vodiču koji ide kroz prozor željezne jezgre. U zračnoj pukotini jezgre nalazi se jedna ili više Hallovih sondi. Kako je indukcija  $B$  proporcionalna struji, i Hallov napon joj je proporcionalan uz konstantnu upravljačku struju. Na isti način moguće je izmjeriti i istosmjernu struju veće od 100 kA, te uz dobru linearnost Hallova pretvornika granice pogrešaka ne prelaze 1 posto.

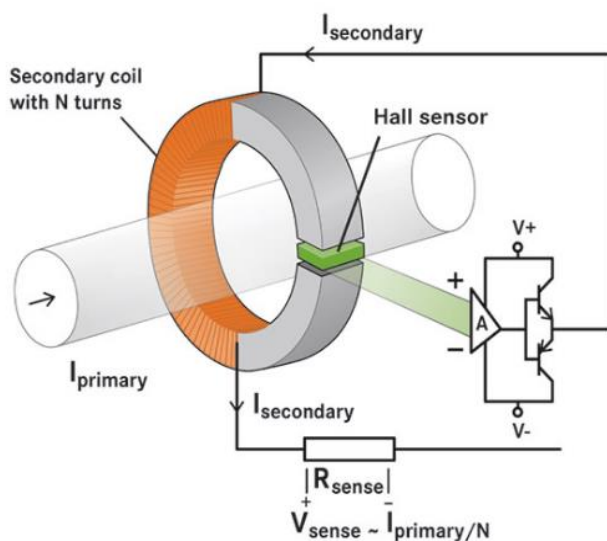
### 6.3. Tehnika mjerenja istosmjernih struja velikih vrijednosti pomoću strujnog jarma sa magnetski tokom koji je kompenziran

Pomoćni svitak kojim teče kompenzacijska struja  $I_s$  je namotan oko jezgre i spojen na izvor struje kojim upravlja Hallov pretvornik. Indukcija  $B$ , koju u jezgri stvara mjerena struja  $I_p$  na pretvorniku zauzvrat inducira Hallov napon.  $U_H$  prilikom ulaska u operacijsko pojačalo  $A$  stimulira kompenzacijsku struju  $I_s$  te njome prema nuli smanjuje tok u jezgri. Samougodivo obilježje povratne sprege postignute preko sekundarne struje uzrokuje sinergiju u kojoj je  $U_H = 0$ , a sekundarni amper zavoji isti primarnima:

$I_p N_p = I_s N_s$  Izravna preslika primarne struje  $I_p$  dobiva se mjerenjem sekundarne struje  $I_s$ :

$I_s = \frac{I_p}{N_s}$ , za  $N_p = 1$ . Točnost metode ne ovisi o linearnosti Hallovog pretvornika jer on radi u području ništičnog toka. 13)

Slika 6. Prikaz strujnog jarma sa kompenziranim magnetskim tokom. 19)





#### 6.4. Magnetooptički strujni transformator

Magnetooptički strujni transformator temelji se na Faradayevom učinku: polarizacijska ravnina zrake svjetlosti proporcionalno se rotira jačini magnetskog polja koje djeluje u pravcu zrake svjetlosti. Kut zakretanja zrake  $\alpha$  iznosi:

$$\alpha = C \ell H$$

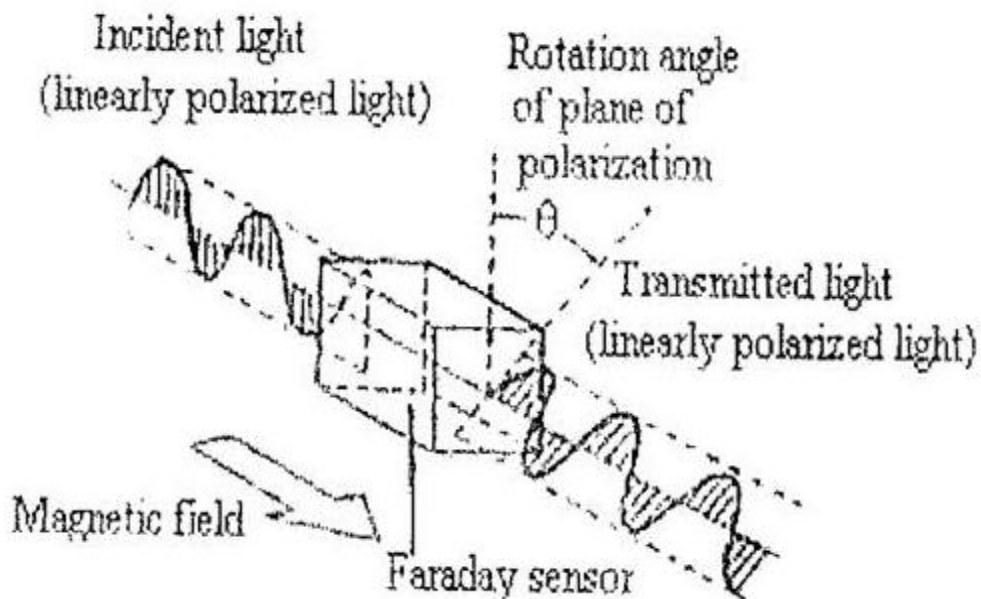
, gdje je C Verdetova konstanta optičkog materijala kroz koji prolazi svjetlosna zraka i na koji djeluje polje,  $\ell$  duljina tog materijala u smjeru zrake, a H je jakost magnetskog polja u smjeru zrake. Rotaciju polarizacijske ravnine zbog Faradayevog učinka analizator pretvara u promjenu jakosti svjetlosti I:

$$I = I_m \cos^2(\delta - \alpha)$$

, gdje je  $\delta$  kut između polarizacijskih ravnina polarizatora i analizatora.

Mjerenjem jakosti svjetlosne zrake može se odrediti jakost polja H, a time i struja koja teče kroz namot. Prednost ove metode je to što nema gubitaka ni zasićenja željezne jezgre, dobra je visokonaponska izolacija sekundarnog kruga, visoka je točnost mjerenja struje u rasponu od 1 A do 10 kA, te lagana konstrukcija transformatora bez izolacijskog ulja ili plina. 13)

Slika 7. Prikaz magnetooptičkog strujnog transformatora. 20)



## 7. ZAKLJUČAK

U radu je obrađena tematika vezana uz strujne transformatore za mjerenje istosmjerne struje. Češća pojava od ove je mjerenje izmjenične struje jer se ona češće koristi. Strujni transformatori se uvelike koriste za mjerenje struje i praćenje rada električne mreže. Zajedno s naponskim vodovima, CT-ovi koji se temelje na prihodima pokreću brojilo vat-sati električnog poduzeća na mnogim većim komercijalnim i industrijskim zalihama.

Istosmjerna struja može se preoblikovati u izmjeničnu struju putem pretvarača. Korištenjem ispravljača istosmjerna struja može se pretvoriti iz izvora izmjenične struje. Taj ispravljač mora imati elektromehaničke značajke ili elektroničke značajke koji bi dopustili da struja prolazi samo u jednom pravcu.

Istosmjerna struja sadrži mnogo namjena, od viših izvora napajanja za elektroničke sustave do punjenja baterija. Vrlo velike količine električne energije dobivene putem istosmjerne struje koriste se u topljenju aluminija i drugim elektrokemijskim procesima.

Strujni transformator ima primarni namot, jezgru i sekundarni namot, iako neki transformatori, uključujući strujne transformatore, koriste zračnu jezgru. Iako su fizikalni principi isti, detalji "strujnog" transformatora u usporedbi s transformatorom "napona" će se razlikovati zbog različitih zahtjeva primjene. Strujni transformator je dizajniran da održava točan omjer između struja u svom primarnom i sekundarnom krugu u definiranom rasponu.

Precizni strujni transformatori trebaju blisku vezu između primarne i sekundarne kako bi se osiguralo da je sekundarna struja proporcionalna primarnoj struji u širokom rasponu struje.

## **SAŽETAK**

U ovom završnom radu obradit ćemo tematiku vezanu uz transformatore za mjerenje velike istosmjerne struje. Predstaviti ćemo pojam same istosmjerne struje i mjernih transformatora te objasniti na koji način se pomoću transformatora mjeri istosmjerna struja. Obrazložiti ćemo na kojem principu rade takvi transformatori i njihovu funkcionalnost. Zatim, usporediti ćemo i navesti različite izvedbe transformatora za mjerenje istosmjerne struje, a nakon toga navesti i njihove parametre te pogreške pri mjerenju.

## **ABSTRACT**

In this final paper, we will consider measuring transformers for a large direct current. We will introduce the concept of direct current itself and measuring transformers, and also explain how direct current is measured using transformers. We will explain the principle on which such transformers work and their functionality. Furthermore, we will compare and list different performances of transformers for measuring direct current, and then list their parameters and measurement errors.

## LITERATURA

- 1) Bachinger F., Hackl A., Hamberger P., Leikermoser A., Leber G., Passath H., Stoessl M. (2013) Direct current in transformers: Effects and compensation. *Elektrotech. Inform.*
- 2) Buticchi G., Lorenzani E., Franceschini G. (2011) A DC Offset Current Compensation Strategy in Transformerless Grid-Connected Power Converters. *IEEE Trans. Power Deliv.* str. 2743–2751
- 3) Dolenc, A. (1991) Transformatori, 1 i 2 dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb,
- 4) Harlow, J. H. (2012) Electric power transformer engineering, 3. Izdanje, CRC press,
- 5) Kalea, M. (2008) Prijenos električne energije, što je to. Zagreb: Kigen.
- 6) Krarti, M. (2017) Energy-Efficient Electrical Systems for Buildings, CRC Press,
- 7) Maljković, Z. (2015) Teorija električnih strojeva i transformatora, Mjerni transformatori, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2015
- 8) Ožanić, B. (2016) Sigurnost u primjeni električne energije, Karlovac,
- 9) Pinter, V. (1999) Osnove elektrotehnike (knjiga druga), ITP „Tehnička knjiga“ D.D. – Zagreb
- 10) Skalicki, B. Grilec, J. (2011) Električni strojevi i pogoni, Zagreb,
- 11) Tačković, K., Glavaš, H. Petrović, I. (2014) Energetska učinkovitost transformatora, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije – HO CIRED, 4. (10.) savjetovanje, Trogir/Seget Donji, 2014.
- 12) Tanasković, M., Bojković, T., Perić, D. (2007) Distribucija električne energije. Beograd: Elektroprivreda Srbije.
- Winders, J. J. (2002) Power Transformers Principles and Applications, PPL Electric Utilities, Allentown, Pennsylvania.
- 13) Bego, V. (1977) Mjerni transformatori, Posebne vrste mjernih transformatora, Školska knjiga, Zagreb, 1977.
- 14) Slika 1: <https://hr.your-best-home.net/7368008-voltage-types-and-currents>
- 15) Slika 2: <https://www.poslovni.hr/domace/strujni-mjerni-transformator-aku-24-novi-clan-obitelji-koncar-mjernih-transformatora-259077>
- 16) Slika 3: <https://www.mtbrno.cz/www/soubory/katalog-vyrobku.pdf>
- 17) Slika 4: [https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/mjerni\\_transformatori.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/mjerni_transformatori.pdf)
- 18) Slika : <https://tehnicki.lzmk.hr/clanak.aspx?id=2372>

19) Slika 6: <https://www.elektroprumysl.cz/merici-technika/proudove-senzory-vyuzivajici-halluv-jev>

20) Slika

7: <https://www.seminaronly.com/electronics/Magneto-optical%20current%20transformer%20technology.php>

## **ŽIVOTOPIS**

Marko Juzbašić rođen je 10.01.2000. godine u Vinkovcima. Stanuje u Bošnjacima gdje je i pohađao „Osnovnu školu fra Bernardina Tome Leakovića“. Nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja 2014.g. upisuje Tehničku školu u Županji, smjer elektrotehničar. Godine 2019. upisuje stručni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.