

Mjerni Transformatori

Medić, Andrija

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:324422>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

MJERNI TRANSFORMATORI

Rijeka, Rujan 2024.

Andrija Medić

0069089792

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

MJERNI TRANSFORMATORI

Mentor: prof. dr. sc. Dubravko Franković

Rijeka, Rujan 2024.

Andrija Medić

0069089792

Rijeka, 13. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**
Predmet: **Električna postrojenja**
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Andrija Medić (0069089792)**
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike

Zadatak: **Mjerni transformatori / Instrument transformers**

Opis zadatka:

Strujni i naponski mjerni transformatori namijenjeni su transformaciji primarnih veličina struja i napona na vrijednosti prikladne za priključak na zaštitne, regulacijske i mjerne uređaje u električnim postrojenjima. U radu je potrebno obraditi fizikalno načelo rada mjernih transformatora, nadomjesne sheme, ponašanje mjernih transformatora u pogonu te izbor mjernih transformatora. Prikazati uobičajene izvedbe mjernih transformatora (strujni, naponski i kombinirani) za primjenu na srednjem i visokom naponu te suvremene trendove u razvoju mjernih transformatora (nekonvencionalni mjerni transformatori).

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

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

Prof. dr. sc. Dubravko Franković

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

Prof. dr. sc. Dubravko Franković

IZJAVA

Završni rad „Mjerni transformatori“ napisan je potpuno samostalno pod vodstvom prof. dr. sc. Dubravka Frankovića, koristeći znanje koje sam stekao tijekom studiranja i uz korištenje navedene literature.

Rijeka, Kolovoz 2024.

Andrija Medić

0069089792

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆENITO O TRANSFORMATORIMA	2
2.1. Označavanje stezaljki mjernih transformatora	4
3. NAPONSKI MJERNI TRANSFORMATORI	6
3.1. Priključivanje na mrežu	7
3.2. Izvedbe naponskog mjernog transformatora	8
3.2.1. Transformator jezgrastog tipa	9
3.2.2. Transformator ognutog tipa	10
3.3. Kapacitivni naponski transformatori	12
3.4. Induktivni naponski transformatori	13
4. STRUJNI MJERNI TRANSFORMATORI	14
4.1. Spajanje na mrežu	16
4.2. Podjela strujnih mjernih transformatora	17
4.3. Upotreba strujnih mjernih transformatora	18
5. IZBOR MJERNIH TRANSFORMATORA	21
5.1. Izbor naponskih mjernih transformatora	21
5.2. Izbor strujnih mjernih transformatora	23
6. KOMBINIRANI MJERNI TRANSFORMATORI	31
6.1. Kombinirani mjerni transformator izoliran SF6 plinom	31
7. NEKONVENCIONALNI MJERNI TRANSFORMATORI	32
7.1. Optički kabel	35
7.2. Optički senzori	36
7.3. Rogowski svitak	37
8. ZAKLJUČAK	39
LITERATURA	40
POPIS SLIKA	42
POPIS TABLICA	43
SAŽETAK	44
ABSTRACT	45

1. UVOD

Prilikom mjerenja napona i struja u visokonaponskim postrojenjima dolazimo do problema zbog visokih napona, struja i problema izolacije mjernih uređaja. Rješenje tih problema su naponski i strujni mjerni transformatori.

Transformatori su električni uređaji visoke efikasnosti čija je glavna zadaća u elektroenergetskom sustavu mijenjanje veličine napona dovedenog na primarnu stranu energetskog transformatora na željenu veličinu napona na sekundarnoj strani transformatora. Dobivena veličina na sekundaru je vrijednosti točno takve kakvu zahtijevamo za prijenos, distribuciju i potrošnju električne energije.

Mjerni transformatori igraju ključnu ulogu u prilagodbi visokih napona i struja na razine koje su poželjne za mjerenje i zaštitu uređaja. Ovi transformatori sastoje se od jezgre izrađene od magnetskog materijala, oko koje su namotani namot primara i sekundara. Ovi namoti su galvanski odvojeni te izolirani jedan od drugog, čime se osigurava sigurno funkcioniranje transformatora. Mjerni transformatori su specijalizirani uređaji s vrlo širokom primjenom; koriste se za transformaciju pogonskih struja i napona na razine koje omogućuju priključak na zaštitne, regulacijske i mjerne uređaje u električnim sustavima.

Direktno priključivanje uređaja za mjerenje i zaštitu na visokonaponske vodove nije izvedivo zbog visokih troškova i potrebe za vrlo skupim mjernim instrumentima. Kako bi se izbjegli takvi troškovi i tehničke prepreke, primjenjuju se mjerni transformatori koji smanjuju struje na 5 A ili 1 A te napone na $100/\sqrt{3}$ V, $200/\sqrt{3}$ V, 100 V i 200 V. Uz to što obavljaju funkciju smanjivanja vrijednosti, mjerni transformatori također pružaju izolaciju, čime štite mjerne instrumente od visokih napona i omogućuju njihovu sigurnu upotrebu.

Cilj rada je obraditi fizikalno načelo rada mjernih transformatora, nadomjesne sheme, ponašanje mjernih transformatora u pogonu te izbor mjernih transformatora. Potrebno je prikazati uobičajene izvedbe mjernih transformatora (strujni, naponski i kombinirani) za primjenu na srednjem i visokom naponu te suvremene trendove u razvoju mjernih transformatora to jest nekonvencionalne mjerne transformatore.

2. OPĆENITO O TRANSFORMATORIMA

Primarna funkcija transformatora jest konverzija ulaznog napona ili struje u vrijednosti koje su poželjne na sekundarnoj strani to jest izlazu, pri čemu se trudi očuvati gotovo konstantan prijenosni omjer za koji je transformator projektiran, uz minimalni fazni pomak.

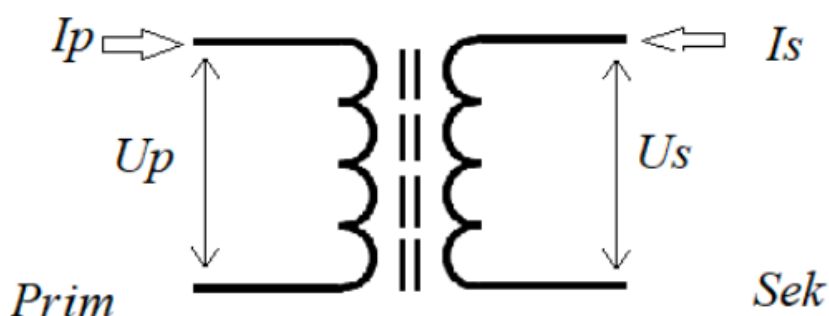
U praksi ne postoji transformator koji bi u svim uvjetima održao savršeno konstantan omjer pretvaranja s nulnim faznim pomakom, budući da se idealni transformator, koji predstavlja teorijski model s idealnim svojstvima, ne može postići u stvarnosti.

Idealni transformator bi imao nulte naponske padove i zanemarive struje magnetiziranja jezgre, uz pretpostavku da sav magnetski tok prolazi kroz namote bez ikakvih gubitaka, što znači da bi svaka magnetska silnica bila potpuno iskorištena [1].

Prema teoriji idealnih transformatora, prijenosni omjer između primarnog napona U_1 i sekundarnog napona U_2 ostaje konstantan i proporcionalan omjeru broja zavoja primarnog N_1 i sekundarnog namota N_2 , što se može izraziti formulom:

$$U_1:U_2=N_1:N_2 \quad (3-1).$$

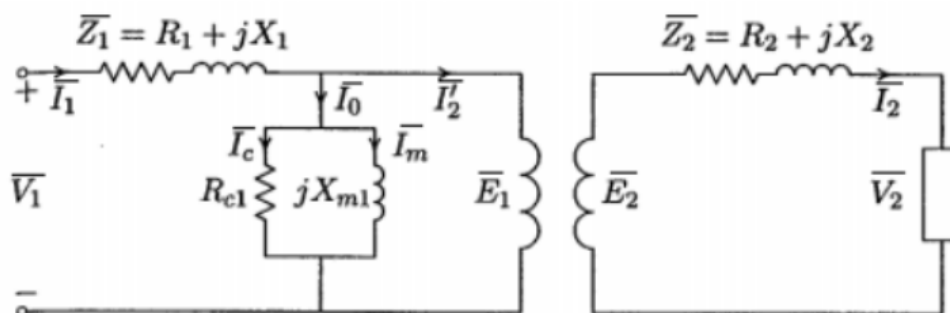
Prema ovoj relaciji, ako se zna naponska vrijednost na sekundarnim stezaljkama U_2 lako možemo izračunati primarni napon U_1 jednostavnim preuređivanjem ove jednadžbe. Na taj način, primarni napon U_1 može se izračunati kao produkt sekundarnog napona U_2 i omjera broja zavoja N_1/N_2



Slika 1: Shema idealnog transformatora.

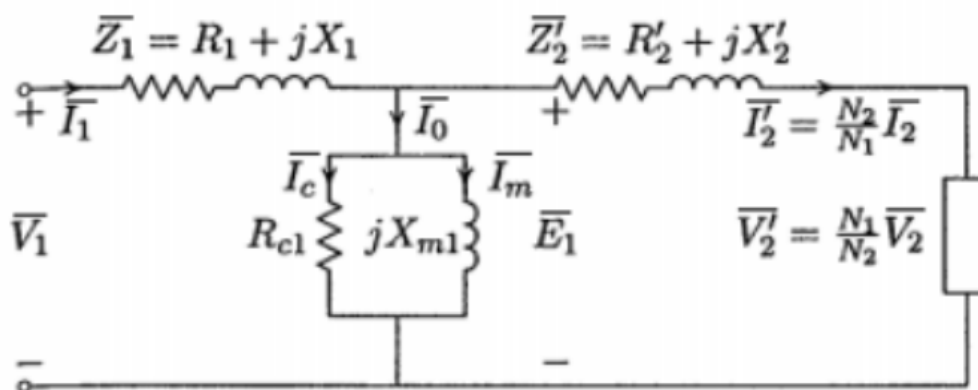
Kod realnih transformatora, primarni namot posjeduje omski otpor R_1 , dok sekundarni namot ima svoj vlastiti omski otpor R_2 . Da bismo realni transformator analizirali pomoću modela idealnog transformatora, potrebno je uključiti ove pripadajuće omske otpore u model. To znači da idealni transformator, kao teorijski model, treba biti proširen s dodatkom ovih otpora kako bi precizno

odražavao stvarne uvjete rada. Osim omskih otpora, realni transformatori također trpe gubitke uzrokovane rasipnim tokom na primarnoj strani. Ovi gubici su funkcija veličine struje koja prolazi kroz primarni namot i pojavljuju se kao posljedica nesavršenosti u magnetskom polju koje ne doprinosi korisnom prijenosu energije između namota. Takvi gubici dodatno kompliciraju rad transformatora i smanjuju njegovu učinkovitost, što je potrebno uzeti u obzir pri modeliranju i analizi realnih transformatora.



Slika 2: Shema idealnog transformatora uz realne gubitke. [1]

Utjecaj rasipnog magnetskog toka na realni transformator može se precizno modelirati uvođenjem rasipnog induktiviteta primarnog namota, označenog kao L_{10} , čime se definira rasipna reaktancija primara kao $X_{l01} = \omega L_{10}$. Ova komponenta rasipne reaktancije mora biti uključena u model idealnog transformatora kako bi se održali stvarni uvjeti rada na primarnoj strani. S obzirom na to da i sekundarna strana transformatora posjeduje namot koji doprinosi rasipnom magnetskom toku, potreban je sličan opis utjecaja na sekundarnoj strani preko rasipne reaktancije sekundara $X_{l02} = \omega L_{20}$. Osim rasipnih reaktancija, magnetska jezgra transformatora sama po sebi generira radne i jalove gubitke, koje je potrebno kompenzirati. Ovi gubici se modeliraju pomoću otpornika R_0 i reaktancije X_0 , koji se povezuju paralelno s idealnim transformatorom. Na taj način, svi aspekti stvarnog rada transformatora, uključujući i utjecaj rasipnog toka i gubitaka, adekvatno se odražavaju u modelu.

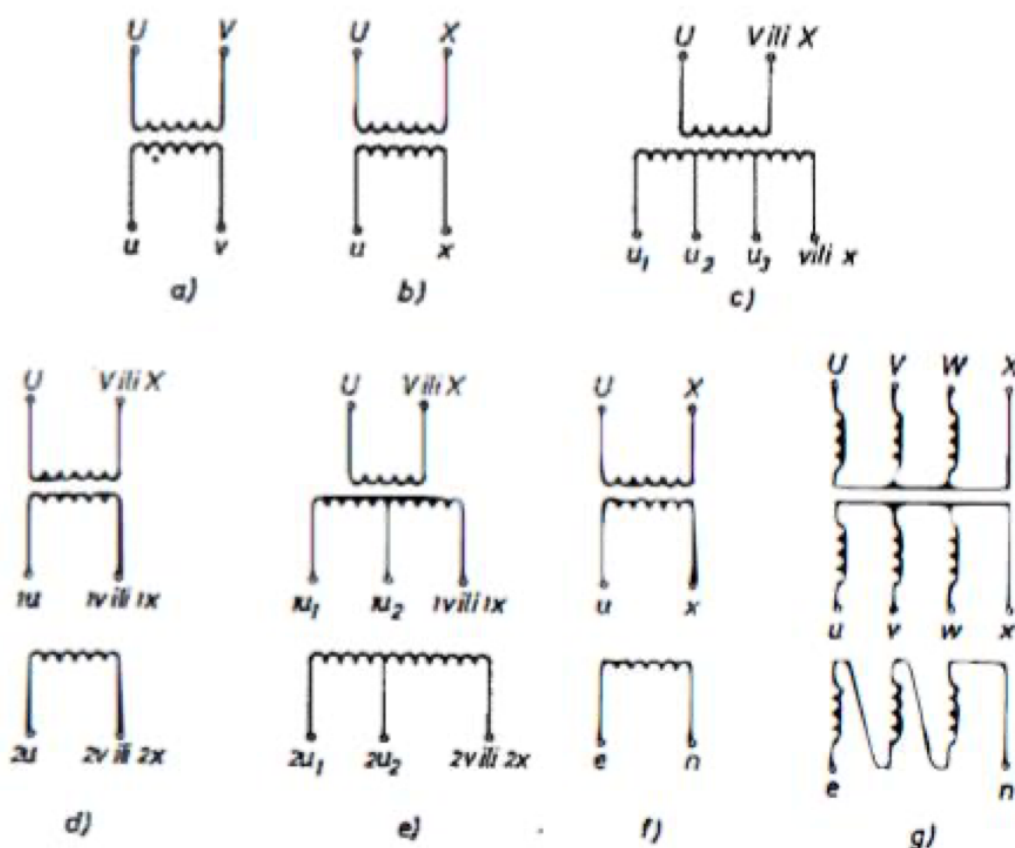


Slika 3: Nadomjesna shema realnog transformatora. [1]

2.1. Označavanje stezaljki mjernih transformatora

Stezaljke na mjernim transformatorima opremljene su preciznim oznakama koje omogućuju jasno razlikovanje između primarnih i sekundarnih namota te njihovih sekcija. Ove oznake su ključne za pravilno određivanje relativnog polariteta namota, što je od suštinskog značaja za pravilnu integraciju s mjernim uređajima kao što su voltmetri, ampermetri i brojila. Stoga je imperativ da su stezaljke označene jasno i trajno, s oznakama koje su vidljive na samoj površini stezaljki ili u njihovoj neposrednoj blizini [1].

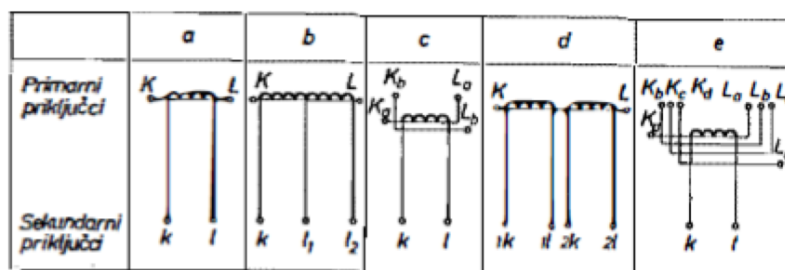
Na primarnoj strani naponskih transformatora, stezaljke su označene velikim slovima U, V, W i X, dok se na sekundarnoj strani koriste mala slova u, v, w i x, kako je ilustrirano na slici 4. Velika slova U, V i W označavaju izolirane stezaljke, dok slovo X označava stezaljku za uzemljenje. Pored toga, slova e i n koriste se za označavanje stezaljki u konfiguraciji otvorenog trokuta. Kao što je slučaj i sa strujnim transformatorima, ključno je da se polariteti stezaljki označenih velikim i malim slovima usklade kako bi se osigurala ispravna funkcionalnost cijelog sustava [18].



Slika 4: Označavanje stezaljki naponskog transformatora. [1]

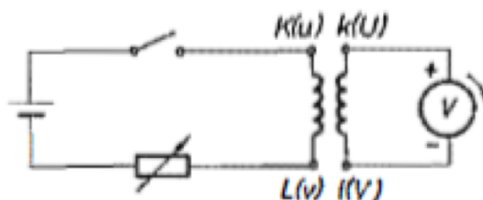
Tradicionalno označavanje primarnih stezaljki strujnih transformatora koristi velika slova K i L, dok se sekundarne stezaljke označavaju malim slovima k i l, kako je prikazano na slici 5. Ipak, u

skladu s preporukama Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC), postoji trend prelaska na oznake $P1$ i $P2$ za primarne stezaljke, te $S1$ i $S2$ za sekundarne stezaljke [18]. Ovaj prijelaz na standardizirane oznake doprinosi boljoj konzistentnosti i usklađenosti u industriji, čime se olakšava identifikacija i povezivanje komponenti u složenim sustavima.



Slika 5: Označavanje stezaljki strujnog transformatora. [1]

Provjera polariteta stezaljki kod transformatora može se izvesti koristeći istosmjerni voltmetar u kombinaciji s izvorom istosmjernog napona. Postupak započinje povezivanjem primarne stezaljke K (ili u) s pozitivnim polom izvora preko preklopke, dok se stezaljka L (ili v) spaja na negativni pol izvora, prema shemi prikazanoj na slici 6. Sljedeći korak uključuje spajanje istosmjernog voltmetra na sekundarne stezaljke, pri čemu pozitivna stezaljka voltmetra ide na k (ili U), dok se negativna stezaljka povezuje s l (ili V) [1]. Ova metoda omogućuje preciznu provjeru relativnog polariteta stezaljki i osigurava pravilnu usklađenost u instalaciji.



Slika 6: Provjera polariteta oznaka stezaljki. [1]

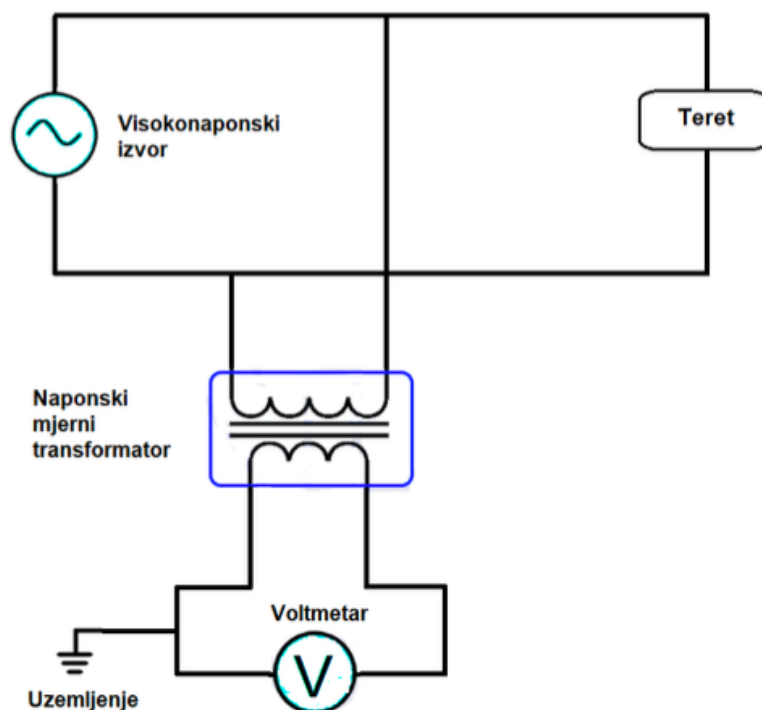
Kada se preklopka P uključi, u jezgri transformatora dolazi do stvaranja magnetskog toka, što inducira napon u primarnom i sekundarnom namotu. Ako voltmetar pokazuje otklon u pozitivnom smjeru, polariteti su ispravno označeni. Međutim, ukoliko se otklon pojavi u negativnom smjeru, to ukazuje na pogrešno označen transformator. U tom slučaju, potrebno je izmijeniti vodove ili prilagoditi oznake. Prilikom isključivanja preklopke, voltmetar će pokazati otklon u suprotnom smjeru. Uz ovaj postupak, postoje i drugi uređaji za provjeru oznaka stezaljki, koji se temelje na mjerenju otklona prilikom isključivanja preklopke P, dok je galvanometar kratko spojen tijekom njenog uključivanja. Ovi uređaji omogućuju dodatnu potvrdu točnosti oznaka polariteta na transformatoru [1].

3.1. Priključivanje na mrežu

Kod naponskih mjernih transformatora, primarni namot priključuje se paralelno s potrošačem na čijem se naponu obavlja mjerenje. Pri ovom povezivanju, struja koja teče kroz primarni namot mora biti značajno manja od struje potrošača, nalik na uvjete pri izravnom mjerenju s voltmetrom.

S druge strane, primarni namot strujnog mjernog transformatora spaja se u seriju s potrošačem, pri čemu je ključno da pad napona na primarnom namotu bude minimalan u odnosu na pad napona na samom potrošaču.

Od presudne je važnosti da napon na sekundarnoj strani naponskog mjernog transformatora bude u fazi s naponom primara, kao i da struja na sekundarnoj strani strujnog mjernog transformatora bude usklađena s primarnom strujom. Ova usklađenost osigurava točnost mjerenja i ispravnost rada svih povezanih instrumenata, uključujući voltmetre, ampermetre, vatmetre, fazometre, varmetre i druge mjernike koji se koriste za analizu i praćenje električnih sustava.



Slika 8: Shema paralelnog spajanja naponskog mjernog transformatora

Primarna i sekundarna strana naponskog mjernog transformatora povezane su magnetski kroz međusobnu indukciju, pri čemu se primarni napon smanjuje u skladu s omjerom broja zavoja između namota. Dok napon na primarnoj strani može dosegnuti nekoliko tisuća volti, sekundarni napon se snižava na vrijednosti ispod 110V. Iako su oba namota električki izolirana, iz sigurnosnih razloga sekundarni namot je uzemljen na jednom kraju.

3.2. Izvedbe naponskog mjernog transformatora

Naponski mjerni transformatori dolaze u različitim izvedbama, ali svi se temelje na osnovnoj strukturi koja uključuje primarni i sekundarni namot. U ovom tipu transformatora, broj zavoja na primarnoj strani je veći nego na sekundarnoj, što omogućuje smanjenje napona na sekundarnoj strani. Materijali i konstrukcijske metode korištene u izradi ovih transformatora osiguravaju visoku preciznost mjerenja, stoga cijena materijala nije prioritet. Kvaliteta izrade je izuzetno visoka, s ciljem postizanja niske gustoće magnetskog toka, minimalnih struja magnetiziranja i smanjenja nepotrebnog opterećenja.



Slika 9: Visokonaponski mjerni transformator

Postoje dvije osnovne izvedbe naponskih mjernih transformatora, svaka s vlastitim specifičnostima i primjenama. Prvi tip, poznat kao ognuti tip transformatora, koristi se za niske napone kako bi se osigurala visoka točnost mjerenja. Ovi transformatori imaju izuzetno precizne karakteristike, koje omogućuju reduciranje napona s minimalnim odstupanjima. Drugi tip, jezgrasti tip transformatora, namijenjen je za visoke napone. Ova vrsta transformatora osigurava učinkovitu redukciju visokih napona na sigurne i mjerljive vrijednosti, pri čemu se čuva visoka preciznost mjerenja. Kada razmatramo svrhe uporabe naponskih mjernih transformatora, možemo ih klasificirati u tri glavne kategorije:

1. Naponski mjerni transformatori za mjerenje: Ovi transformatori su visoke točnosti i niske snage, dizajnirani za precizno mjerenje napona. Njihova osnovna funkcija je reduciranje napona mreže na željenu vrijednost prikladnu za instrumente povezane na sekundarnoj strani. Ključno je da se prijenosni omjer transformatora točno poznaje, dok su fazni pomaci između primarne i sekundarne strane zanemarivi.

2. Odvojni ili izolacijski naponski mjerni transformatori: Ovi transformatori služe za pružanje električne izolacije između visokih i niskih napona. Njihova primarna i sekundarna strana su

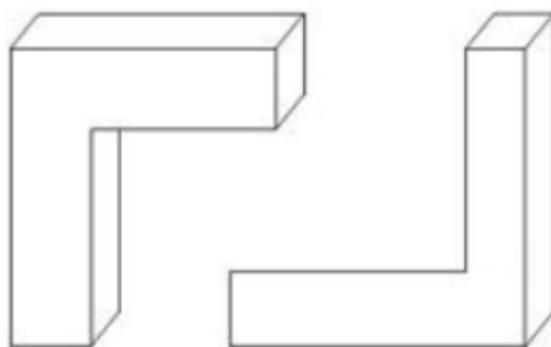
električki izolirane, čime se smanjuje opasnost od dodira s dijelovima pod naponom. Dodatno, njihova konstrukcija osigurava da su namoti međusobno izolirani, kao i od magnetske jezgre i kućišta. Primjer takvog transformatora je međutransformator s prijenosnim omjerom 1:1, koji pruža izolaciju bez promjene napona.

3. Naponski mjerni transformatori za zaštitu: Ovi transformatori služe za detekciju neregularnih naponskih stanja u elektroenergetskim sustavima. Oni smanjuju visoke napone na sigurne, standardizirane razine koje zaštitni releji koriste za praćenje sustava. U slučaju prenapona ili podnapona, releji aktiviraju zaštitne mehanizme, poput isključenja dijelova sustava, čime se sprječavaju ozbiljni kvarovi.

Sva tri tipa transformatora pružaju ključne funkcionalnosti u zaštiti i mjerenju, osiguravajući sigurnost i preciznost u električnim sustavima.

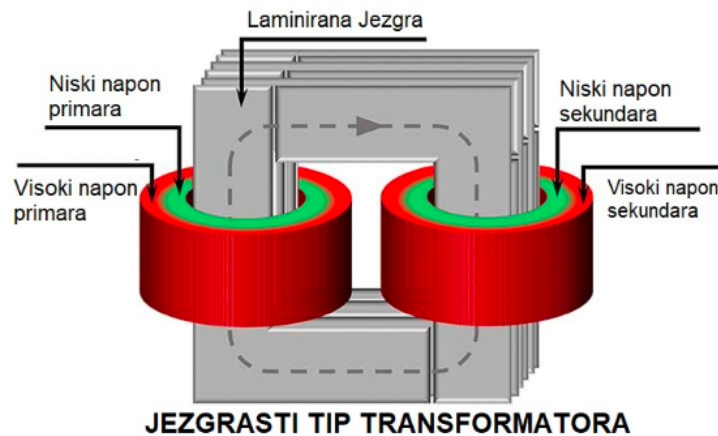
3.2.1. Transformator jezgrastog tipa

Jezgrasti tip transformatora karakterizira konstrukcija namota koji su namotani oko jedinstvene jezgre. Ova jezgra može imati različite oblike presjeka, uključujući pravokutni, trokutasti ili križni oblik, ovisno o specifičnostima dizajna. Magnetski tok unutar jezgre ravnomjerno se raspodjeljuje između obje strane jezgre, osiguravajući ujednačen magnetski tok. Magnetska jezgra ovog tipa transformatora sastoji se od slojeva lamela koje se slažu jedna na drugu, čime se formira pravokutni okvir. Limovi se izrađuju rezanjem u trake, često u obliku slova L, kako bi se postigla potrebna svojstva magnetske jezgre. Ovaj dizajn omogućava smanjenje magnetskog otpora na spojevima lamela, koje se povezuju jedna s drugom. Kako bi se minimizirao utjecaj neprekidnih spojeva i poboljšala učinkovitost, sljedeći sloj lamela se postavlja tako da se spojevi ne poklapaju s prethodnim slojem, čime se smanjuje magnetski otpor i poboljšava ukupna učinkovitost transformatora [2].



Slika 10: Lim jezgre u obliku slova L [2]

Namoti primara i sekundara su pažljivo isprepleteni kako bi se optimizirala distribucija magnetskog toka i smanjili gubici uzrokovani rasipanjem. U ovom dizajnu, svaki namot je koncentrično smješten oko jezgre, pri čemu se polovica svakog namota postavlja neposjećeno jedan uz drugi na stup jezgre, čime se postiže učinkovita integracija i minimizira nepoželjno rasipanje magnetskog toka. Radi veće jasnoće i jednostavnosti dizajna, namoti primara i sekundara smješteni su na suprotne strane jezgre, što omogućava bolju kontrolu i stabilnost magnetskog polja unutar transformatora.

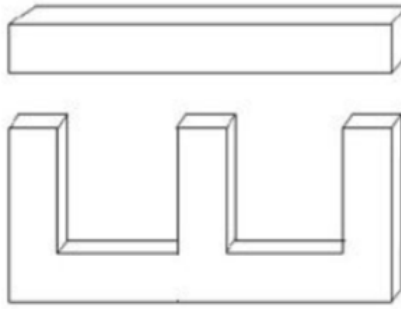


Slika 11: Naponski mjerni transformator jezgrastog tipa [3]

Izolacijski sloj postavljen je strateški između jezgre i donjeg namota, kao i između primarnog i sekundarnog namota, kako bi se osigurala visoka učinkovitost izolacije i minimizirali električni gubici. Kako bismo dodatno smanjili potrebu za velikim slojevima izolacije, sekundarni namot je pozicioniran što bliže jezgri. Sam namot, obično cilindričnog oblika, podvrgava se dodatnom procesu lamelacije koja se primjenjuje nakon inicijalne izrade namota. Ova lamelacija doprinosi smanjenju magnetskog otpora i optimizaciji magnetskog toka kroz transformator.

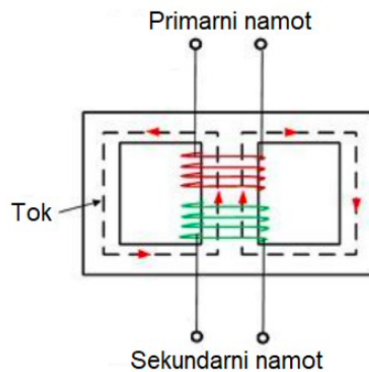
3.2.2. Transformator ogrnutog tipa

Naziv "ogrnuti tip transformatora" proizlazi iz činjenice da su namoti ovog transformatora u potpunosti obuhvaćeni jezgrom. Jezgra se sastoji od laminacija izrezanih u oblik slova "I" i "E", što je prikazano na slici 12. Kako bi se smanjio magnetski otpor koji se pojavljuje na spojevima između slojeva laminacija, oni se postavljaju na takav način da se spriječi stvaranje neprekidnog spoja. Time se minimizira gubitak energije uslijed pojave neželjenih magnetskih otpora na mjestima dodira laminacija [4].



Slika 12: Lim jezgre u obliku slova E i I. [2]

Transformator ogrnutog tipa sadrži tri stupa. Kroz središnji stup prolazi cijeli tok, dok kroz bočne stupove prolazi polovica toka. Zbog toga je širina centralnog stupa dva puta veća za razliku od širine vanjskih to jest bočnih stupova.



Slika 13: Naponski mjerni transformator ogrnutog tipa [2]

I namot primara i namot sekundara smješteni su na središnjem stupu. Blizu jezgre smješten je niskonaponski namot dok je izvan niskonaponskog namota smješten visokonaponski namot kako bi se smanjilo trošenje izolacije između niskonaponskog namota i jezgre. Namoti su cilindričnog oblika, te su na njega umetnute lamele jezgre.

Uz prethodno navedene segmente za konstrukciju naponskog mjernog transformatora također je izrazito bitno da:

- Jezgra bude izrađena od izrazito kvalitetnog materijala kako bi osigurali nisku gustoću magnetskog toka zasićenja. Uz to, kvalitetan materijal jezgre omogućava rad prilikom niske struje magnetiziranja.
- Namoti budu namatani koaksijalno s ciljem smanjenja utjecaja rasipne reaktancije. Primarni visokonaponski namoti podijeljeni su u segmente s ciljem smanjenja trošenja izolacije tijekom aktivnog rada na minimum. Kako bismo smanjili trošak izolacije namote prekrivamo finom pamučnom tkaninom to jest lakiranim kambrikom
- Pri promjeni opterećenja fazni pomak između izlaza i ulaza mora biti minimalan.

- Bitno je da priključke dizajniramo na način da je promjena omjera napona prilikom opterećenja što manja. Kao separator među zavojnicama koristimo tvrdo vlakno.
- Prilikom visokonaponskog mjerenja, za povećanje izolacije koristimo transformator punjen uljem, za spajanje na visokonaponsku mrežu koristimo izolator napunjen uljem. [3]

3.3. Kapacitivni naponski transformatori

Kapacitivni mjerni transformatori koriste se za reduciranje napona na sekundarnoj strani, kako bi omogućili točna mjerenja u visokonaponskim sustavima. U uvjetima visokih napona, direktno mjerenje linijskog napona ili struje nije izvedivo bez značajnih tehničkih izazova i visokih troškova. Zbog toga, umjesto konvencionalnih naponskih transformatora, često se koriste kapacitivni mjerni transformatori, koji su ne samo jeftiniji, nego i efikasniji u ovim aplikacijama. Osim toga, ovi transformatori mogu služiti kao vezni kondenzatori za prijenos visokofrekventnih signala. Kapacitivni naponski mjerni transformatori idealni su za sustave iznad 100 kV zbog svojih izolacijskih svojstava koja su od ključne važnosti u visokim naponima. Standardni visokoizolirani transformatori često su skupi, dok kapacitivni naponski transformatori nude ekonomski prihvatljiviju alternativu s dovoljno visokim izolacijskim sposobnostima [5]. Ovi transformatori sadrže naprednu tehnologiju izolacije kondenzatora, koristeći mješoviti dielektrik impregniran sintetičkim materijalima. Ova moderna izolacijska tehnologija osigurava izuzetno niske dielektrične gubitke i gotovo potpuno eliminira pojavu parcijalnih izbijanja. U praksi to rezultira stabilnim radom pod jednom minutnim izmjeničnim ispitnim naponima, uz minimalno zagrijavanje tijekom rada [15].



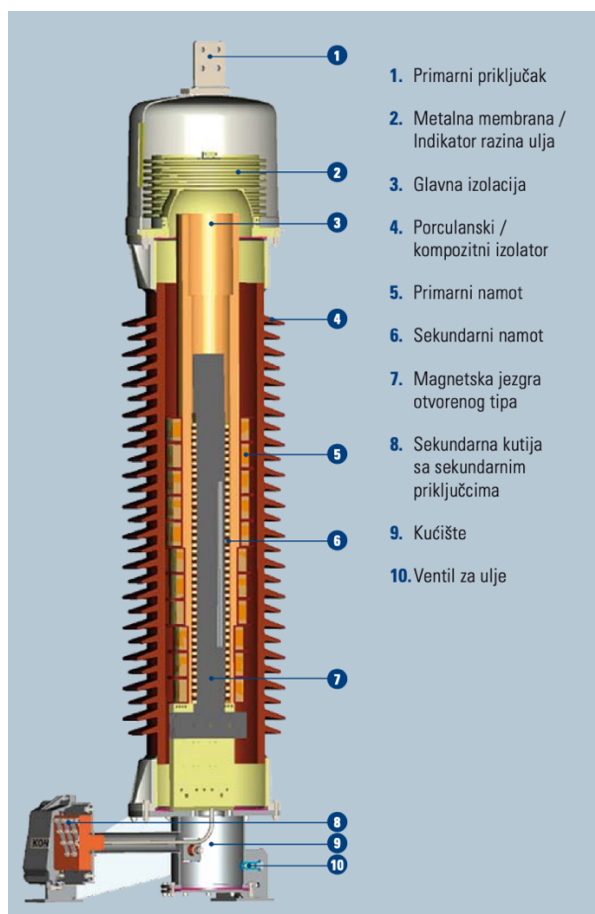
Slika 14: Presjek kapacitivnog naponskog mjernog transformatora [15]

3.4. Induktivni naponski transformatori

Za napone do 145 kV upotrebljavaju se induktivni naponski transformatori sa željeznom jezgrom na kome se nalaze primarni namot te jedan ili više sekundarnih namotaja. [16]

Fazne i naponske pogreške naponskog transformatora se reduciraju tako što se smanjuje vrijednost djelatnog otpora te rasipnih reaktancija primara i sekundara, što je osnova za njihovu izvedbu. Djelatni otpor se smanjuje na sljedeći način: povećanjem presjeka žice i smanjenjem broja zavoja, što uz određenu magnetsku indukciju u željezu dovodi do povećanja presjeka jezgre. Visokonaponski induktivni transformatori najčešće su fazno-uzemljeni, a jezgra i namotaji se postavljaju u dno spremnika.

Induktivno djelilo je vrsta naponskog mjernog transformatora koji se razvio tek u novije vrijeme. Sastoji se od odvojaka kojima se omogućuje vrlo precizna podjela priključenog napona. Preciznost podjele priključenog napona postiže se na način da su deset vodiča identičnog promjera najprije isprepleteni, a kasnije omotani oko prstenaste jezgre dobre magnetske vodljivosti.



Slika 15: Presjek induktivnog naponskog mjernog transformatora [17]

Primarni namot, kroz koji teče glavna struja, sastoji se od jedne petlje ili zavoja. Kada struja teče kroz vodič, stvara se magnetsko polje, a magnetske silnice tog polja prolaze kroz sekundarni namot, inducirajući u njemu izlaznu struju. Ta izlazna struja je dostupna na izlaznim priključcima strujnog mjernog transformatora, omogućujući precizno mjerenje struje u sustavu.

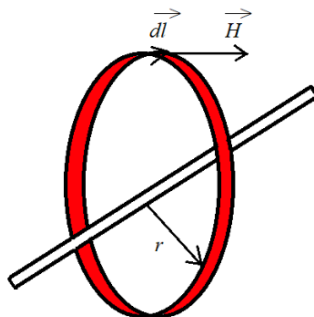
Korištenjem Maxwellovih jednadžbi, posebno Amperovog zakona, možemo precizno opisati postupak mjerenja i izračuna struje preko strujnih mjernih transformatora. Amperov zakon navodi da je integral inducirano magnetskog polja duž zatvorene petlje oko vodiča proporcionalan ukupnoj struji koja prolazi kroz tu petlju. Dakle, kada integriramo magnetsko polje oko zatvorene petlje koja obuhvaća određeni vodič, dobivamo vrijednost integrala koja je ekvivalentna ukupnoj struji unutar te petlje, odnosno I_{enc} .

$$\oint H dl = I_{enc} \quad (4-1)$$

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \oint H dl = 2 * \pi * r * H \quad (4-2)$$

$$\vec{H} d\vec{l} = I_{izvora} \quad (4-3)$$

$$\vec{H} d\vec{l} = I_{inducirano} \quad (4-4)$$



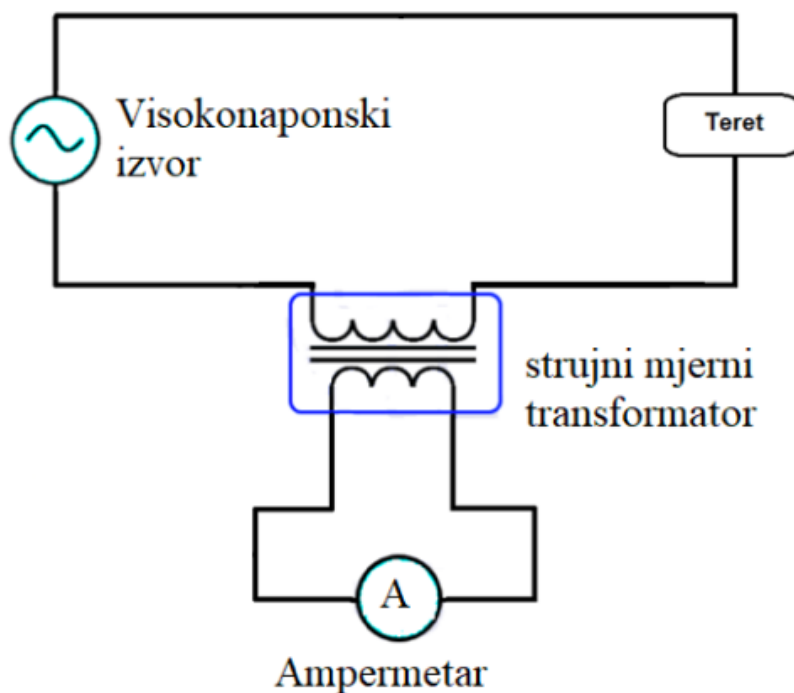
Slika 18: Inducirano magnetsko polje vodiča omeđeno jezgrom strujnog transformatora

Sekundarna struja strujnog mjernog transformatora proporcionalna je struji koja teče kroz središte jezgre. Standardne izlazne struje za ove transformatore obično iznose 5 A ili 1 A. Primjerice, ako na primarnu stranu transformatora dovedemo struju od 1000 A i koristimo omjer zavoja od 200:1, na sekundarnoj strani će teći struja od 5 A, što je upravo željena struja za precizno mjerenje.

4.1. Spajanje na mrežu

Primarni namot strujnog mjernog transformatora priključujemo preko serijskog spoja na mrežu te na njega dovodimo visoku struju koju strujni transformator snižava na iznos pogodan za izvođenje mjerenja mjernim instrumentima. Na sekundarnoj strani strujnog transformatora su spojeni mjerni instrumenti. Potrebno je paziti na napon na sekundaru pošto je on izrazito visoke vrijednosti zbog vrlo niske struje na sekundarnoj strani.

Kako na stezaljke sekundara priključujemo razna trošila, upotrebljavaju se strujni transformatori za mjerenje i za zaštitu. Pri pojavi kratkog spoja u mreži od njih se očekuje različito ponašanje. Struja primara počinje rasti na izrazito veće vrijednosti u odnosu na vrijednost nazivne struje. Dok kod strujnih transformatora za mjerenje, sekundarna struja kod kratkog spoja zbog zaštite instrumenta samo ograničeno poraste. Kod strujnih transformatora za zaštitu na sekundarnoj strani pojavljuju se struje mnogostruko veće od nazivne vrijednosti, dolazi do obrnute situacije nego kod strujnih transformatora za mjerenje. [16]



Slika 19: Jednopolna shema serijski spojenog strujnog mjernog transformatora

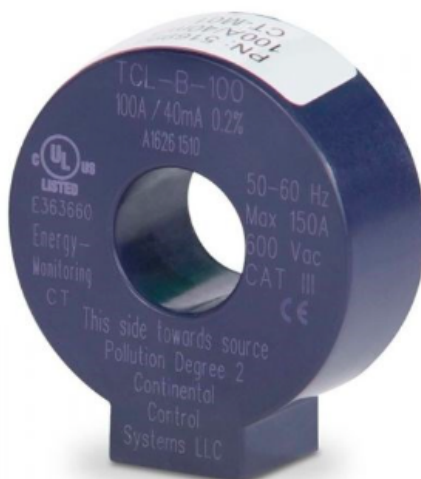
Ključno je osigurati da strujni mjerni transformator, čija je primarna strana spojena na napon, uvijek ima sekundarni namot ili kratko spojen ili povezan preko trošila. Ako sekundarni namot ostane otvoren, može doći do trajnog oštećenja transformatora zbog pregrijavanja jezgre, a također se mogu pojaviti opasno visoki naponi.

Zbog toga se u sekundarni krug strujnog mjernog transformatora nikada ne ugrađuju osigurači; isključenje instrumenta postiže se kratkim spojem sekundarnih stezaljki.

Svi metalni dijelovi strujnog mjernog transformatora koji su u normalnom radu pod naponom moraju biti uzemljeni, kao i jedna stezaljka sekundarnog namota. Kod niskonaponskih strujnih transformatora uzemljenje sekundarnog kruga nije obavezno. [4]

4.2. Podjela strujnih mjernih transformatora

Primarna svrha strujnih mjernih transformatora je mjerenje i zaštita električnih sustava. Proizvode se u različitim veličinama, oblicima i nazivnim vrijednostima, a mogu imati punu ili podijeljenu magnetsku jezgru. Strujni mjerni transformatori s mjernim stezaljkama najčešće se koriste za mjerenje srednjih i niskih napona.



Slika 20: SMT s punom jezgrom tvrtke Continental Control Systems. [7]

Transformatori s punom jezgrom idealni su za trajnu uporabu, imaju trajno zatvorenu magnetsku jezgru što znači da se vodič kroz koji mjerimo struju mora privremeno odspojiti kako bi prošao kroz jezgru transformatora. Njihova bolja točnost u usporedbi s transformatorima s podijeljenom jezgrom predstavlja njihovu ključnu prednost [6].



Slika 21: SMT s podijeljenom jezgrom tvrtke EO Chraging. [8]

Strujni mjerni transformatori s podijeljenom jezgrom, poznati i kao prislonski transformatori ili transformatorska kliješta, dizajnirani su za trenutnu primjenu. Ovi transformatori imaju otvor u jezgri, što omogućava jednostavno obuhvaćanje vodiča kroz koji prolazi struja bez potrebe za njegovim odspajanjem. To je ključna prednost u odnosu na transformatore s punom jezgrom.

Mjerna kliješta, koja također pripadaju ovoj kategoriji, koriste se za brzo i efikasno mjerenje struje. Iako su financijski zahtjevniji u usporedbi sa strujnim mjernim transformatorima s punom jezgrom, nude veću praktičnost i značajno smanjuju vrijeme potrebno za izvođenje mjerenja. Njihova efikasnost i jednostavnost korištenja čine ih idealnim za situacije gdje je brzina i fleksibilnost mjerenja od ključne važnosti [6].

4.3. Upotreba strujnih mjernih transformatora

Strujni mjerni transformatori, koji su namijenjeni za trajnu uporabu, nalaze se u širokom rasponu primjena, od transformatora i generatora do instrumenata za mjerenje potrošnje električne energije. Oni su ključni u svim situacijama gdje je potrebno pratiti tok struje u sustavu.

Na primjer, distributeri električne energije koriste ove transformatore za praćenje ukupne potrošnje svojih potrošača, što je od vitalne važnosti za točno određivanje troškova i naplatu. Zbog komercijalne prirode ove primjene, točnost strujnih mjernih transformatora mora biti izuzetno visoka, svrstavajući ih u razred instrumenata za prihode.

Osim toga, strujni mjerni transformatori igraju ključnu ulogu u praćenju snage i faktora snage, omogućujući optimizaciju djelatne i jalove snage prema zadanim parametrima. Kada je riječ o zaštiti sustava, ovi transformatori koriste se u kombinaciji s relejima, odnosno sklopnikom za

srednjenaponske prekidače. Njihova je funkcija aktivirati prekidače u slučaju preopterećenja ili bilo kakvih kvarova unutar sustava, čime se osigurava sigurnost i pouzdanost rada.

U praksi se strujni mjerni transformatori, kada su integrirani unutar rasklopnih uređaja ili prekidača, često nazivaju senzorima. Međutim, njihova osnovna funkcionalnost i svrha ostaju iste a to je precizno mjerenje i kontrola struje unutar električnih sustava..



Slika 22: Vakuumski prekidač 33kV 35kV 36kV 1250A sa strujnim transformatorom.

Za svaku fazu u mreži potreban je zaseban strujni mjerni transformator, a također je neophodan i transformator na neutralnom vodiču. Poseban tip strujnog transformatora koristi se za zaštitu od zemljospoja. Ovaj transformator obuhvaća sva tri fazna vodiča i neutralni vodič.

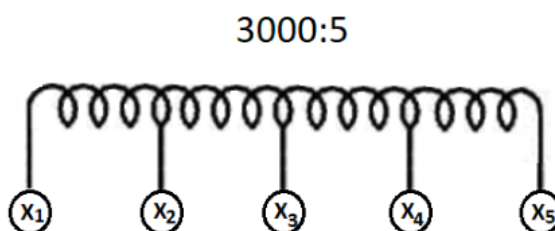
U slučaju pojave viška struje, koja bi mogla kroz vodljive materijale dovesti do opasnog strujnog udara, transformator prepoznaje neravnotežu u strujnom krugu i prekida strujni tok, čime se sprječava opasnost za ljudski život.

U kućanstvima se strujni mjerni transformatori obično aktiviraju na razini od 5 mA, dok u industriji reagiraju na struje veće od 30 mA, a mogu podnijeti i do nekoliko stotina mA. U kućanstvima je njihova primarna funkcija zaštita ljudi od strujnog udara, dok u industriji dodatno služe za zaštitu opreme i strojeva.

Jedna od uobičajenih pogrešaka prilikom mjerenja srednjenaponskih veličina je pretpostavka kako je potrebno da izolacija strujnih mjernih transformatora bude dimenzionirana za linijski napon koji mjerimo (npr. 34,5 kV). No, ovo nije točno zato što se ovi transformatori ugrađuju oko vodiča koji je već zaštićen i izoliran. Uglavnom svi strujni mjerni transformatori i izolatori na sekundarnoj strani dimenzionirani su za napone do 600 V. U srednjenaponskim rasklopnim uređajima, strujne mjerne transformatore obično fizički montiramo oko izolacijskog materijala ili koriste zračni razmak kao izolacijsko sredstvo.

Za postizanje optimalne zaštite, poželjno je koristiti strujne mjerne transformatore visoke točnosti, koji su sposobni mjeriti vrlo visoke struje, često 20 puta veće od nazivnog opterećenja. Visoka točnost je ključna kako bi prekidač mogao ispravno reagirati unutar prihvatljivog vremena, bez pojave zasićenja koje bi moglo uzrokovati netočna mjerenja [9].

Strujni mjerni transformatori dolaze u različitim omjerima, poput 60:1, 100:5, 300:5, i 5000:5. Ovi transformatori imaju fiksne omjere koje nije moguće mijenjati. Međutim, postoje i transformatori s više kontaktnih priključaka koji omogućuju promjenu prijenosnog omjera prebacivanjem priključaka, što je posebno korisno u terenskim radovima ili specifičnim primjenama.



Slika 23: Stezaljke strujnog mjernog transformatora sa podesivim omjerima.

Raznovrsnim kombinacijama povezivanja i odvajanja stezaljki, moguće je ostvariti različite prijenosne omjere strujnog mjernog transformatora. Ova vrsta transformatora izuzetno je korisna u praksi jer omogućuje prilagodbu omjera transformacije, čime se eliminira potreba za upotrebom više transformatora s fiksnim omjerima. Takva fleksibilnost ne samo da pojednostavljuje instalaciju i održavanje, već i značajno smanjuje troškove i prostor potreban za ugradnju različitih transformatora u sustav.

5. IZBOR MJERNIH TRANSFORMATORA

Relejna zaštita obično se povezuje sa sekundarnom stranom strujnih i/ili naponskih mjernih transformatora, koji čine ključni element u opsegu sustava relejne zaštite. Stoga, odabir tehničkih karakteristika ovih transformatora ima presudnu važnost za ispravno funkcioniranje relejne zaštite. Dakle, izbor naponskih i strujnih mjernih transformatora na koje je povezana relejna zaštita direktno utječe na njezinu učinkovitost. To znači da se parametrizacija ovih transformatora mora pažljivo uskladiti s cijelim sustavom relejne zaštite, što uključuje detaljnu analizu i prilagodbu njihovih specifičnih parametara kako bi se osigurala optimalna funkcionalnost i pouzdanost zaštitnog sustava.

5.1. Izbor naponskih mjernih transformatora

Osnovni tehnički parametri naponskih transformatora za zaštitu uključuju nekoliko ključnih elemenata: nazivni prijenosni omjer (p_u), koji definira odnos između primarnog i sekundarnog napona; nazivnu snagu (S_n), koja predstavlja maksimalnu snagu koju transformator može prenijeti bez gubitka performansi; te klasu točnosti, koja označava preciznost s kojom transformator mjeri napon, što je od izuzetne važnosti za osiguranje pouzdanosti i preciznosti zaštitnog sustava.

Gore navedeni parametri igraju ključnu ulogu u odabiru odgovarajućih naponskih transformatora i njihovom optimalnom uključivanju u širi sustav relejne zaštite.

Nazivni prijenosni omjer (p_u) jednak je:

$$p_u = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad (5.1-1)$$

Gdje je: U_{1n} - nazivni napon primara,

U_{2n} - nazivni napon sekundara,

Nazivni primarni napon određujemo preko napona mreže, za uzemljeni naponski transformator vrijedi:

$$U_{1n} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (5.1-2)$$

Za neuzemljeni naponski transformator vrijedi:

$$U_{1n} = U_n \quad (5.1-3)$$

U_n – nazivni napon mreže na koju priključujemo promatrani naponski mjerni transformator

Nazivni napon sekundara naponskog transformatora biramo iz standardnih vrijednosti navedenih u tablici 1. Alternativne vrijednosti U_{2n} -a koriste se za slučajeve kada su sekundarni krugovi prostrani, odnosno kada postoji duži put ožičenja sekundara.

U zadnjem retku tablice 1 mogu se pronaći vrijednosti nazivnog napona na sekundaru to jest pomoćnog sekundarnog namota.

Tablica 1: Standardne vrijednosti nazivnih sekundarnih napona. [19]

Izvedba NT-a	Preferirane vrijednosti u_{2n} [V]		Alternativne vrijednosti u_{2n} [V]
Neuzemljena	100	110	200
Uzemljena	$\frac{100}{\sqrt{3}}$	$\frac{110}{\sqrt{3}}$	$\frac{200}{\sqrt{3}}$
	$\frac{100}{3}$	$\frac{110}{3}$	$\frac{200}{3}$

Nazivna snaga (S_n) predstavlja prividnu snagu koju naponski transformator isporučuje sekundarnom krugu pri nazivnom sekundarnom naponu i priključenom nazivnom teretu Y_n . Ovaj odnos može se izraziti sljedećim formulom:

$$S_n = u_{2n}^2 \cdot Y_n \quad (5.1-4)$$

Nazivna snaga transformatora mora zadovoljiti uvjet da bude veća ili jednaka sumi vlastitog potroška zaštitnih i mjernih uređaja priključenih na naponski transformator i vlastitog potroška međutransformatora ako se isti koristi.

U tablici 2 prikazane su standardne vrijednosti nazivnih snaga naponskih transformatora pri $\cos\phi=0,8$ (induktivno). Ove vrijednosti odnose se i na pomoćni sekundarni namot. Preporučuje se odabir osjenčenih vrijednosti.

Tablica 2: Standardne vrijednosti nazivnih snaga. [19]

S_n [VA]	10	15	25	30	50	75	100	150	200	300	400	500
---------------	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Klasa točnosti označava naponski transformator čije pogreške ostaju unutar predviđenih granica kada se koristi u skladu s propisanim uvjetima. Naponska pogreška (ϵ_u), izražena u postocima, određuje se pomoću sljedeće formule:

$$\epsilon_u = \frac{u_2 \cdot p_u - U_1}{U_1} \cdot 100 \quad (5.1-5)$$

Veličine U_1 i u_2 predstavljaju primarni i sekundarni napon naponskog transformatora, dok p_u označava nazivni prijenosni omjer tog transformatora. Kutna pogreška (δ_u) definira se kao razlika između fazora primarnog i sekundarnog napona. Smatra se pozitivnom kada fazor sekundarnog napona prethodi fazoru primarnog napona. Kutna pogreška može se izražavati u minutama ili centiradijanima.

Naponski transformatori za zaštitu kategorizirani su u dvije klase točnosti: 3P i 6P. Specifikacije granica naponskih i kutnih pogrešaka za ove klase detaljno su prikazane u tablici 3.

Tablica 3: Granice pogrešaka NT-a za zaštitu. [19]

Klasa Točnosti	$\pm \epsilon_u$ [%]	$\pm \delta_u$ [min]
3P	3.0	120
6P	6.0	240

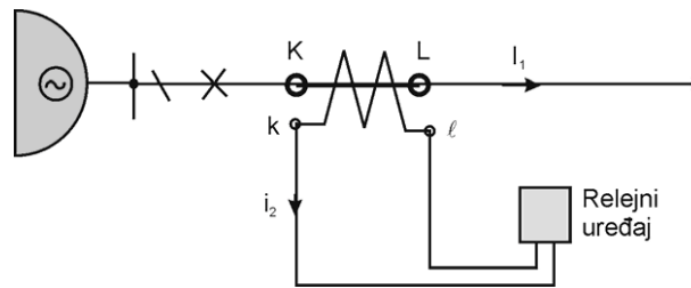
Dok se transformatori s klasom točnosti 3P koriste za zahtjevnije aplikacije, pomoćni sekundarni namot naponskog transformatora obično je specificiran prema klasi točnosti 6P. Ova klasifikacija osigurava da su pogreške unutar prihvatljivih granica za zadane uvjete rada.

5.2. Izbor strujnih mjernih transformatora

Strujni transformatori, posebno oni s zaštitnom jezgrom, definirani su ključnim tehničkim parametrima koji uključuju nekoliko osnovnih specifikacija. Prvi od njih je nazivni prijenosni omjer (π), koji opisuje odnos između primarnog i sekundarnog strujnog kruga. Drugi važan parametar je nazivna snaga (S_n), koja označava maksimalnu snagu koju transformator može prenijeti bez kompromitiranja svojih performansi. Klasa točnosti (5P ili 10P) predstavlja preciznost mjerenja koju transformator može postići, dok nadstrujni broj (F_{tn}) ukazuje na maksimalni omjer struje pri kojem transformator zadržava svoju točnost u predviđenim uvjetima

rada. Svi ovi parametri zajedno definiraju sposobnost strujnog transformatora da osigura pouzdano i precizno mjerenje i zaštitu u elektroenergetskim sustavima.

Strujni transformatori su konstruirani tako da im je primarni namot serijski uključen u glavni strujni krug, omogućujući da primarna struja (I) teče kroz njih. Sekundarni namot transformatora povezan je, na primjer, s proradnim članom nadstrujne zaštite. Ovaj raspored i povezivanje detaljno su prikazani u grafičkom prikazu na slici 24.



Slika 24: Grafička ilustracija načina spoja proradnog člana nadstrujnog releja na sekundarnu stranu / namot strujnog transformatora.

Nazivni prijenosni omjer (p_i) jednak je:

$$p_i = \frac{I_{1n}}{i_{2n}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (5.2-1)$$

Gdje je: I_{1n} – nazivna primarna struja strujnog transformatora u A,

i_{2n} – nazivna sekundarna struja strujnog transformatora u A,

N_2 – broj zavoja sekundarnog namota strujnog transformatora,

N_1 – broj zavoja primarnog namota strujnog transformatora.

Nazivna primarna struja strujnog transformatora određuje se na temelju dva ključna kriterija: trajne struje voda za strujne transformatore koji su integrirani u pripadajuće vodno polje, te nazivne struje energetskog transformatora u naponskoj razini u kojoj je dotični strujni transformator instaliran. Standardne vrijednosti nazivnih primarnih struja navedene su u tablici 4, pri čemu se pri odabiru preferiraju osjenčene vrijednosti koje pružaju optimalnu preciznost i pouzdanost.

Tablica 4: Standardne vrijednosti nazivnih primarnih struja. [19]

I_{1n} [A]	10	12.5	15	20	25	30	40	50	60	75
	100	125	150	200	250	300	400	500	600	750
	1000	1250	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000	7500

Pri odabiru nazivne primarne struje strujnog transformatora važno je uzeti u obzir da su ti transformatori projektirani za podnošenje struja do 20% veće od njihove nazivne vrijednosti bez trajnih oštećenja. Što se tiče nazivne sekundarne struje, ona se bira prema standardnim vrijednostima prikazanim u tablici 5. Odabir veličine i_{2n} ovisi o karakteristikama korištenih mjernih i zaštitnih uređaja. U situacijama gdje su razmaci između instalacijskih mjesta strujnih transformatora i sekundarne opreme veliki, odnosno kada su putevi sekundarnog ožičenja dugi, često se bira sekundarna struja $i_{2n} = 1\text{A}$, kako bi se osigurala adekvatna funkcionalnost i preciznost sustava.

Tablica 5: Najčešće vrijednosti standardnih nazivnih sekundarnih struja.. [19]

I_{2n} [A]	1	5
--------------------------------	---	---

Nazivna snaga (S_n) predstavlja prividnu snagu koju strujni transformator isporučuje sekundarnom krugu pri nazivnoj sekundarnoj struji i kada je priključen na nazivni teret (Z_n). Ova nazivna snaga, izražena u volt-amperima (VA), određuje se prema sljedećoj relaciji:

$$S_n = u_{2n} \cdot i_{2n} \quad (5.2-2)$$

gdje su: u_{2n} – nazivni napon sekundarnog namota strujnog transformatora u V,
 i_{2n} – nazivna struja sekundarnog namota strujnog transformatora u A.

Kako vrijedi sljedeći izraz:

$$u_{2n} = i_{2n} \cdot Z_n \quad (5.2-3)$$

pri čemu je Z_n nazivna impedancija priključena na sekundarnu stranu strujnog transformatora, poznat i kao nazivno breme strujnog transformatora (nazivni teret). Uvrštavanjem relacije (5.2-3) u relaciju (5.2-2) dobiva se:

$$S_n = i_{2n}^2 \cdot Z_n \quad (5.2-4)$$

Važno je napomenuti da se zahtjevi za točnost strujnog transformatora temelje na nazivnom teretu (Z_n). Stoga, nazivna snaga strujnog transformatora mora u načelu ispunjavati sljedeću relaciju:

$$S_n \geq S_r + S_{mt} + S_o \quad (5.2-5)$$

Pri čemu je S_r – vlastiti potrošak releja priključenih na strujni transformator,

S_{mt} – vlastiti potrošak međutransformatora, ukoliko se isti koristi,

S_o – snaga koja se troši na ožičenju sekundarnih krugova.

U tablici 6 možemo vidjeti standardne vrijednosti nazivnih snaga strujnih transformatora

Tablica 6: Najčešće vrijednosti standardnih nazivnih sekundarnih struja.. [19]

S_n [VA]	2.5	5	10	15	30
------------	-----	---	----	----	----

Klasa točnosti predstavlja oznaku dodijeljenu strujnom transformatoru na temelju njegove sposobnosti da pogreške ostanu unutar definiranih granica pod specifičnim uvjetima korištenja. Strujni transformatori za zaštitu moraju osigurati ispravno funkcioniranje u uvjetima kratkospojnog opterećenja, dok strujni transformatori za mjerenje trebaju raditi korektno pri nazivnim strujama.

Budući da su struje kratkog spoja znatno veće od radnih struja, strujni transformatori za zaštitu suočavaju se s različitim zahtjevima u usporedbi s transformatorima za mjerenje. Stoga se točnost strujnih transformatora za zaštitu ocjenjuje složenom pogreškom (ε_i) izraženom u postocima, koja se definira prema sljedećem izrazu:

$$\varepsilon_i = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i_2(t) \cdot p_i - I_1(t)]^2 dt} \quad (5.2-6)$$

Gdje su $i_2(t)$ – trenutna vrijednost sekundarne struje,

$I_1(t)$ – trenutna vrijednost primarne struje,

p_i – nazivni prijenosni omjer strujnog transformatora,

T – trajanje jedne periode, koje iznosi:

$$T = \frac{1}{f} \quad (5.2-7)$$

Gdje je f – frekvencija struje kvara (50 Hz).

I_1 – efektivna vrijednost primarne struje, koja je jednaka sljedećem izrazu:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_1^2(t) \cdot dt} \quad (5.2-8)$$

Treba istaknuti da je ova definicija složene pogreške neophodna zbog činjenice da u uvjetima struja kratkog spoja dolazi do zasićenja jezgre strujnog transformatora, što rezultira pojavom nesinusoidalnih struja. U takvim okolnostima, definiranje strujne i kutne pogreške, kao što je to slučaj kod strujnih transformatora namijenjenih mjerenju, postaje nepraktično. Granice složene pogreške za strujne transformatore za zaštitu klase P prikazane su u tablici 7 i određene su pri nazivnoj primarnoj graničnoj struji točnosti (I_{gtn}). Ova vrijednost predstavlja najveću primarnu struju pri kojoj transformator još uvijek ispunjava zahtjeve za zadanu složenu pogrešku ε_i . Pritom, navedena pogreška odgovara opterećenju transformatora pri nazivnom teretu (Zn).

Tablica 7: Granice složene pogreške strujnih transformatora za zaštitu klase P.[19]

Klasa točnosti	$\pm \varepsilon_i$ [%]
5P	5
10P	10

Nadstrujni broj (F_{tn}) definira se kao omjer između nazivne primarne granične struje točnosti (I_{gtn}) i nazivne primarne struje (I_{1n}), odnosno:

$$F_{tn} = \frac{I_{gtn}}{I_{1n}} \quad (5.2-9)$$

Nazivna primarna granična struja točnosti predstavlja najveću vrijednost primarne struje pri kojoj strujni transformator i dalje ispunjava zahtjeve u pogledu složene pogreške. Standardne vrijednosti nadstrujnog broja prikazane su u tablici 8.

Tablica 8: Standardne vrijednosti nadstrujnog broja. [19]

F_{tn}	5	10	15	20	30
-----------------------	---	----	----	----	----

Nadstrujni broj strujnog transformatora odabire se tako da ispunjava sljedeću relaciju:

$$F_{tn} \geq \frac{I_{K \max}}{I_{1n}} \quad (5.2-10)$$

pri čemu je I_{kmax} maksimalna struja kvara na lokaciji ugradnje strujnog transformatora, što se odnosi na efektivnu vrijednost struje trofaznog kratkog spoja.

Stvarni nadstrujni broj strujnog transformatora nije fiksna veličina i može se razlikovati od nadstrujnog broja. Ovaj faktor varira ovisno o stvarnom sekundarnom opterećenju strujnog transformatora. Stvarni granični faktor točnosti može se izračunati koristeći sljedeću formulu:

$$F_t = F_{tn} \cdot \frac{S_v + S_n}{S_v + S_b} \quad (5.2-11)$$

gdje je:

F_t – Stvarni nadstrujni broj strujnog transformatora,

F_{tn} – Nadstrujni broj strujnog transformatora,

S_v – vlastita potrošnja strujnog transformatora (VA),

S_n – nazivna snaga strujnog transformatora (VA),

S_b – snaga priključenog bremena (stvarno breme) strujnog transformatora (VA).

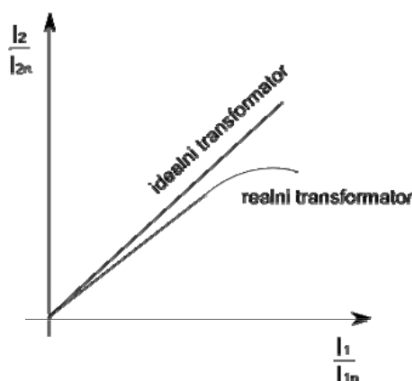
Stvarni nadstrujni broj strujnog transformatora (F_t) bit će jednak nadstrujnom broju (F_{tn}) kada je strujni transformator opterećen nazivnom snagom, odnosno kada je $S_b = S_n$. U takvim uvjetima, općenito vrijede sljedeće relacije:

$$S_n > S_b \rightarrow F_t > F_{tn}$$

$$S_n = S_b \rightarrow F_t = F_{tn}$$

$$S_n < S_b \rightarrow F_t < F_{tn}$$

U situacijama kada maksimalna struja kratkog spoja dostiže vrlo visoke vrijednosti, nadstrujni broj može nadmašiti standardne specifikacije. U takvim okolnostima, odabire se strujni transformator s većom nazivnom snagom od one koja je nominalno potrebna (tj. $S_n > S_b$). Time se osigurava da stvarni nadstrujni broj bude veći od nadstrujnog broja. Dalje, grafička ilustracija prijenosne karakteristike strujnog transformatora prikazana je na slici 25. Za idealni strujni transformator, karakteristika se prikazuje kao pravac pod kutom od 45° u odnosu na apscisu, što označava da su prijenosna svojstva konstantna i ne ovise o omjeru struja primarnog i sekundarnog kruga. Suprotno tome, kod realnih transformatora ta karakteristika odstupa od idealne, što je jasno prikazano na slici 25.



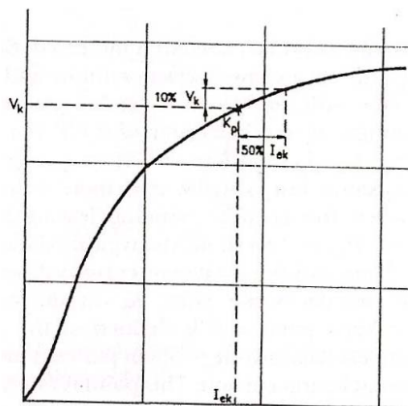
Slika 25: Grafička ilustracija prijenosne karakteristike strujnog transformatora.

Na natpisnoj pločici strujnih transformatora za zaštitu navedeni su ključni parametri koji uključuju: klasu točnosti, oznaku slova P (protection), te nadstrujni broj. Na primjer, oznaka 10P 30 implicira da složena pogreška strujnog transformatora ne prelazi 10% pri struji kvara, što ukazuje na njegovu sposobnost da zadrži točnost unutar zadatih granica pod uvjetima zaštite.

Pri izboru tehničkih podataka za strujne transformatore namijenjene zaštiti, posebno je važno razmotriti problem zasićenja jezgre u uvjetima kada se javljaju vrlo velike struje kvarova. Ova pojava može biti dodatno pogoršana prisustvom istosmjerne komponente u asimetričnim strujama kratkog spoja, što je osobito izraženo u prijenosnim mrežama u neposrednoj blizini elektrana ili unutar samih elektrana. U takvim scenarijima, ključno je temeljito pratiti i provjeriti moguće zasićenje jezgre strujnog transformatora kako bi se očuvala njegova učinkovitost i točnost zaštite. U distributivnim mrežama ovaj problem je znatno manje prisutan, te se stoga ne razmatra u istoj mjeri.

Da bi se spriječila pojava zasićenja jezgre transformatora u specifičnim instalacijama, poput elektrana, rasklopnih postrojenja i trafostanica blizu elektrana, potrebno je provesti detaljnu analizu mogućnosti zasićenja pri kvaru. Zasićenje jezgre može nastati zbog izmjenične komponente struje kratkog spoja ili prisustva istosmjerne komponente struje kratkog spoja. U svakom slučaju, ovo zasićenje uzrokuje pomak radne točke transformatora na krivulji magnetiziranja iznad tzv. točke koljena, što može značajno utjecati na performanse i točnost zaštitnog sustava.

Slika 26 ilustrira primjer krivulje magnetiziranja strujnog transformatora, koja prikazuje kako se sekundarna uzbudna struja (I_{ek}) transformatora mijenja u odnosu na sekundarni uzbudni napon (V_k). Ova krivulja može biti određena putem mjerenja, a proizvođači strujnih transformatora često uključuju ovu krivulju kao dio kataloških podataka.

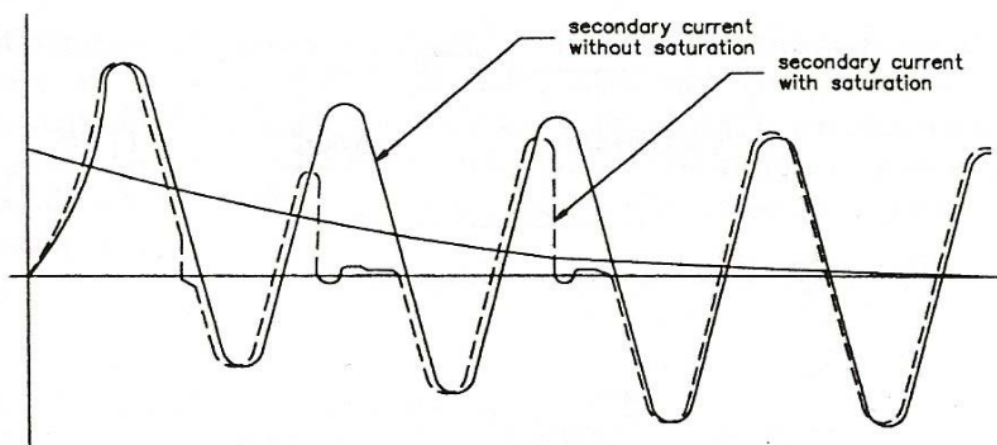


Slika 26: Primjer krivulje magnetiziranja strujnog transformatora.

Prema propisima IEC-a, točka koljena na krivulji magnetiziranja strujnog transformatora definirana je kao ta u kojoj dolazi do pedeset postotnog (50%) povećanja sekundarne uzbudne struje uslijed deset postotnog (10%) porasta sekundarnog uzbudnog napona. Ova točka predstavlja ključnu granicu iznad koje transformator može početi značajno zasićivati.

Zasićenje jezgre strujnog transformatora, uzrokovano prisustvom istosmjerne komponente u struji kratkog spoja, može imati ozbiljne posljedice za rad relejnih uređaja priključenih na njegovu sekundarnu stranu. Slika 27 prikazuje primjer distorzije ili iskrivljenja struje kratkog spoja na sekundarnoj strani transformatora, uzrokovane zasićenjem jezgre istosmjernom komponentom.

Na slici je krivulja sekundarne struje bez zasićenja prikazana punom linijom, dok je iskrivljena krivulja sekundarne struje uslijed zasićenja prikazana isprekidanom linijom. Ova značajna odstupanja u struji mogu uzrokovati pogrešno djelovanje relejne zaštite, što može imati ozbiljne posljedice za sigurnost i pouzdanost elektroenergetskih sustava.

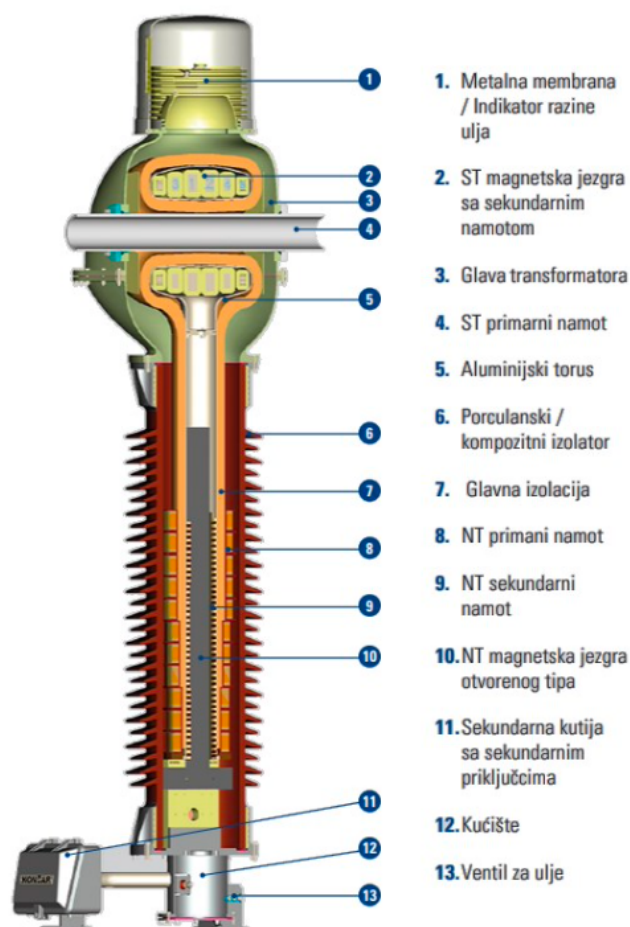


Slika 27: Utjecaj zasićenja jezgre strujnog transformatora istosmjernom komponentom na prijenos struje kvara na sekundarnu stranu.

Zaključno, istosmjerna komponenta struje kvara općenito ima značajniji utjecaj na zasićenje jezgre strujnog transformatora, a samim time i na njegovu točnost, u usporedbi s izmjeničnom komponentom struje kvara. Dok izmjenična komponenta može uzrokovati određeno zasićenje, prisustvo istosmjerne komponente dovodi do intenzivnijeg zasićenja jezgre, što može drastično pogoršati točnost transformatora i njegovu sposobnost da pravilno prenosi signal.

6. KOMBINIRANI MJERNI TRANSFORMATORI

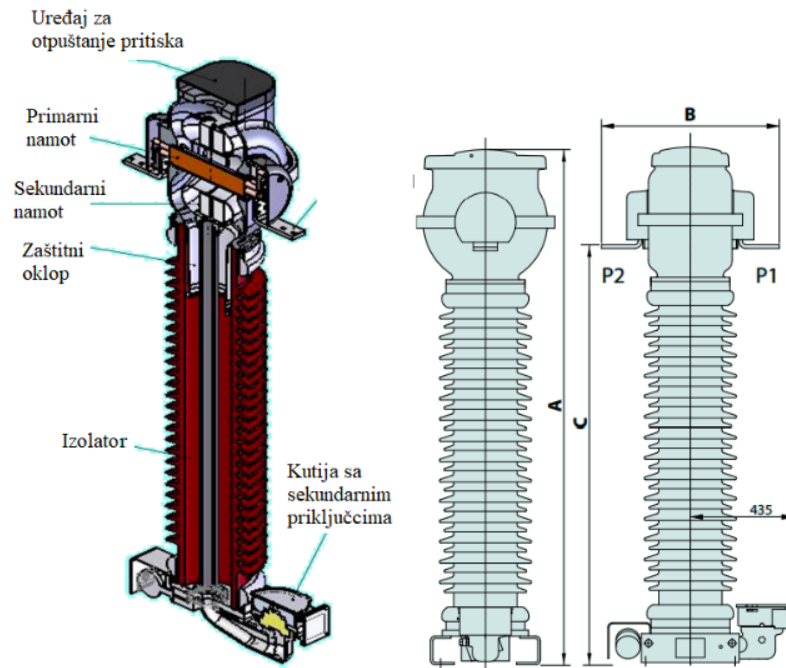
Kombinirani mjerni transformator sastoji se od dviju mjernih jedinica: strujnog mjernog transformatora i induktivnog naponskog mjernog transformatora. Njegova primarna funkcija, kao i kod svih drugih mjernih transformatora, jest prilagodba visokih struja i napona na strani primara tako da se na sekundarnoj strani dobivaju vrijednosti unutar definiranih granica točnosti, prikladne za povezivanje s mjernim uređajima, zaštitnim sklopovima i sustavima upravljanja. Osim mjerenja, kombinirani transformatori također pružaju izolaciju priključenih uređaja od visokog napona sustava, čime dodatno osiguravaju njihovu zaštitu.



Slika 28: Končar tip VAU, Presjek kombiniranog mjernog transformatora. [10]

6.1. Kombinirani mjerni transformator izoliran SF6 plinom

Ova vrsta mjernog transformatora koristi se za konverziju napona do 800 kV i struja do 6000 A. Strujni mjerni transformatori izolirani SF6 plinom ističu se visokom razinom sigurnosti i pouzdanosti, što ih čini izvrsnim izborom za različite uvjete okoline. Osim toga, kombinirani mjerni transformatori pružaju odgovarajuću električnu izolaciju između visokonaponskih mreža i mjerne opreme na niskom naponu, čime osiguravaju zaštitu i stabilnost u radu.



Slika 29: Trench tip TAG kombinirani strujni transformator izoliran SF6 plinom. [11]

Kombinirani strujni transformator na slici 29. zamišljen je za primjenu kod vanjske montaže, kod napona od 72,5 kV sve do 300 kV.

7. NEKONVENCIONALNI MJERNI TRANSFORMATORI

Mjerenje struje i napona pomoću transformatora sa željeznom jezgrom često promatramo kao mjerenje preko konvencionalnih mjernih transformatora. Ovi transformatori dosegli su svoj vrhunac u dizajnu i nisu doživjeli značajne promjene tijekom posljednjih nekoliko desetljeća tehnološkog razvoja. Međutim, s ulaskom u doba digitalizacije i rastom elektroničkih uređaja, jedna od glavnih slabosti konvencionalnih mjernih transformatora postaje sve očitija—njihova nekompatibilnost s modernom opremom za mjerenje.

Zbog ove nekompatibilnosti, nekonvencionalni mjerni transformatori doživljavaju sve veću popularnost u posljednjih nekoliko godina. Ovi transformatori, koji uglavnom ne koriste željeznu jezgru ili koriste alternativne materijale s boljim i stabilnijim reakcijama na brzo promjenjive impulsne signale, predstavljaju značajan iskorak u tehnologiji.

Napredak u razvoju elektroničkih sustava za nadzor, zaštitu, upravljanje i regulaciju elektroenergetskih sustava stvara potrebu za poboljšanjem postojećih mjernih transformatora ili

njihovom zamjenom modernim pretvaračima. Nova tehnologija zahtijeva sve niže ulazne snage, što znači da mjerni instrumenti moraju biti sposobni smanjiti ulazne vrijednosti na razine prikladne za rad elektroničkih sklopova. Sukladno tome, nekompatibilnost između modernih elektroničkih mjernih instrumenata i konvencionalnih transformatora postaje sve izraženija. Primjerice, strujni pretvarači sada mogu imati izlazne vrijednosti u miliamperima, umjesto u amperima.

Nekonvencionalni mjerni transformatori često uključuju ugrađene elektroničke sklopove koji omogućuju potpunu kompatibilnost s modernim digitalnim mjernim uređajima, što im pruža široke mogućnosti primjene i prilagodljivost različitim tehnološkim zahtjevima današnjice [12].

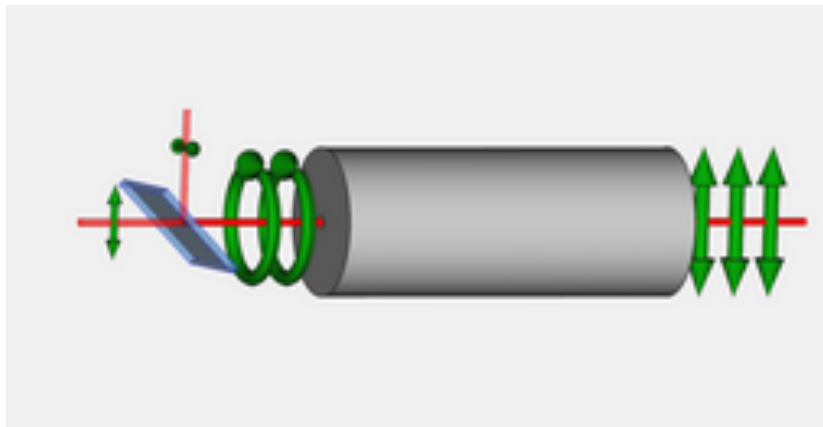


Slika 30: Nekonvencionalan strujni mjerni transformator sa optičkim senzorom

Tehnologija korištena u nekonvencionalnim mjernim transformatorima varira između različitih modela i proizvođača, no zajednička im je značajna prednost u smanjenju veličine i mase u usporedbi s konvencionalnim transformatorima. Ova redukcija dimenzija često je omogućena primjenom optičkih vlakana za prijenos signala, što pojednostavljuje visokonaponsku izolaciju.

Najčešći pristup optičkom mjerenju u nekonvencionalnim mjernim transformatorima temelji se na Faradayevom efektu. Ova metoda koristi promjenu faze linearno polariziranog svjetla kada je izloženo magnetskom polju, omogućujući precizno mjerenje struje. Slična tehnologija, poznata kao Pockelsov efekt, primjenjuje se za mjerenje napona.

Pockelsov efekt temelji se na pomaku faze između dvaju linearno polariziranih svjetlosnih zraka ortogonalno orijentiranih unutar električnog polja. Ovi optički efekti omogućuju visok stupanj preciznosti i pouzdanosti u mjerenju struja i napona, čineći nekonvencionalne mjerne transformatore idealnima za modernu elektroničku opremu.



Slika 31: Pockelsov efekt

Nekonvencionalni mjerni transformatori koriste različite tehnologije koje se dijelom oslanjaju na tradicionalne metode, ali s ključnim poboljšanjima. Sekundarni izlazi ovih transformatora mogu biti analogni, ali s nižim vrijednostima u usporedbi s konvencionalnim transformatorima, ili mogu biti djelomično digitalizirani unutar samog uređaja.

U mnogim suvremenim dizajnim, optička vlakna se koriste za prijenos signala do kontrolne sobe, što značajno pojednostavljuje izolaciju, budući da optička vlakna, za razliku od električnih vodiča, ne provode struju [13].

Iako su nekonvencionalni mjerni transformatori već dostupni na tržištu kao komercijalni proizvodi, njihova primjena je često ograničena kompatibilnošću s postojećom opremom u starijim postrojenjima. Zbog toga je njihova upotreba najčešće rezervirana za nova postrojenja gdje je moguće integrirati suvremenu tehnologiju od temelja.

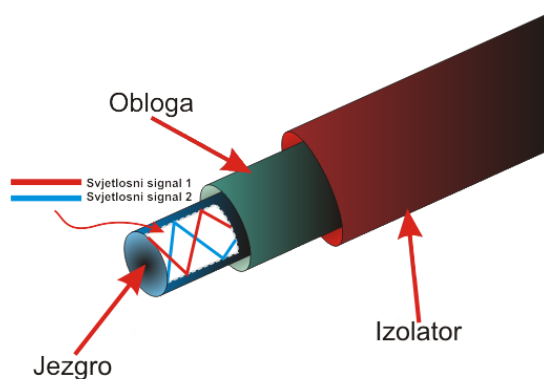
Drugi ograničavajući faktor ranije je bio nedostatak standardizacije sekundarnih izlaza, što je otežavalo kombiniranje uređaja različitih proizvođača. Međutim, s uvođenjem standarda IEC 61850, ova prepreka se postupno uklanja, omogućujući širu primjenu nekonvencionalnih transformatora.

Teoretski, nekonvencionalni mjerni transformatori omogućuju pristup zaštitnim i upravljačkim uređajima nedistorziranim replikama primarnih signala, pružajući niz prednosti nad tradicionalnim analognim sustavima.

Među prednostima su poboljšana sigurnost, kompaktniji dizajn, otpornost na elektromagnetske smetnje, brži odziv, širi frekvencijski i dinamički raspon te veća preciznost. Ove tehnologije su razvijene kao zamjena za konvencionalne mjerne transformatore na srednje i visokonaponskim dalekovodima. Iako pružaju potencijal za lagane i precizne uređaje za mjerenje struje i napona, još uvijek nisu dostigle razinu preciznosti potrebnu za potpuno pouzdanu primjenu u ovim kritičnim područjima.

7.1. Optički kabel

Nekonvencionalni mjerni transformatori uvelike se oslanjaju na tehnologiju optičkih vlakana za prijenos informacija i komunikaciju. Optička vlakna, koja se koriste kao glavni medij prijenosa, predstavljaju prozirne niti izrađene od stakla ili polimernih materijala, debljine tek nešto veće od ljudske vlasi. Ova vlakna prenose svjetlosne signale između svojih krajeva i koriste se prvenstveno u komunikacijama na velikim udaljenostima, gdje je potrebna visoka propusnost, daleko veća nego što to omogućavaju tradicionalni žičani vodiči.



Slika 32: Optičko vlakno

U usporedbi s metalnim vodičima, optička vlakna pružaju niz prednosti, uključujući prijenos signala uz minimalne gubitke te otpornost na elektromagnetske smetnje, što je izuzetno važno kod mjernih transformatora koji rade s visokim strujama i naponima, a time stvaraju i snažna elektromagnetska polja.

Tipična struktura optičkog vlakna sastoji se od jezgre, koja je obložena prozirnim omotačem s nižim indeksom loma. Ova struktura omogućava da svjetlost ostane unutar jezgre zahvaljujući fenomenu totalne unutarnje refleksije, što čini vlakno funkcionalnim valovodnim vodičem. Vlakna koja podržavaju više puteva prijenosa signala nazivaju se višemodna vlakna (MMF – *multi-mode fibers*), dok se ona koja podržavaju samo jedan put nazivaju jednomodna vlakna (SMF – *single-mode fibers*).

7.2. Optički senzori

Optički senzori za mjerenje struje i napona uglavnom se oslanjaju na dva ključna principa: Faradejev efekt za mjerenje struje i Pockelsov efekt za mjerenje napona. Iako senzori temeljeni na Faradejevom efektu nude jedinstvene mogućnosti, važno je napomenuti da trenutno imaju ograničenu osjetljivost koja može otežati njihovu preciznu implementaciju, što ih čini prikladnijima za visokonaponske vodove. Unatoč tome, optički senzori imaju značajnu prednost u obliku optičkog izlaznog signala, što ih čini izuzetno pogodnim za integraciju u moderne sustave koji već koriste optička vlakna. U usporedbi s Rogowskijevim svitcima, optički senzori nisu podložni smetnjama uzrokovanim okolnim magnetskim poljima, a dodatno su manjih dimenzija i bolje prilagođeni zahtjevima suvremenih pametnih mreža.



Slika 33: Primjer izvedbe ABB strujnog senzora od optičkih vlakana

Optički senzori, zahvaljujući svojoj neprovodljivoj prirodi, električki su pasivni, što ih u kombinaciji s kemijskom inertnošću čini idealnim za mjerenja u korozivnim i eksplozivnim okruženjima. Uz to, ovi senzori ne pate od zasićenja i pružaju linearan izlazni signal, čime nadmašuju Rogowskijeve svitke. Njihova lagana konstrukcija omogućuje veću prenosivost i fleksibilnost što je posebno korisno kod mjerenja struja na visokim naponima, jer omogućuje da elektronika senzora bude lako smještena na sigurnom, odvojenom od visokih napona. Dodatno, optički senzori olakšavaju daljinsku kontrolu i inspekciju na velikim udaljenostima, nudeći pritom široku propusnost i visoku preciznost mjerenja. Ipak, njihova primjena dolazi s izazovima; izuzetno su osjetljivi na vibracije, temperaturne promjene i druge klimatske uvjete, što povećava složenost instalacije u vanjskim uvjetima. Visoki proizvodni troškovi, koji proizlaze iz skupe sirovine i složenih proizvodnih procesa, također ograničavaju njihovu široku primjenu [13].

7.3. Rogowski svitak

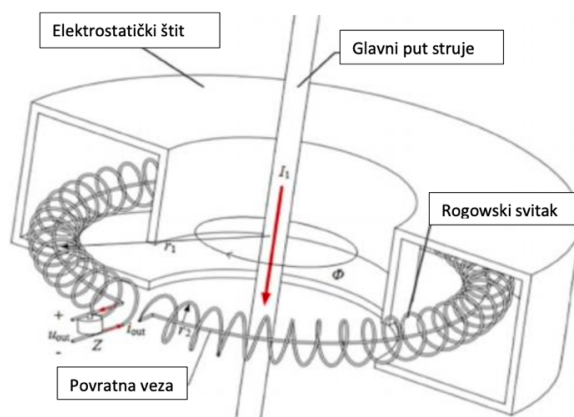
Rogowski svitak, kao najistaknutiji senzor za mjerenje struje, karakterizira se odsustvom feromagnetske jezgre, što omogućuje precizno mjerenje struja u iznimno širokom rasponu. Ovaj svitak može precizno detektirati struje od vrlo niskih vrijednosti, u redovima miliampera, pa sve do ekstremno visokih vrijednosti iznad 1 megaampera. Zahvaljujući izostanku jezgre koja bi mogla doći do zasićenja, mjerenje ostaje linearno kroz cijeli raspon. Princip rada Rogowskijevog svitka temelji se na detekciji magnetskih polja generiranih strujom, što ga, međutim, čini neprikladnim za mjerenje istosmjernih struja. Njegov frekvencijski raspon, koji se proteže od približno 0,1 Hz do 1 GHz, omogućuje mjerenje i izmjeničnih i prijelaznih struja. Kompaktna, lagana i energetska učinkovita konstrukcija Rogowskijevog svitka čini ga idealnim za primjenu u visokonaponskim krugovima, budući da ne postoji električna veza između svitka i mjerenog kruga. Ova karakteristika osigurava da svitak ne izaziva smetnje unutar mjernog sustava jer ne crpi energiju iz glavnog kruga. Dodatno, induktivitet koji svitak unosi u krug je minimalan, svega nekoliko pikohenrija, što garantira minimalan utjecaj na mjerene struje i sustave.



Slika 34: Rogowski svitak

Nije ih potrebno kontinuirano održavati, osim povremenih pregleda usmjerenih na otkrivanje fizičkog trošenja, osobito kada su izloženi nepovoljnim i grubim uvjetima okoline. Njihova kalibracija može se provesti pri bilo kojoj prikladnoj razini struje, nakon čega ostaju funkcionalni i precizni na svim drugim razinama, uključujući one koje uključuju izuzetno visoke struje. Zahvaljujući svom sofisticiranom dizajnu, Rogowski svitci ostaju otporni na oštećenja čak i pri izlaganju velikim preopterećenjima, čime se osigurava njihova dugotrajna pouzdanost i stabilnost u radu. S obzirom na to da se Rogowski svitak može koristiti za mjerenje struje, kontrolu i zaštitu, a uz to dolazi po povoljnoj cijeni, razumljivo je zašto je postao toliko popularan. Ipak, unatoč ovim prednostima, Rogowski svitak ima i određene nedostatke u usporedbi s drugim uređajima za mjerenje. Jedan od značajnijih nedostataka Rogowskijevog svitka leži u njegovoj inherentnoj

osjetljivosti na vanjska elektromagnetska polja, što može rezultirati neželjenim interferencijama, te stoga zahtijeva implementaciju složenih zaštitnih kućišta za smanjenje tih utjecaja. Dodatno, njihov izlazni signal je izrazito nizak, često u rasponu od svega nekoliko μV za struje primara ispod otprilike 100 A, što nameće potrebu za izuzetno pažljivim uzemljenjem i zaštitom kako bi se osigurala točnost mjerenja. Iako takva niska razina signala može predstavljati izazov, u određenim specifičnim primjenama ona može biti i prednost, omogućujući mjerenja u situacijama gdje je potrebna visoka osjetljivost. Što se tiče mjeriteljskih pogrešaka, one su uobičajeno u rasponu od 5-20% od nazivne struje, što može biti značajan faktor ograničenja. Ipak, razvojem naprednih rješenja moguće je povećati točnost mjerenja, smanjujući pogrešku na razinu od 0,5-5%. Djelomično rješenje ovog problema ostvareno je kroz inovativni dizajn Rogowski svitka na štampanoj pločici, što rezultira značajnim poboljšanjem preciznosti, smanjujući pogrešku na raspon od 0,2-0,5%, uz istodobno povećanje otpornosti na vanjska elektromagnetska polja. Uz to, ovi dizajni karakteriziraju niži izlazni naponi, što dodatno doprinosi njihovoj stabilnosti i pouzdanosti u kritičnim aplikacijama, čineći ih superiornijima u odnosu na tradicionalne Rogowski svitke[13].



Slika 35: Presjek Rogovskog svitka

Jedan od dodatnih izazova povezanih s Rogovskijevim svitkom jest potreba za integratorom prilikom mjerenja visokih struja, što može kompromitirati točnost i stabilnost njegovih mjerenja. Integracija, kao ključni korak za pretvorbu linearnih signala u korisne vrijednosti, može uzrokovati dodatne izvore pogrešaka i osjetljivost na smetnje. Osim toga, proces A/D konverzije i prijenosa podataka obično se odvija na mjernom mjestu, što može biti nepraktično ili čak neizvedivo u određenim okruženjima, posebno u slučajevima kada su prisutni visoki naponi. U takvim slučajevima, smještanje elektroničkih komponenti u blizini izvora visokog napona zahtijeva dodatni izvor napajanja, čime se povećava složenost sustava i potencijalni troškovi, kao i potreba za dodatnim mjerama zaštite i sigurnosti.

8. ZAKLJUČAK

Mjerni transformatori, dugi niz godina, predstavljaju ključnu komponentu elektroenergetskih postrojenja, zahvaljujući svojoj neporecivoj pouzdanosti. Tradicionalne izvedbe opremljene feromagnetskom jezgrom odlikuju se izuzetnom jednostavnošću, dugovječnošću i pristupačnošću, što ih čini neizostavnim dijelom elektroenergetskih sustava, unatoč postojanju tehnološki sofisticiranijih alternativa. Iako se razvijaju modernije tehnologije, konvencionalni transformatori s feromagnetskom jezgrom i dalje zadržavaju ključnu ulogu u elektroenergetici i vjerojatno će ostati vitalni elementi u sustavima još mnogo godina. Ova dugotrajna prisutnost usporava bržu adaptaciju nekonvencionalnih transformatora, što postavlja pitanje brzine kojom će nove tehnologije zapravo dobiti širu primjenu.

Međutim, s obzirom na rastuću kompleksnost elektroenergetskih sustava, pogotovo zbog ubrzanog razvoja obnovljivih izvora energije, postoji sve veća potreba za bržim, preciznijim mjerenjima i unaprijeđenom zaštitom cijelog sustava. U posljednjim godinama, pojavljuju se inovativne tehnologije temeljene na optičkim vlaknima i optičkim sensorima koje nude značajne prednosti u odnosu na tradicionalne mjere. Ove prednosti uključuju bolju kompatibilnost, niže troškove, kompaktnije dimenzije i unaprijeđenu sigurnost, čime se ove nove tehnologije čine izuzetno privlačnima za primjenu.

U svjetlu ovih naprednih tehnologija, nekonvencionalni mjerni transformatori imaju obećavajuću budućnost i potencijal da preuzmu vodeću ulogu u mjerenju i zaštiti elektroenergetskih sustava. Međutim, njihovo široko prihvaćanje i primjena bit će uvjetovani suradnjom između proizvođača i industrije na daljnjem razvoju i integraciji ovih tehnologija. Iako su u početku bili manje kompatibilni s postojećim elektroničkim mjernim instrumentima, taj problem se sve više prepoznaje kao ključni izazov koji zahtijeva rješavanje. Stoga će zajednički naponi u razvoju i standardizaciji ovih tehnologija biti presudni za njihovu buduću dominaciju u elektroenergetskim postrojenjima.

LITERATURA

- [1] V. Bego, Mjerenja u elektrotehnici, Tehnička knjiga, Zagreb, 1979.
- [2] C. Globe, Circuit Globe, Difference Between Core Type and Shell Type Transformer, s interneta: <https://circuitglobe.com/difference-between-core-type- and-shell-type-transformer.html>.
- [3] E. R. Tajne, Core Type and Shell Type Transformer Characteristics, s interneta: <https://omgfreestudy.com/difference-between-core-type-and-shell-type/>.
- [4] Končar, Tehnički priručnik, Končar Elektroindustrija d.d., Zagreb, 1991..
- [5] C. Globe, Circuit Globe - Capacitive Voltage Transformer (CVT), s interneta: <https://circuitglobe.com/capacitive-voltage-transformer-cvt.html>.
- [6] P. P. Team, Current Transducers: Split Core, Solid Core, and Why You Should Care, s interneta: <https://www.packetpower.com/blog/split-core-solid-core- and-why-you-should-care>.
- [7] C. C. System, TCL-B Solid-Core CT, s interneta: <https://ctlsys.com/product/tcl-b-ct/>.
- [8] E. Charging, Split-Core Current Transformer, s interneta: <https://www.replenishh.com/eo-charging-ct250a-250a- split-core-current-transformer-65-2979>.
- [9] Eaton power system, Current Transformers CT, s interneta: https://www.youtube.com/watch?v=32Vw40nUSwA&ab_channel=EatonVideos.
- [10] Končar, VAU kombinirani mjerni transformator, s interneta: http://www.koncar-mjt.hr/en/docs/koncarmjtHR/documents/53/1_0/Original.pdf.
- [11] T. Italia, Trench SF6 Insulated Transformers for outdoor Installation, s interneta: https://cursa.ihmc.us/rid=1L6G62D62-202MC1G-1H8Y/SF6_72- 300kV.pdf.
- [12] Bojan Nikolić, Sanowar Khan and Nikita Gabdullin, Journal of Physics: Conference Series 772 (2016) 012065
- [13] Jon Ivar Juvik, A calibration system for instrument transformers with digital output, thesis for the degree of licentiate of engineering, department of electric power engineering chalmers university of technology Göteborg, Sweden 2001

- [14] Lee, Byounggho, Review of the present status of optical fiber sensors, Optical Fiber Technology, 2003
- [15] Končar, VCU Kapacitivni Naponski Transformatori, s interneta: http://www.koncar-mjt.hr/docs/koncar-mjtHR/documents/54/1_0/Original.pdf
- [16] Hrvatska Tehnička Enciklopedija, Mjerni Transformatori, s interneta, http://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/mjerni_transformatori.pdf
- [17] Končar, VPU Induktivni Naponski Transformatori, s interneta: http://www.koncar-mjt.hr/docs/koncar-mjtHR/documents/55/1_0/Original.pdf
- [18] Bego, V, Mjerni transformatori, Školska knjiga, Zagreb 1977.
- [19] Sarajčev P, Zaštita U Elektroenergetskom Sustavu, Sveučilište U Splitu - Sveučilišni Studijski Centar Za Stručne Studije, 2012

POPIS SLIKA

Slika 1: Shema idealnog transformatora. _____	2
Slika 2: Shema idealnog transformatora uz realne gubitke. [1] _____	3
Slika 3: Nadomjesna shema realnog transformatora. [1] _____	3
Slika 4: Označavanje stezaljki naponskog transformatora. [1] _____	4
Slika 5: Označavanje stezaljki strujnog transformatora. [1] _____	5
Slika 6: Provjera polariteta oznaka stezaljki. [1] _____	5
Slika 7: Vektorski dijagram naponskog mjernog transformatora. _____	6
Slika 8: Shema paralelnog spajanja naponskog mjernog transformatora _____	7
Slika 9: Visokonaponski mjerni transformator _____	8
Slika 10: Lim jezgre u obliku slova L [2] _____	9
Slika 11: Naponski mjerni transformator jezgrastog tipa [3] _____	10
Slika 12: Lim jezgre u obliku slova E i I. [2] _____	11
Slika 13: Naponski mjerni transformator ogrnutog tipa [2] _____	11
Slika 14: Presjek kapacitivnog naponskog mjernog transformatora [15] _____	12
Slika 15: Presjek induktivnog naponskog mjernog transformatora [17] _____	13
Slika 16: Redukcija i mjerenje struje kroz vodič. [6] _____	14
Slika 17: Vektorski dijagram strujnog mjernog transformatora _____	14
Slika 18: Inducirano magnetsko polje vodiča omeđeno jezgrom strujnog transformatora ____	15
Slika 19: Jednopolna shema serijski spojenog strujnog mjernog transformatora _____	16
Slika 20: SMT s punom jezgrom tvrtke Continental Control Systems. [7] _____	17
Slika 21: SMT s podijeljenom jezgrom tvrtke EO Chraging. [8] _____	18
Slika 22: Vakuumski prekidač 33kV 35kV 36kV 1250A sa strujnim transformatorom. _____	19
Slika 23: Stezaljke strujnog mjernog transformatora sa podesivim omjerima. _____	20
Slika 24: Grafička ilustracija načina spoja proradnog člana nadstrujnog releja na sekundarnu stranu / namot strujnog transformatora. _____	24
Slika 25: Grafička ilustracija prijenosne karakteristike strujnog transformatora. _____	28

Slika 26: Primjer krivulje magnetiziranja strujnog transformatora. _____	29
Slika 27: Utjecaj zasićenja jezgre strujnog transformatora istosmjernom komponentom na prienos struje kvara na sekundarnu stranu. _____	30
Slika 28: Končar tip VAU, Presjek kombiniranog mjernog transformatora. [10] _____	31
Slika 29: Trench tip TAG kombinirani strujni transformator izoliran SF6 plinom. [11] _____	32
Slika 30: Nekonvencionalan strujni mjerni transformator sa optičkim senzorom _____	33
Slika 31: Pockelsov efekt _____	34
Slika 32: Optičko vlakno _____	35
Slika 33: Primjer izvedbe ABB strujnog senzora od optičkih vlakana _____	36
Slika 34: Rogowski svitak _____	37
Slika 35: Presjek Rogowskog svitka _____	38

POPIS TABLICA

Tablica 1: Standardne vrijednosti nazivnih sekundarnih napona. [19] _____	22
Tablica 2: Standardne vrijednosti nazivnih snaga. [19] _____	22
Tablica 3: Granice pogrešaka NT-a za zaštitu. [19] _____	23
Tablica 4: Standardne vrijednosti nazivnih primarnih struja. [19] _____	24
Tablica 5: Najčešće vrijednosti standardnih nazivnih sekundarnih struja.. [19] _____	25
Tablica 6: Najčešće vrijednosti standardnih nazivnih sekundarnih struja.. [19] _____	26
Tablica 7: Granice složene progeške strujnih transformatora za zaštitu klase P.[19] _____	27
Tablica 8: Standardne vrijednosti nadstrujnog broja. [19] _____	27

SAŽETAK

U ovom završnom radu analizirani su mjerni transformatori koji su ključni za elektroenergetska postrojenja zbog svoje pouzdanosti i dugovječnosti, osobito tradicionalni mjerni transformatori s feromagnetskom jezgrom koji su jednostavni, dugotrajni i pristupačni. Proučili smo osnove strujnih i naponskih mjernih transformatora te saznali koji su to parametri bitni prilikom njihovog izbora. Također smo opisali nove tehnologije u ovom području te zaključili da iako nove tehnologije nude naprednije alternative, tradicionalni transformatori i dalje igraju važnu ulogu u elektroenergetici, usporavajući bržu adaptaciju inovacija. S rastućom kompleksnošću sustava i potrebom za bržim i preciznijim mjerenjima, nove tehnologije poput optičkih vlakana i senzora nude prednosti kao što su bolja kompatibilnost, niži troškovi i poboljšana sigurnost. Nekonvencionalni mjerni transformatori imaju potencijal za preuzimanje vodeće uloge u budućnosti, no njihovo široko prihvaćanje ovisi o suradnji na daljnjem razvoju i standardizaciji, posebno u rješavanju problema kompatibilnosti s postojećim sustavima.

Ključne riječ: Mjerni transformator, strujni mjerni transformator, naponski mjerni transformator, razred točnosti, zaštita, nazivni napon, idealan transformator.

ABSTRACT

In this final paper, we analyzed instrument transformers, which are crucial for power systems due to their reliability and durability, especially traditional instrument transformers with ferromagnetic cores, which are simple, long-lasting, and cost-effective. We examined the fundamentals of current and voltage instrument transformers and identified the key parameters important for their selection. We also described new technologies in this field and concluded that, although modern technologies offer more advanced alternatives, traditional transformers still play a significant role in power systems, slowing the faster adoption of innovations. With the increasing complexity of systems and the need for faster and more precise measurements, new technologies such as optical fibers and sensors provide advantages like better compatibility, lower costs, and enhanced safety. Unconventional instrument transformers have the potential to take a leading role in the future, but their widespread acceptance depends on ongoing collaboration in further development and standardization, particularly in addressing compatibility issues with existing systems.

Keywords: instrument transformer, current instrument transformer, voltage instrument transformer, accuracy class, protection, rated voltage, ideal transformer.