

Posebne vrste transformatora i njihova primjena

Zorić, Andrej

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:200:172384>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-23**

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

**POSEBNE VRSTE TRANSFORMATORA I NJIHOVA
PRIMJENA**

Završni rad

Andrej Zorić

Osijek, 2024

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1S: Obrazac za ocjenu završnog rada na stručnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na stručnom prijediplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Andrej Zorić
Studij, smjer:	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer
Mat. br. pristupnika, god.	A4692, 27.07.2021.
JMBAG:	0165089030
Mentor:	dr. sc. Željko Špoljarić
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	dr. sc. Krešimir Miklošević
Član Povjerenstva 1:	dr. sc. Željko Špoljarić
Član Povjerenstva 2:	Zorislav Kraus, dipl. ing. el.
Naslov završnog rada:	Posebne vrste transformatora i njihova primjena
Znanstvena grana završnog rada:	Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rada:	
Datum ocjene pismenog dijela završnog rada od strane mentora:	05.09.2024.
Ocjena pismenog dijela završnog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane završnog rada:	13.09.2024.
Ocjena usmenog dijela završnog rada (obrane):	Dobar (3)
Ukupna ocjena završnog rada:	Vrlo dobar (4)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio stručni prijediplomski studij:	19.09.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 19.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:

Andrej Zorić

Studij:Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer
Elektroenergetika**Mat. br. Pristupnika, godina
upisa:**

A4692, 27.07.2021.

Turnitin podudaranje [%]:

12

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Posebne vrste transformatora i njihova primjena**

izrađen pod vodstvom mentora dr. sc. Željko Špoljarić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TRANSFORMATORI	2
2.1. Princip rada transformatora	2
2.2. Fizikalna priroda transformatora	2
2.3. Konstrukcija transformatora	4
3. AUTOTRANSFORMATORI	6
3.1. Snaga autotransformatora	8
3.2. Prednosti i nedostaci autotransformatora	10
3.3. Primjena autotransformatora	10
4. MJERNI TRANSFORMATORI	11
4.1. Strujni mjerni transformatori	11
4.1.1. Princip rada strujnih mjernih transformatora	11
4.1.2. Podjela strujnih mjernih transformatora	13
4.1.3. Klasa točnosti strujnih mjernih transformatora	14
4.1.4. Prednosti, nedostaci i primjena strujnih mjernih transformatora	15
4.2. Naponski mjerni transformatori	16
4.2.1. Princip rada naponskih mjernih transformatora	16
4.2.2. Podjela naponskih mjernih transformatora	17
4.2.3. Prednosti, nedostaci i primjena naponskih mjernih transformatora	18
5. PRIMJENA POSEBNIH VRSTA TRANSFORMATORA	19
5.1. Regulacijski transformatori	19
5.2. Transformatori za zavarivanje	20
5.3. Izolacijski transformatori	23
6. ZAKLJUČAK	25
LITERATURA	26

1. UVOD

U današnje vrijeme postoji velika potražnja za sustavima za efikasnu upotrebu električne energije. Transformatori su nezamjenjivi elementi u elektroenergetskom sustavu koji omogućavaju povećanje ili smanjivanje napona te su neophodni za distribuciju i prijenos električne energije. Njihov značaj raste zbog sve već potrebe za unapređivanjem kvalitete električne energije i smanjenjem gubitaka. Osim standardnih transformatora, suvremene elektroenergetske mreže koriste posebne vrste transformatora koji su važan element u sustavu. Posebne vrste transformatora se koriste tamo gdje standardni transformatori ne mogu obaviti svoju funkciju. Takve vrste transformatora se koriste u raznim industrijama poput medicine, telekomunikacija, automobilske industrije i proizvodnje. U ovom radu će pažnja biti posvećena na analizi specifičnih vrsta transformatora kao što su mjerni transformatori, autotransformatori i transformatori za zavarivanje. Cilj analize je prikazati relevantnost specijalnih vrsta transformatora u elektroenergetskom sustavu. Sukladno zahtjevima industrije i tehničkim uvjetima, svaki transformator ima svoju namjenu, konstrukciju i princip rada. Na primjer, u proizvodnji i industriji se koriste transformatori za zavarivanje koji imaju ulogu da napajaju aparate za zavarivanje.

Cilj ovog završnog rada je oplemeniti teorijsko i praktično znanje o posebnim vrstama transformatora te poboljšati bolje razumijevanje i optimizaciju primjene posebnih vrsta transformatora u elektroenergetskim sustavima. S pomoću analiza i usporedbe ovih transformatora, prikazat će se način na koji rade specijalne vrste transformatora, objasniti razlike između istih i opisati namjenu za svakog. U uvodnom dijelu rada se određuju predmet i cilj rada. U drugom poglavlju je opisano osnovno o transformatorima što uključuje princip rada, konstrukciju i podjelu. U trećem poglavlju će biti temeljito istraženi autotransformatori, način na koji rade i konstrukcija. Četvrto poglavlje je vezano za mjerne transformatore koji su važni za mjerenje i zaštitu u elektroenergetskom sustavu. Kroz peto poglavlje će detaljno biti opisana šira primjena posebnih vrsta transformatora u različitim industrijama, izražavajući njihovu važnost u modernim elektroenergetskim sustavima.

2. TRANSFORMATORI

Transformatori su uređaji koji imaju značajnu ulogu u prijenosu i distribuciji električne energije u elektroenergetskom sustavu. U ovom poglavlju transformator će biti detaljno opisan s fokusom na njegovu fizikalnu prirodu, princip rada i konstrukciju.

2.1. Princip rada transformatora

Transformator je statički elektromagnetski uređaj koji električnu energiju iz jednog ili više izmjeničnih krugova, koji napajaju primarne namote transformatora prenosi u jedan ili više izmjeničnih krugova koji su napajani iz sekundarnih namota transformatora, s izmjeničnim iznosima struja i napona te nepromijenjenom frekvencijom. Transformacija se događa u aktivnom dijelu transformatora koji se sastoji od jezgre i namota. Energija koja ulazi u transformator kroz primarni namot s pomoću magnetskog toka u jezgri se kreće u sekundarni namot s različitim vrijednostima struje i napona od primarnog namota te put nastavlja prema potrošaču. Dakle, smjer energije je od primara prema sekundaru, pa isti namot može biti primarnim ili sekundarnim namotom ovisno o smjeru energije na mjestu ugradnje. Transformator se smatra transformatorom za povećanje ili smanjenje ovisno o tome je li sekundarni napon viši ili niži od primarnog napona. Transformatori se mogu koristiti za povećanje ili smanjenje napona, ovisno o potrebi i primjeni, stoga se njihovi namoti nazivaju visokonaponski/ niskonaponski umjesto primarnih/sekundarnih namota [1].

2.2. Fizikalna priroda transformatora

Funkcija transformatora temelji se na Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije [1]:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2 - 1)$$

gdje je:

e – inducirani napon

$\frac{d\Phi}{dt}$ – promjena magnetskog toka po jedinici vremena

Upotrebom vremenske promjene magnetskog toka Φ ulančanog petljom se inducira napon e . Takav napon u zatvorenoj petlji će potjerati struju i , zatim će ona proizvesti dodatni magnetski tok koji će opirati promjeni magnetskog toka Φ , u skladu s Lenzovim zakonom. Petlja u obliku zavojnice s N zavoja može povezati isti tok Φ . Po takvom principu nastaje ulančani magnetski tok Ψ koji je računa prema izrazu [1]:

$$\Psi = N \Phi \quad (2 - 2)$$

gdje je:

Ψ – ulančani magnetski tok

N – broj zavoja

Φ – magnetski tok

Ako svaki od N zavoja ne ulančuje cijeli tok Φ , tada je ulančani magnetski tok Ψ manji od $N \Phi$ i iznosi [1]:

$$\Psi = N \Phi_c \quad (2 - 3)$$

gdje je Φ_c ekvivalentni magnetski tok koji je povezan s N zavoja generira ulančani tok Ψ . U tom slučaju, inducirani napon iznosi [2]:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi_c}{dt} \quad (2 - 4)$$

Naponi koji se induciraju u primarnoj i sekundarnoj zavojnici iznose [2]:

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi_{1c}}{dt} \quad (2 - 5)$$

$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi_{2c}}{dt} \quad (2 - 6)$$

Ako se analiziraju efektivne vrijednosti iz ovih jednadžbi, dobiva se [2]:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2 - 7)$$

Za idealni transformator, kod kojeg se mogu ignorirati padovi napona, vrijedi: [2]:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2 - 8)$$

Zbog zanemarenih gubitaka snage, ulazna snaga je jednaka izlaznoj snazi, što znači da vrijedi [2]:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} \quad (2 - 9)$$

Uvrštavanjem dviju formula dobiva se [2]:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2 - 10)$$

Osnovna veličina u procesu transformacije je koeficijent transformacije koji je omjer između induciranih napona. U slučaju idealnog jednofaznog transformatora, pomoću jednadžbe (2-7) koeficijent transformacije se može izraziti omjerom broja zavoja [2]:

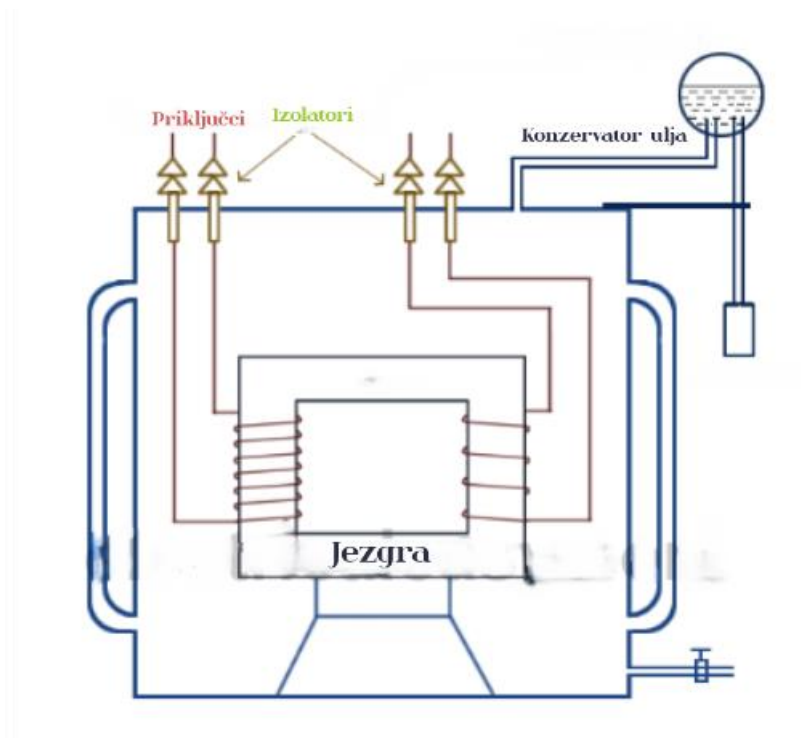
$$k_{12} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2 - 11)$$

Naponi primara i sekundara su u odnosu koji odgovara njihovim brojevima zavoja, dok su struje primara i sekundara obrnuto proporcionalne tim brojevima. Namot koji je planiran za viši napon ima više zavoja kroz koje prolazi manja struja, dok namot prilagođen za niži napon ima manje zavoja kroz koje teče veća struja. Stoga, namot za gornji napon sadrži više od tanje žice, dok za namot za donji napon ima manje zavoja od deblje žice [2].

2.3. Konstrukcija transformatora

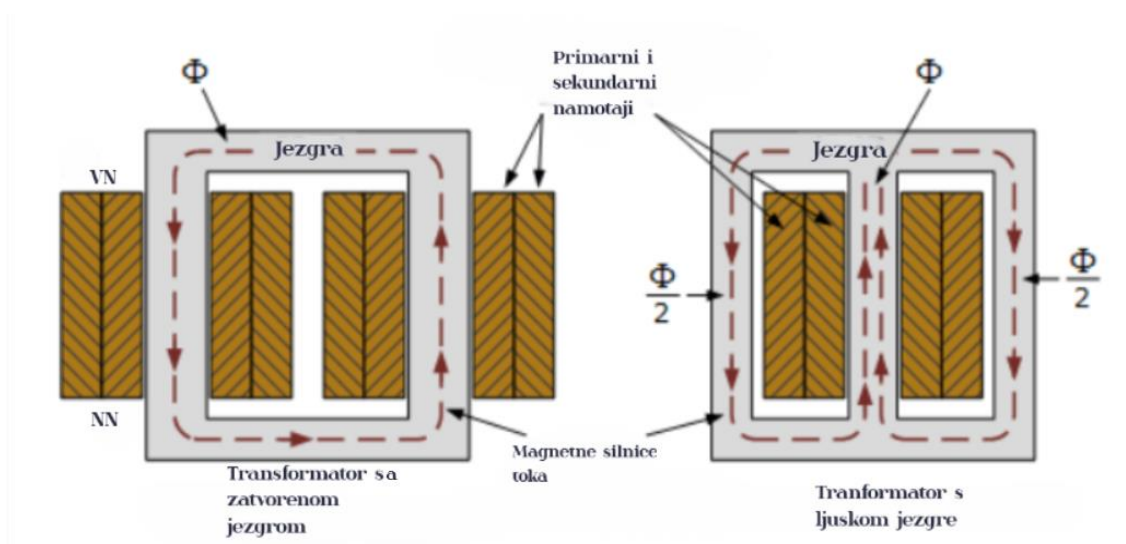
Transformator se sastoji od dvije induktivne zavojnice i laminirane čelične jezgre. Zavojnice su međusobno izolirane te od čelične jezgre. Transformator može uključivati i spremnik za smještaj zavojnica i jezgre (poznat kao "rezervoar"), odgovarajuće priključne uvodnice, te konzervator ulja koji osigurava opskrbu uljem u spremniku transformatora radi hlađenja. Slika 2.1. pokazuje osnovnu strukturu transformatora. Jezgra transformatora se sastavlja od laminiranih čeličnih listova, pri čemu se nastoji održati minimalni zračni razmak između njih kako bi se osigurao neprekidni magnetski put. Čelik koji se koristi ima visok sadržaj silicija i ponekad se podvrgava toplinskoj obradi kako bi se postigla visoka permeabilnost i smanjili gubici uzrokovani histerezi. Laminirani čelični listovi pomažu u smanjenju gubitaka izazvanih vrtložnim strujama. Čelični listovi se režu u oblike E, I i L. Kako bi se spriječila visoka reluktancija na spojevima, laminacije se sastavljaju naizmjenično s različitih strana spojeva, ako su spojevi prvog spoja na prednjoj strani, spojevi sljedećeg spoja nalaze se na stražnjoj strani [3].

Transformatori se sastoji od dva skupa namotaja: primarnog i sekundarnog. Ovi namotaji su najčešće izrađeni od aluminijske ili bakrene žice te su omotani oko jezgre. Primarni namotaj je spojen na ulazni izvor napona, dok je sekundarni namotaj spojen s opterećenjem. Broj namotaja definira omjer između primarne i sekundarne strane. Izolacijski materijali služe za električnu izolaciju namotaja međusobno i od jezgre, čime se onemogućavaju kratki spojevi i osigurava siguran rad transformatora. Standardni materijali za izolaciju obuhvaćaju papir, lak i sintetičke tvari s visokom dielektričnom čvrstoćom. Odgovarajuća izolacija doprinosi reduciranju energetske gubitaka unutar transformatora [4].



Slika 2.1. Konstrukcija transformatora [3]

Naziv koji se koristi za izradu transformatora zavisi od načina na koji su primarni i sekundarni namoti postavljeni oko središnje laminirane jezgre. Dva osnovna dizajna transformatora su transformator sa zatvorenom jezgrom i transformator s ljuskom jezgre te su prikazani na slici 2.2. U transformatoru sa zatvorenom jezgrom, primarni i sekundarni namoti su namotani izvana i omeđuju prstenaste dijelove jezgre. Kod transformatora s ljuskom jezgre, primarni i sekundarni namoti prolaze unutar čeličnog magnetskog kruga koji formira ljusku oko namota [5].

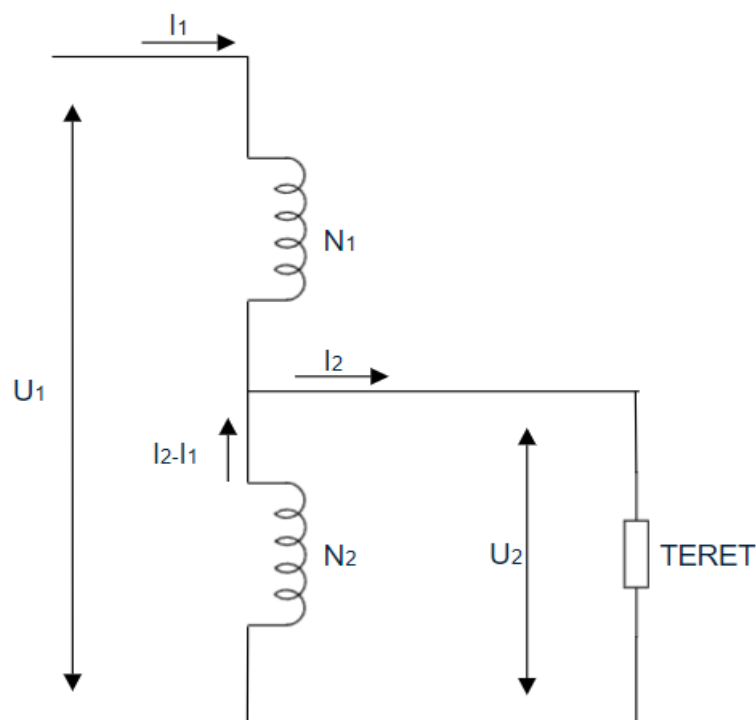


Slika 2.2. Konstrukcija transformatorske jezgre [5]

Kod navedenih tipova konstrukcije jezgre transformatora, magnetski tok koji povezuje primarni i sekundarni namot putuje prvenstveno unutar jezgre, bez gubitka kroz zrak. Kod transformatora sa zatvorenim jezgrom, jedan dio namota je omotan oko svakog kraka magnetskog kruga transformatora. Namoti nisu podijeljeni tako da je primarni namot na jednom kraku, a sekundarni na drugom. Umjesto toga, polovica primarnog namota i polovica sekundarnog namota postavljena su jedna iznad druge, čime se povećava magnetsko povezivanje. To omogućava da praktički sve magnetske silnice prolaze kroz oba namota istovremeno. Transformator s ljuskom jezgre smanjuje gubitak magnetskog toka jer su primarni i sekundarni namoti smješteni na istom središnjem kraku, koji ima dvostruku poprečnu površinu s obzirom na dva vanjska kraka. Ova konfiguracija omogućava magnetskom toku da prolazi kroz dva zatvorena magnetska puta oko namota s obje strane, lijevo i desno, prije nego se vrati u središnje namote. Budući da magnetski tok ima zatvoren put oko namota, to omogućava smanjenje gubitaka u jezgri i povećanje ukupne učinkovitosti [5].

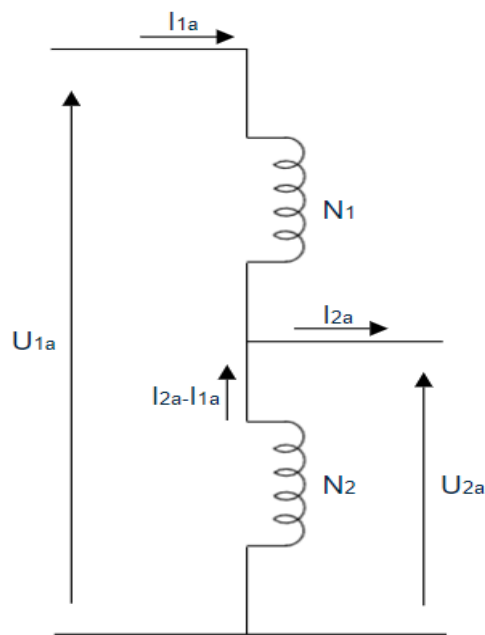
3. AUTOTRANSFORMATORI

Umjesto korištenja dva odvojena namota transformatora, primarnog i sekundarnog, transformator se sastoji od samo jednog namota, gdje se primarni namot preoblikuje tako da sadrži isti broj zavoja kao sekundarni namot. Tako pretvarajući dio primarnog namota sa sekundarnim namotom, generira se autotransformator, poznat i kao transformator u štednom spoju. Autotransformator je vrsta transformatora u kojoj su dva namota spojena galvanski i magnetski. Visokonaponska strana sadrži serijski i zajednički (paralelni) namot, dok niskonaponska strana sadrži isključivo zajednički namot. U autotransformatoru se samo dio snage transformira induktivno, dok se preostali dio izravno prenosi iz primara u sekundar galvanskim spojem namota. Primjer načelne sheme autotransformatora prikazan je na slici 3.1. gdje je N_1 serijski namot, a N_2 zajednički namot [6].



Slika 3.1. Nadomjesna shema autotransformatora

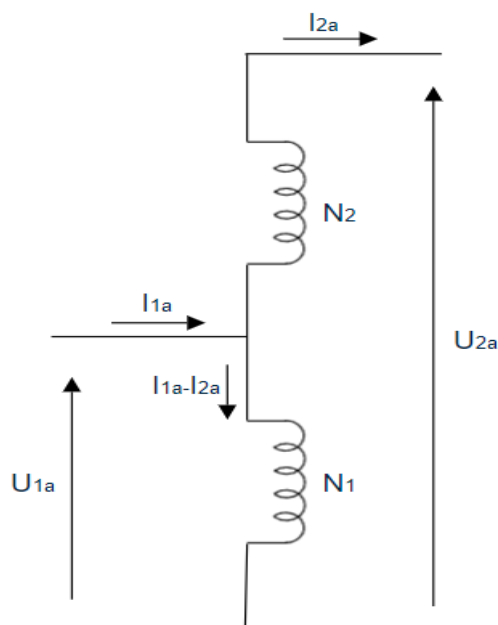
Svaki autotransformator se može opisati kao transformator s promjenljivim omjerom napona, odnosno možemo ga tumačiti kao uzlazni ili silazni spoj. U silaznom spoju vrijednost napona primara veća je od vrijednosti napona sekundara, što je prikazano na slici (3.2.). Primarni namot sastoji se od zbroja serijskog i zajedničkog namota, dok je sekundarni namot zapravo zajednički namot. U uzlaznom spoju, naponska vrijednost primara je manja od naponske vrijednosti sekundara, što je ilustrirano na slici (3.3.). U ovom slučaju, primarni namot je zajednički namot, a sekundarni namot je zbroj serijskog i zajedničkog namota.



Slika 3.2. Nadomjesna shema silaznog autotransformatora

$$N_1 = N_s + N_z \quad (3 - 1)$$

$$N_2 = N_z \quad (3 - 2)$$



Slika 3.3. Nadomjesna shema uzlaznog autotransformatora

$$N_1 = N_2 \quad (3 - 3)$$

$$N_2 = N_2 + N_s \quad (3 - 4)$$

3.1. Snaga autotransformatora

Tipska snaga autotransformatora predstavlja snagu koju može prenijeti dvonamotni transformator pri normalnim radnim uvjetima, odnosno pri trajnom opterećenju nazivnim strujama i naponima na visokonaponskoj i niskonaponskoj strani. Za jednofazni autotransformator vrijedi [6]:

$$S_a = U_{1a} I_{1a} = (U_1 + U_2) I_1 \quad (3 - 5)$$

$$S_a = U_1 I_1 \left(1 + \frac{U_2}{U_1} \right) \quad (3 - 6)$$

$$S_a = S_T \frac{U_{1a}}{U_{1a} - U_{2a}} \quad (3 - 7)$$

$$S_T = S_a \left(1 - \frac{U_{2a}}{U_{1a}} \right) \quad (3 - 8)$$

Nazivna snaga autotransformatora (S_a) je još poznata i kao prolazna snaga. Za trofazni autotransformator vrijedi isti odnos između tipske snage i snage autotransformatora. Faktor redukcije je omjer nazivne snage i tipske snage te pokazuje koliko je tipska snaga manja od nominalne, što rezultira uštedom materijala od kojeg je transformator izrađen. Zbog toga se spoj namota koji tvori autotransformator naziva štednim spojem [6].

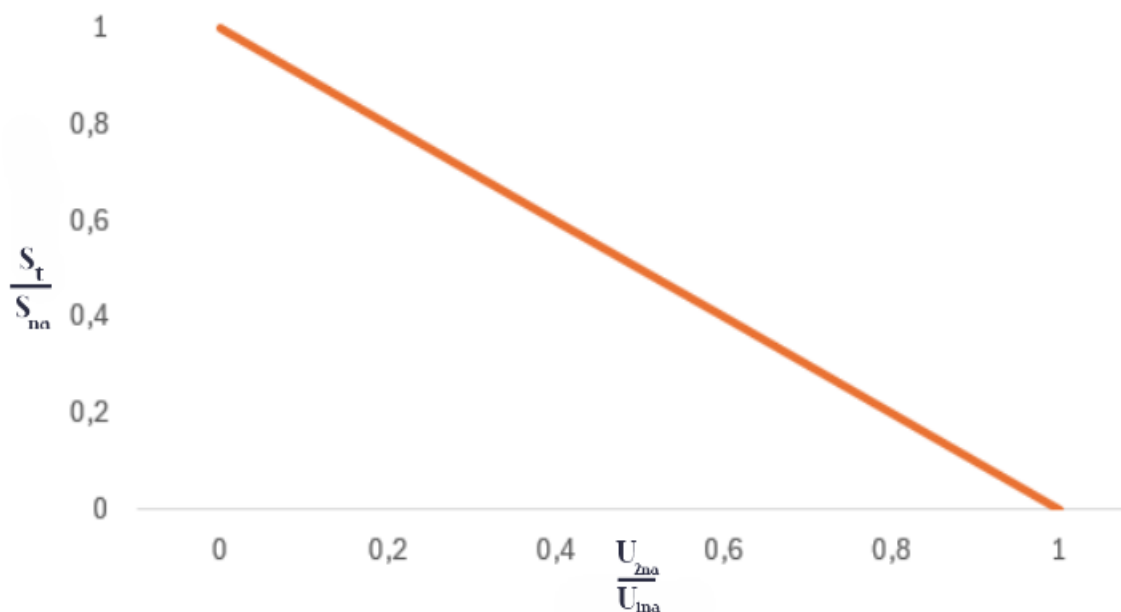
Faktor redukcije je definiran izrazom:

$$q = \frac{S_T}{S_a} = \left(1 - \frac{U_{2a}}{U_{1a}} \right) \quad (3 - 9)$$

Povećanje nazivne snage u odnosu na tipsku snagu proistječe iz činjenice da se dio snage prenosi direktnom galvanskom vezom između primarnog i sekundarnog namota, a ne isključivo putem zajedničkog ulančenog magnetskog polja. Zbog toga je moguće definirati i faktor povećanja snage autotransformatora u odnosu na tipsku snagu prema izrazu [1]:

$$F_a = \frac{S_a}{S_T} = \frac{1}{1 - \frac{U_{2a}}{U_{1a}}} \quad (3 - 10)$$

Ušteda u tipskoj snazi veća je kada je omjer transformacija autotransformatora bliži jedinici. Kad navedeni omjer postigne vrijednost jedan, tipska snaga autotransformatora je jednaka nuli. Na slici (3.4.) se nalazi grafički prikaz izraza (3-8) [1].



Slika 3.4. Ovisnost tipske snage autotransformatora o omjeru transformacije

Autotransformator se najčešće izvodi u spoju YNa0, što označava spoj autotransformatora u zvijezdu s uzemljenim zvjezdištem. Ovim spojem se ograničava prenapon koji se prenosi s primarne na sekundarnu stranu putem galvanske veze između namota.

Kod autotransformatora nije moguće izvesti Dy ili Yd spoj, jer visokonaponski i niskonaponski namoti moraju dijeliti zajedničku nultočku. To je razlog zbog kojeg se autotransformator ne koristi kao blok-transformator za povezivanje generatora s mrežom, gdje se najčešće primjenjuje YNd spoj (d -generator, Y - mreža).

Često se autotransformatorima dodaje regulacijska sklopka kako bi se omogućilo podešavanje prijenosnog omjera pod opterećenjem [7].



Slika 3.5. Autotransformator [42]

3.2. Prednosti i nedostaci autotransformatora

Prednosti u odnosu na dvonamotni transformator, za istu snagu i napon, autotransformator ima značajnu uštedu u težini i veličini, niže gubitke za određeni kapacitet, nižu cijenu, lakši transport i veću korisnost. Također, autotransformator ima bolju regulaciju napona te omogućuje nižu impedanciju kratkih spojeva [7].

Prednosti štednog spoja su izraženije kada je omjer transformacije bliži jedinici. Zbog toga se autotransformatori najčešće primjenjuju za povezivanje električnih mreža visokog napona, kada omjer transformacije nije prevelik. U 400-kilovoltnoj mreži, autotransformatori se koriste za povezivanje s mrežama od 220 kV i 110 kV [1].

Jedan od glavnih nedostataka autotransformatora je to da autotransformatorski priključak nije dostupan kod svih standardnih spojeva. Dostupne su veće struje kratkog spoja zbog niže postotne impedancije kratkog spoja. Također, kratki spojevi mogu uzrokovati napone koji su značajno veći u odnosu na one koje se očekuje na namotima transformatora. Za isti skok napona na linijskim stezaljkama, autotransformator ima veći inducirani i utisnuti napon u odnosu na dvonamotni transformator. Zbog galvanske povezanosti primarnog i sekundarnog kruga, dolazi do izravnog prijenosa prenapona s jednog sustava na drugi sustav. Izolacijski sustav autotransformatora složeniji je zbog redovito izvedenih dodatnih regulacijskih zavoja [8].

3.3. Primjena autotransformatora

Autotransformatori i dalje igraju značajnu ulogu u raznim područjima elektrotehnike. Neke od glavnih primjena autotransformatora obuhvaćaju kontrolu napona u velikim zavarivačkim instalacijama, pokretanje velikih motora snage iznad 30 kW te smanjenje harmonika u nesinusoidalnim sustavima. Osim toga, mogu se koristiti za specifične namjene kao što su rendgenski uređaji, usklađivanje impedancije i regulacija napona industrijske opreme [7].

U mrežama srednjeg i visokog napona, autotransformatori se koriste kao regulacijski transformatori, dok se u mrežama niskog napona primjenjuju za pokretanje sinkronih i asinkronih elektromotora te i kao djelitelji napona u ispitnim stanicama i laboratorijima [10].

Trofazni autotransformatori se koriste u visokonaponskim mrežama. Njegovom primjenom povećava se učinkovitost energetskih sustava, što utječe na smanjenje troškova vezanih uz prijenos električne energije.

Autotransformatori se obično koriste za velike snage pri povezivanju visokonaponskih mreža (400, 220, i 110 kV) zbog uštede materijala. Uglavnom, projektirani su tronamotni transformatori u kojima s VN i NN namoti spajaju u zvijezdu s uzemljenom zvijezdom za vezu autotransformatora, dok SN namot ostaje galvanski izoliran i spojen u trokut. Spoj Dy ili Yd nije moguće spojiti s autotransformatorima jer zajedničku neutralnu točku moraju dijeliti VN i NN namoti te je to razlog zašto su autotransformatori neprikladni kao blok-transformatori za spajanje generatora na mrežu. Dodatno, autotransformatori su često opremljeni regulacijskom sklopkom koja omogućuje podešavanje prijenosnog omjera dok su pod opterećenjem [6].

4. MJERNI TRANSFORMATORI

Mjerni transformatori su projektirani za pretvaranje visokih napona ili struja u prijenosnim i distribucijskim sustavima na niske vrijednosti koje su pogodne za niskonaponske mjerne uređaje. Postoje dva tipa mjernih transformatora, a to su strujni i naponski. Transformatori za niske primarne napone i struje nisu lako prepoznatljivi, dok su kod većih vrijednosti razlike u konstrukciji uobičajene. Glavne razlike između ovih uređaja jesu u načinu njihove povezanosti u strujnom krugu. Naponski transformatori vrlo su slični malim energetskim transformatorima, a razlikuju se samo u detaljima dizajna koji utječu na točnost omjera u određenom rasponu izlaza. Kod strujnih transformatora primarni namoti povezani su u seriju sa strujnim krugom te u seriju s impedancijom sustava. Odziv transformatora u ova dva načina rada značajno se razlikuje [11, 12].

4.1. Strujni mjerni transformatori

Strujni transformator je vrsta mjernog transformatora koji je konstruiran za proizvodnju izmjenične struje u svom sekundarnom namotu, pri čemu je ta struja proporcionalna struji koja se mjeri u primarnom namotu. Strujni mjerni transformatori smanjuju visokonaponske struje na znatno niže razine, što omogućava sigurno praćenje stvarne električne struje koja prolazi kroz izmjeničnu prijenosnu liniju uz pomoć standardnog ampermetra. Načelo rada strujnog transformatora razlikuje se od načela rada naponskog transformatora [13].

4.1.1. Princip rada strujnih mjernih transformatora

Strujni transformatori se sastoje od tri glavna dijela: magnetske željezne jezgre, primarnog namota koji je namotan na tu jezgru te sekundarnog namota koji je namotan u suprotnom smjeru od primarnog namota. Prikaz strujnog mjernog transformatora je vidljiv na slici 4.1. Struja koja prolazi kroz primarni namot stvara magnetski tok unutar magnetske željezne jezgre. Magnetski tok uzrokuje induciranje napona na sekundarnom namotu. Mjerni uređaj koji je povezan paralelno sa sekundarnim namotom generira magnetski tok u magnetskoj željeznoj jezgri u suprotnom smjeru, budući da je struja u sekundarnom krugu suprotna smjeru namota. Ovaj magnetski tok balansira tok koji stvara struja u primarnom namotu. Stoga, sekundarni krajevi strujnih transformatora moraju biti kratko spojeni opterećenjem ili mjernim uređajem. U suprotnom, neće doći do stvaranja magnetskog toka u suprotnom smjeru, što može uzrokovati pregrijavanje magnetske željezne jezgre i potencijalni kvar. Također, ova situacija predstavlja opasnost za korisnike jer može dovesti do povećanja napona na sekundarnim krajevima [14].

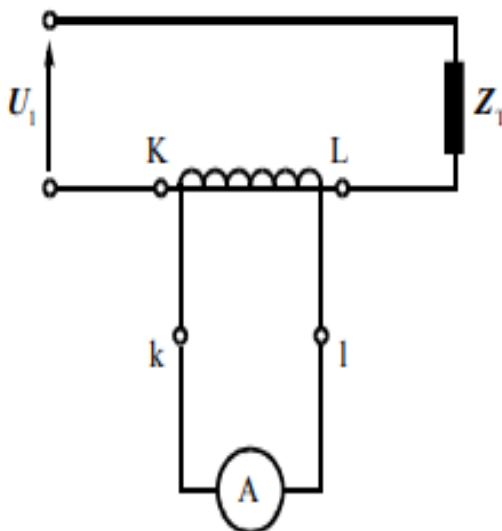


Slika 4.1. Strujni mjerni transformator [41]



4.2. Simbol strujnog mjernog transformatora [34]

Strujni transformator ima samo jedan ili vrlo mali broj zavoja u primarnom namotu. Primarni namot može biti jedan ravni zavoj, namot od čvrste žice oko jezgre ili jednostavno vodič ili priključna šina koja prolazi kroz središnji otvor [15].



4.3. Shema strujnog mjernog transformatora [35]

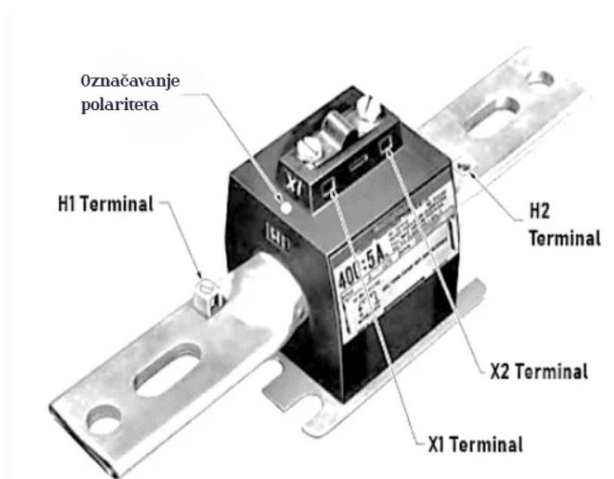
Strujni transformator se često naziva serijski transformator jer je primarni namot koji se sastoji od samo nekoliko zavoja, u seriji s vodičem koji prenosi struju i napaja opterećenje (slika 4.3.). Sekundarni namot može imati veliki broj zavoja namotanih na laminiranoj jezgri od materijala s niskim magnetnim gubicima. Navedena jezgra ima veliki presjek kako bi se osiguralo da gustoća

magnetskog toka ostane niska. Ovaj dizajn omogućuje korištenje žice s mnogo manjim presjekom, ovisno o tome koliko se struja mora smanjiti, dok se teži isporuci konstantne struje neovisno o povezanoj opremi [15].

4.1.2. Podjela strujnih mjernih transformatora

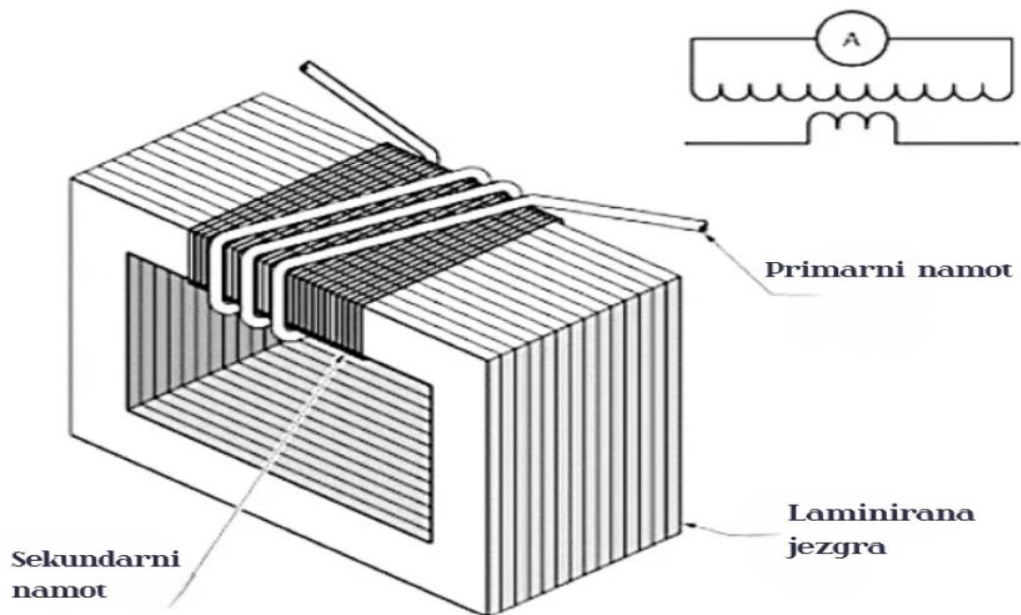
Različite vrste strujnih transformatora primjenjuju se u skladu s posebnim zahtjevima sustava, uključujući razinu struje, preciznost mjerenja i način ugradnje. Općenito, strujni transformatori prema konstrukciji se klasificiraju u tri glavne kategorije: prozorske, namotane i šipkaste.

Šipkasti strujni transformator predstavlja specifičnu vrstu transformatora s čvrstom sabirnicom koja je trajno postavljena kroz otvor (slika 4.4.). Ovi transformatori su sposobni izdržati naprezanja uzrokovana velikim strujama. Da bi se izbjegla magnetska naprezanja koja bi mogla oštetiti transformator i sabirnicu, važno je pažljivo postaviti ove transformatore u odnosu na susjedne vodiče. Takva vrsta transformatora se obično koristi u instalacijama gdje je napon 25 kV ili manji [15].



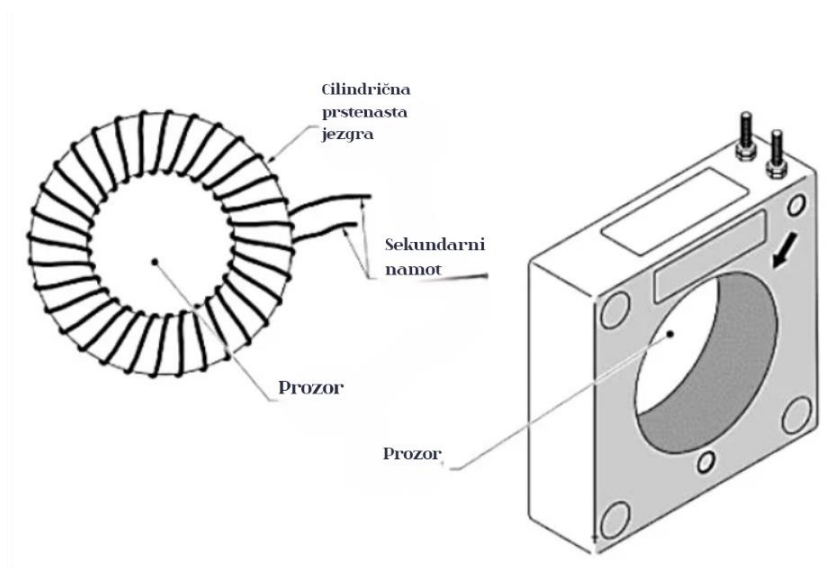
Slika 4.4. Šipkasti strujni transformator [15]

Namotani strujni transformator je uređaj s odvojenim primarnim i sekundarnim namotima, koji su omotani oko laminirane jezgre (slika 4.5.). Ovaj transformator je konstruiran tako da primarni namotaj sadrži jedan ili više zavoja žice velikog presjeka, koji su povezanih u seriju s mjernim krugom. Ova vrsta strujnog transformatora obično se nalazi na visokonaponskoj strani trafostanica i uključuje primarni vodič koji prenosi struju, kao i namotani strujni transformator za izlaznu struju [15].



Slika 4.5. Namotani strujni transformator [15]

Prozorski strujni transformator je uređaj koji se sastoji od sekundarnog namota postavljenog oko jezgre, dok primarni vodič prolazi kroz otvor u toj jezgri (slika 4.6.). Nakon što je sekundarni namotaj postavljen oko jezgre, cijeli sklop se smješta u kalup, a izolacijski materijal se ubrizgava oko transformatora. Energetski vod, koji djeluje kao primarni, provodi se kroz prozor [15].



Slika 4.6. Prozorski strujni transformator [15]

4.1.3. Klasa točnosti strujnih mjernih transformatora

Pravila o prihvatljivim greškama strujnih transformatora koji se koriste u mjernim instrumentima za mjerenje struje klasificirana su prema normi koja je utvrđena u zemlji u kojoj se transformatori nalaze. Zbog magnetizirajuće struje, stvarna struja na sekundarnoj strani manja je od one koja bi se izračunala na primarnoj strani koristeći omjer transformacije. Također, postoji razlika u faznom kutu i pogreška omjera zavoja koja se mjeri prema točnosti strujnog transformatora. Točnost

strujnog transformatora obuhvaća 6 klasa točnosti, a to su 0.1, 0.2, 0.5, 1, 3 i 5, pri čemu se klase 0.2 i 0.5 obično koriste za mjerenje. Uobičajene klase točnosti za mjerenje su 0.5, 1 i 3, s određenim zahtjevima za pogreške. Za klase 3 i 5, opterećenje strujnog transformatora se smatra 50 % i 100 % od nazivnog opterećenja, dok druge klase točnosti zahtijevaju opterećenje između 25 % i 100 %. Oznake klase točnosti odgovaraju apsolutnoj vrijednosti granice strujne pogreške izražene u postocima, kao i granice faznih pogrešaka izraženih u kutnim minutama, a prikazane su u tablici (4.1.) [16].

Tablica 4.1. Granice strujnih i faznih pogrešaka strujnih transformatora za mjerenje [1]

Klasa točnosti	Granice strujnih pogrešaka[%]				Granice faznih pogrešaka[$^{\circ}$]			
	$0,05 \cdot I_n$	$0,2 \cdot I_n$	$1,0 \cdot I_n$	$1,2 \cdot I_n$	$0,05 \cdot I_n$	$0,2 \cdot I_n$	$1,0 \cdot I_n$	$1,2 \cdot I_n$
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30
1	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60
3	$0,5 \cdot I_n$ do $1,2 \cdot I_n$; 3,0%				Nisu propisane			
5	$0,5 \cdot I_n$ do $1,2 \cdot I_n$; 5,0%				Nisu propisane			

Primarna struja strujnog transformatora ne zavisi od sekundarne struje opterećenja, već je regulirana vanjskim opterećenjem. Sekundarna struja obično iznosi 1 Amper ili 5 Ampera za veće vrijednosti primarne struje. Nekolicina strujnih transformatora posjeduje standardnu sekundarnu vrijednost od 5 ampera, pri čemu su primarna i sekundarna struja izražene omjerom 100/5. To implicira da je primarna struja 20 puta veća od sekundarne, što znači da će protok od 100 ampera u primarnom vodiču rezultirati protokom od 5 ampera u sekundarnom namotu. Omjer struje u strujnom transformatoru obično je visok. Sekundarne strujne vrijednosti obično iznose 5A, 1A i 0,1A. Odgovarajuće primarne strujne vrijednosti kreću se od 10A do 3000A ili više [13].

4.1.4. Prednosti, nedostaci i primjena strujnih mjernih transformatora

Strujni mjerni transformatori igraju ključnu ulogu u elektroenergetskom sustavu zbog svojih prednosti. Visoka preciznost je jedna od prednosti strujnih transformatora zbog izvanredne preciznosti u mjerenju struje te osiguravaju pouzdana i precizna očitavanja čak i u različitim uvjetima opterećenja. Osim toga, sigurnost predstavlja značajnu prednost ovih transformatora jer omogućuju električnu izolaciju između primarnog i sekundarnog kruga. Navedena izolacija sprječava visoke struje da dođu do nadzornih i mjernih uređaja. Strujni transformatori su jednostavni za instalaciju i održavanje te su dizajnirani za dugotrajnu upotrebu. Zbog svih navedenih prednosti, strujni mjerni transformatori su neizostavni dio u modernom sustavu.

Međutim, strujni mjerni transformatori imaju nekoliko nedostataka koje treba proučiti. Strujni mjerni transformatori mogu doći u područje zasićenja kada su podložni visokim razinama struje, što može rezultirati netočnostima u mjerenju i utjecati na njihovu učinkovitost. Pojedini transformatori mogu biti teški i veliki, što ih čini manje pogodnima za primjene s ograničenim prostorom ili gdje je težina bitna. Strujni mjerni transformatori visoke kvalitete mogu biti skupi. Unatoč njihovoj preciznosti i pouzdanosti, u nekim slučajevima proračunska ograničenja mogu predstavljati problem [17].

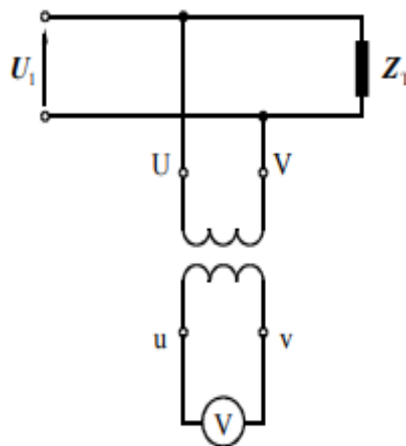
Strujni mjerni transformatori se koriste za praćenje i mjerenje energetske učinkovitosti. Mjerenjem struje koja prolazi, moguće je dobiti detaljne informacije o potrošnji energije te pomaže u smanjenju gubitaka energije optimizacijom njezine upotrebe. Također, strujni transformatori pomažu u identifikaciji kvarova u elektroenergetskim sustavima kako bi se spriječila oštećenja. Protjecanje struje se prati i analizira kako bi se dobile precizne informacije o prirodi i lokaciji kvara. Otkrivanjem kvara moguće je pravovremeno riješiti problem i obnoviti opskrbu električnom energijom. Osim toga, ovi transformatori koriste se za mjerenje energije i naplatu u komunalnim aplikacijama, kontrolu i praćenje struje u sustavima obnovljivih izvora energije te u industrijskoj automatizaciji i kontrolnim sistemima [18].

4.2. Naponski mjerni transformatori

Naponski mjerni transformator se koristi u elektroenergetskim sustavima za pretvaranje napona. Njegova funkcija je da visoke naponske vrijednosti pretvara u niže naponske vrijednosti, što je potrebno za mjerenje i zaštitu. Uz minimalno opterećenje, održava točan omjer napona i fazni odnos, čime osigurava precizna mjerenja na sekundarnoj strani. Ovi transformatori omogućuju energetske mjeračima da prate rad električnih veza koje mogu imati viši napon od uobičajenog, čime se osigurava njihovo ispravno funkcioniranje [19].

4.2.1. Princip rada naponskih mjernih transformatora

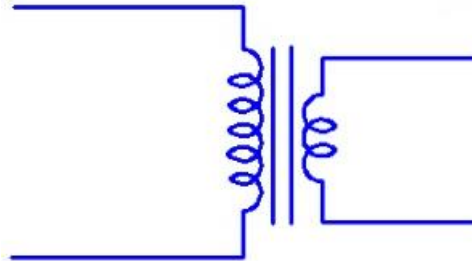
Naponski mjerni transformator funkcionira na istom principu kao i ostali transformatori, temeljenom na Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije. Međutim, zbog svoje namjene za mjerenje visokog izmjeničnog napona, njegova konstrukcija i konfiguracija su prilagođene. Visokonaponska mreža je spojena paralelno s primarnim namotajem, dok je uređaj za mjerenje napona povezan sa sekundarnim namotajem (slika 4.7.). Zbog zakona elektromagnetske indukcije, primarni i sekundarni namotaji su magnetski povezani kako bi osigurali ispravno funkcioniranje. Smanjenje napona u mreži koja je spojena na primarni namotaj može se odrediti pomoću voltmetra priključenog na sekundarni namotaj [20].



Slika 4.7. Shema naponskog mjernog transformatora [35]

Točnost naponskog mjernog transformatora ovisi o raznim čimbenicima, uključujući kvalitetu magnetske jezgre, broj zavoja u namotajima te preciznost mjernog instrumenta koji je povezan sa sekundarnim namotajem. Mreže za prijenos i distribuciju električne energije obično koriste naponske mjerne transformatore za točno i sigurno mjerenje visokih naponskih razina. Naponski mjerni transformator izrađen je s visoko kvalitetnom jezgrom koja djeluje pri niskoj gustoći

magnetskog toka, čime se postiže mala magnetizirajuća struja. Priključci transformatora trebaju biti konstruirani tako da varijacije omjera napona s opterećenjem budu minimalne, a fazni pomak između ulaznog i izlaznog napona također treba biti što manji. Kako bi se smanjila reaktancija propuštanja, u potencijalnom transformatoru koristi se koaksijalni namotaj [19, 21].



Slika 4.8. Simbol naponskog mjernog transformatora

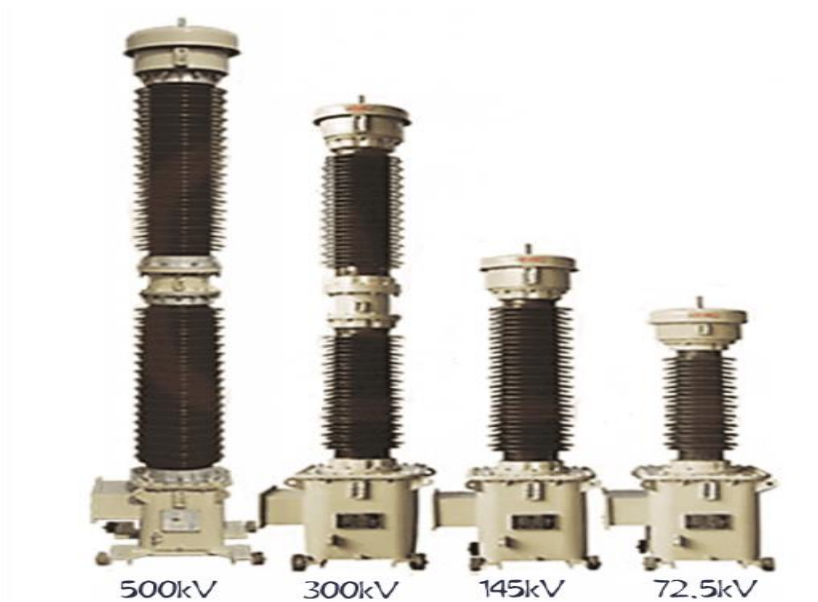
Mjerni naponski transformatori mogu biti dizajnirani s gotovo bilo kojim omjerom zavoja, što omogućuje smanjenje napona na 120V, čime se omogućava uporaba standardnih voltmetara. Na primjer, transformator s omjerom zavoja 60:1 može se koristiti za mjerenje napona od 7200V. Za mjerenje napona od 34,5kV, isti uređaj može se koristiti u kombinaciji s transformatorom koji ima omjer zavoja 287,5:1, kako bi se napon smanjio na 120V. U tom slučaju, na zaslonu se primjenjuje drugačiji faktor množenja ili se prilagođava skala na mjernom uređaju [43].

Faktor korekcije transformatora je broj koji proizvođač pruža i koristi se kao množenje za ispravljanje netočnosti. Ovaj faktor ispravlja utjecaje magnetizirajuće struje ili unutarnjeg pomaka faznog kuta uzrokovanog unutarnjom induktivnošću transformatora. Faktor korekcije također određuje razred točnosti transformatora. Tipične vrijednosti razreda točnosti su 0,3, 0,6 i 1,2. Manji broj razreda točnosti ukazuje na veća preciznost naponskog transformatora [43].

4.2.2. Podjela naponskih mjernih transformatora

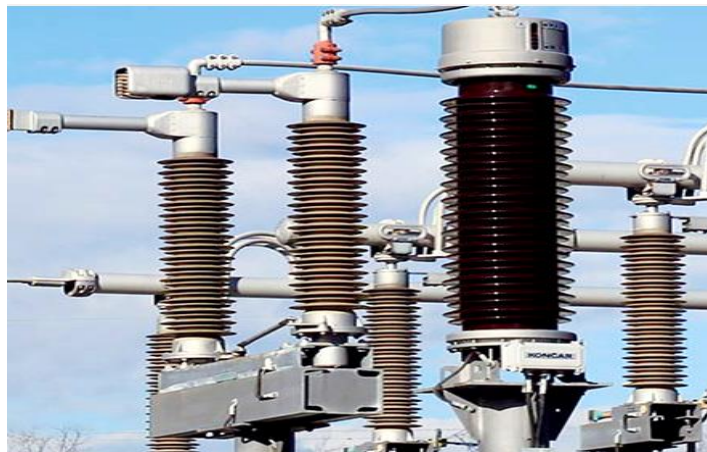
Prema načinu rada, naponski mjerni transformatori se dijele na kapacitivne naponske transformatore i induktivne naponske transformatore.

U visokonaponskim energetske sustavima, kapacitivni naponski mjerni transformator je tip transformatora koji se koristi za mjerenje napona. Ovaj tip naponskog transformatora djeluje na principu kapacitivnog djelitelja napona. Korištenjem kapacitivnog djelitelja, transformator smanjuje razinu napona u visokonaponskom krugu na razinu koju instrumenti mogu mjeriti. Njegovo funkcioniranje temelji se na kapacitivnoj podjeli napona, pri čemu se visoki napon dijeli u skladu s omjerom kapacitivnosti transformatora (slika 4.9.). Kapacitivni naponski transformator se sastoji od serijske veze između visokonaponskog i niskonaponskog kondenzatora. Visokonaponski kondenzator je povezan paralelno s visokonaponskim vodom, dok je niskonaponski kondenzator spojen na mjerni uređaj [19].



Slika 4.9. Kapacitivni naponski transformatori [36]

Induktivni naponski transformatori predstavljaju bitan dio u funkcioniranju i upravljanju energetskim sustavima. Koriste princip elektromagnetske indukcije te su konstruirani da pretvaraju visoke napone u niske, standardne vrijednosti koje sustavi za mjerenje i zaštitu mogu jednostavno obraditi. Induktivni naponski transformatori mogu se klasificirati kao jednofazni ili trofazni. Jednofazni induktivni naponski transformatori se obično koriste u stambenim zgradama i manjim komercijalnim objektima. Trofazni induktivni naponski transformatori se koriste u trofaznim sustavima gdje je potrebno istovremeno smanjiti napon svih triju faza, a koriste se u velikim komercijalnim objektima i industrijskim postrojenjima [20].



Slika 4.10. Induktivni naponski transformator [37]

4.2.3. Prednosti, nedostaci i primjena naponskih mjernih transformatora

Naponski mjerni transformatori osiguravaju precizno i pouzdano mjerenje visokih napona. Ovi transformatori izoliraju visokonaponske energetske sustave od niskonaponskih kontrolnih i mjernih sustava, osiguravajući sigurnost opreme i osoblja. Transformatori za mjerenje napona općenito su ekonomičniji od drugih metoda mjerenja visokog napona. Izuzetno su pouzdani i

zahtijevaju minimalno održavanje, smanjujući vrijeme zastoja i povećavajući učinkovitost. Osim toga, troše malo energije, vrlo su jednostavni za postavljanje i mogu se montirati na stupove, čime se smanjuje vrijeme i troškovi postavljanja [19].

Jedan od nedostataka naponskih mjernih transformatora je osjetljivost na vanjske čimbenike kao što su temperatura, vlaga i elektromagnetske smetnje, što može utjecati na točnost. Također, oni su namijenjeni za rad unutar određenog frekvencijskog raspona i možda neće dati točna rješenja izvan tog raspona. Isto tako, uključuju složeno ožičenje kako bi se osiguralo da su ispravno povezani s drugim komponentama u elektroenergetskom sustavu [19].

Naponski mjerni transformatori imaju mnoge namjene i različite primjene. Jedna od glavnih namjena naponskih mjernih transformatora je zaštita električnih instalacija i opreme. Koristi se za održavanje sinkronizacije između proizvodnih i opskrbnih vodova. Također se upotrebljavaju za mjerenje visokih napona i struja u laboratorijskim eksperimentima, kao i za kalibraciju električne opreme. Ovi transformatori primjenjuju se u raznim industrijama za nadzor industrijskih opterećenja i upravljanje naponom [19, 22].

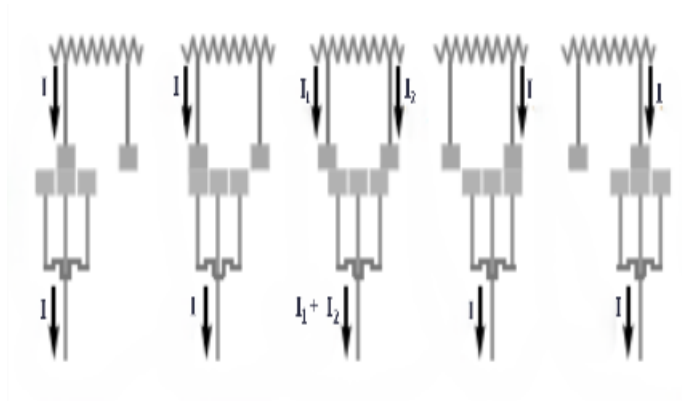
5. PRIMJENA POSEBNIH VRSTA TRANSFORMATORA

U ovom poglavlju će se analizirati ostali posebni tipovi transformatora, što uključuje regulacijske transformatore, transformatore za zavarivanje i izolacijske transformatore. Za svaki tip transformatora detaljno će biti prikazani princip rada, podjela, primjena, prednosti i nedostaci.

5.1. Regulacijski transformatori

Regulacijski transformator je transformator koji mijenja amplitudu i fazni kut na određenoj točki u elektroenergetskom sustavu. Njegova glavna namjena je kontrola veličine napona na sabirnici te upravljanje protokom snage što se postiže upravljanjem faznog kuta transformatora. Oni daju malu značajku napona između linijskih ili faznih napona. Omjer napona regulacijskog transformatora predstavlja omjer između broja namotaja transformatora i izlaznog napona. Što je veći omjer napona, to je veće povećanje napona, što implicira da transformator može isporučiti veću snagu [21, 23].

Regulacijski transformator omogućava prespajanje regulacionih otcjepa, čime se mijenja prijenosni omjer tijekom rada. Ovaj tip transformatora posjeduje regulacione otcjepe za prilagodbu napona. Prilikom prespajanja s jednog otcjepa na drugi, važno je da se ne prekine struja niti da dođe do kratkog spoja između dva otcjepa. To se postiže uključivanjem otpornika, bilo radnog ili induktivnog, tijekom prespajanja, čime se smanjuje struja kratkog spoja na prihvatljivu razinu koja ne prelazi nominalnu struju namota (slika 5.1.). Regulacijski transformatori se najčešće konstruiraju za regulaciju unutar granica od $\pm 10\%$ do $\pm 20\%$ [25].



Slika 5.1. Tijek prespajanja otcjepa regulacijskog transformatora pomoću omskog otpora [25]



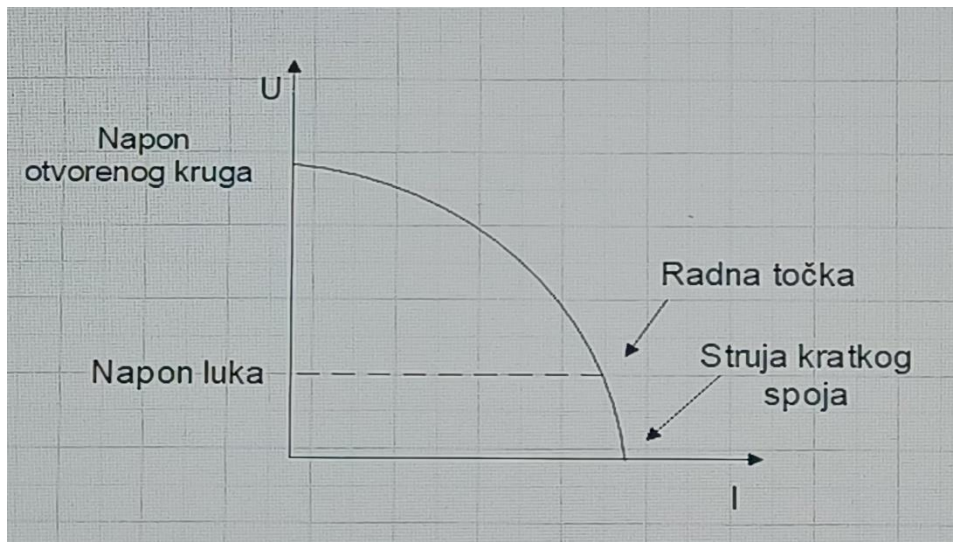
Slika 5.2. Regulacijski transformator [39]

Glavna svrha elektroenergetskog sustava je smanjenje kružne struje i smanjivanje gubitaka unutar sustava. Regulacijski transformator pomaže u smanjenju gubitaka u mreži elektroenergetskog sustava te upravlja neplaniranom razmjenu jalove snage unutar sustava [23].

5.2. Transformatori za zavarivanje

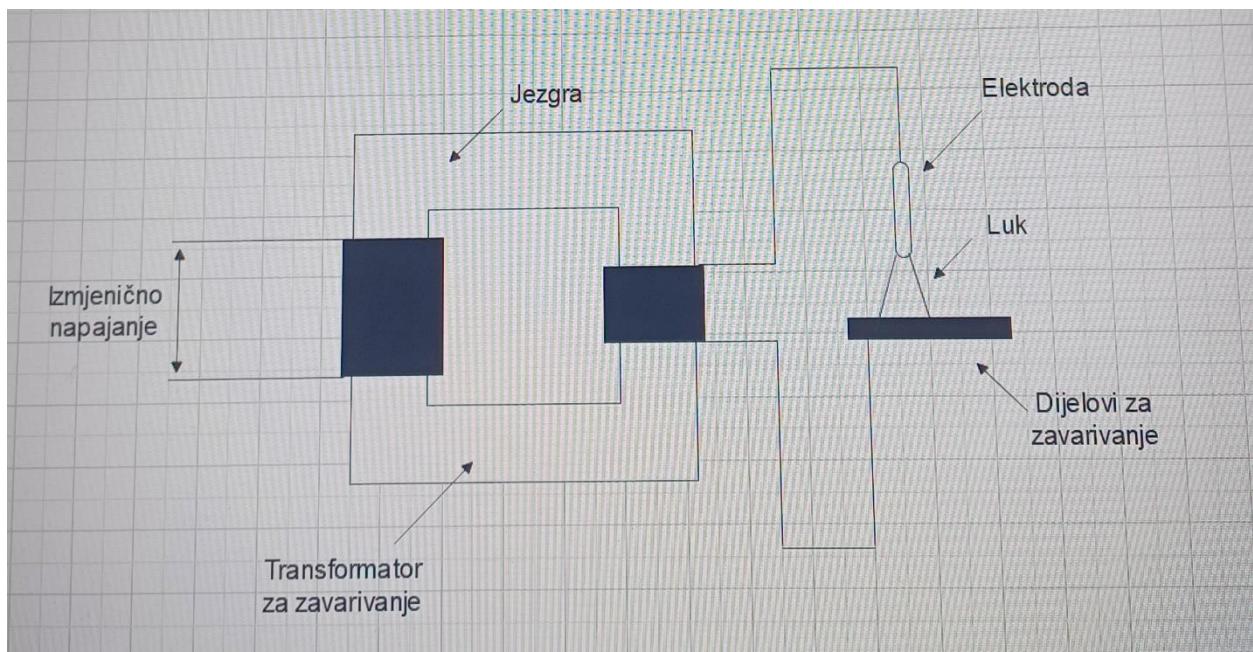
Za rad zavarivačkog uređaja potreban je transformator za zavarivanje, poznat kao i izvor napajanja za zavarivanje, kako bi se zadovoljila visoka potražnja za strujom. Ovaj transformator obično radi na izmjeničnu struju, dok je ispravljač potreban kada zavarivački transformator isporučuje istosmjernu struju.

Kod transformatora za zavarivanje, izmjenična struja iz mreže s visokim naponom i niskom strujom pretvara se u izmjeničnu struju s niskim naponom i visokom strujom, što omogućuje njegovu upotrebu za zavarivanje. Ovaj tip transformatora, koji se koristi u zavarivačkoj opremi, ima oblik energetskog transformatora. Pokretni jaram smješten je između primarnog i sekundarnog namotaja, što omogućava kontinuiranu regulaciju. Izlazna struja transformatora ponaša se slično izvoru konstantne struje, održavajući postavljenu struju zavarivanja gotovo nepromijenjenom unatoč promjenjivom opterećenju [26].



Slika 5.3. Strujno naponska karakteristika transformatora za zavarivanje

Strojevi s transformatorom za zavarivanje koriste dvije pozitivnu i jednu negativnu elektrodu koje generiraju električni luk kada su spojene na izvor napajanja. Ovaj luk proizvodi toplinu koja topi spojene metale, osiguravajući im da se sjedine u jednu čvrstu cjelinu (slika 5.4.). Transformator pomaže u regulaciji intenziteta luka, čime se sprječava prekomjerno zagrijavanje koje bi moglo oštetiti materijal koji se zavaruje. Također omogućuje da proces zavarivanja ostane dosljedan duž cijele dužine, pružajući preciznu kontrolu napona. [26]



Slika 5.4. Konstrukcija transformatora za zavarivanje

Transformatori za zavarivanje se mogu primjenjivati u razne svrhe. Najčešće se koriste na tankim materijalima kao što su aluminij ili limovi jer njihova niska strujna izlazna snaga onemogućuje probijanje kroz deblje materijale. Između ostalog, mogu se koristiti za popravke karoserija automobila ili izrade dekorativnih komada od metalnog otpada [27].

Transformatori za zavarivanje su konstruirani da budu izuzetno učinkoviti u pretvaranju električne energije u potrebnu snagu za zavarivanje. Ova efikasnost smanjuje gubitke energije i doprinosi smanjenju troškova električne energije. Ovi transformatori su kompaktni i lagani, što olakšava njihov transport i korištenje na različitim lokacijama. Jedna od prednosti je svestranost, što znači da se može koristiti za razne tehnike zavarivanja, uključujući zavarivanje elektrolučnim štapovima. Transformatori za zavarivanje su dizajnirani da budu dugotrajni, s kompaktnom konstrukcijom i komponentama visoke kvalitete jer to omogućuje dug vijek trajanja i smanjuje troškove održavanja [28].

Jedan od glavnih nedostataka strojeva s transformatorom za zavarivanje je njihova visoka početna cijena. Takvi tipovi strojeva su skuplji od drugih vrsta zavarivača. Ovi strojevi zahtijevaju više održavanja u odnosu na druge vrste zavarivačkih uređaja jer sadrže više pokretnih dijelova u usporedbi s drugim tipovima zavarivača. Složenost u korištenju stroja također je jedan od nedostataka transformatora za zavarivanje, zbog primjene visokih napona, jer postoji opasnost ako se ne rukuje pravilno. Zato je ključno da korisnici ovih strojeva imaju prikladnu obuku i iskustvo prije upotrebe [29].

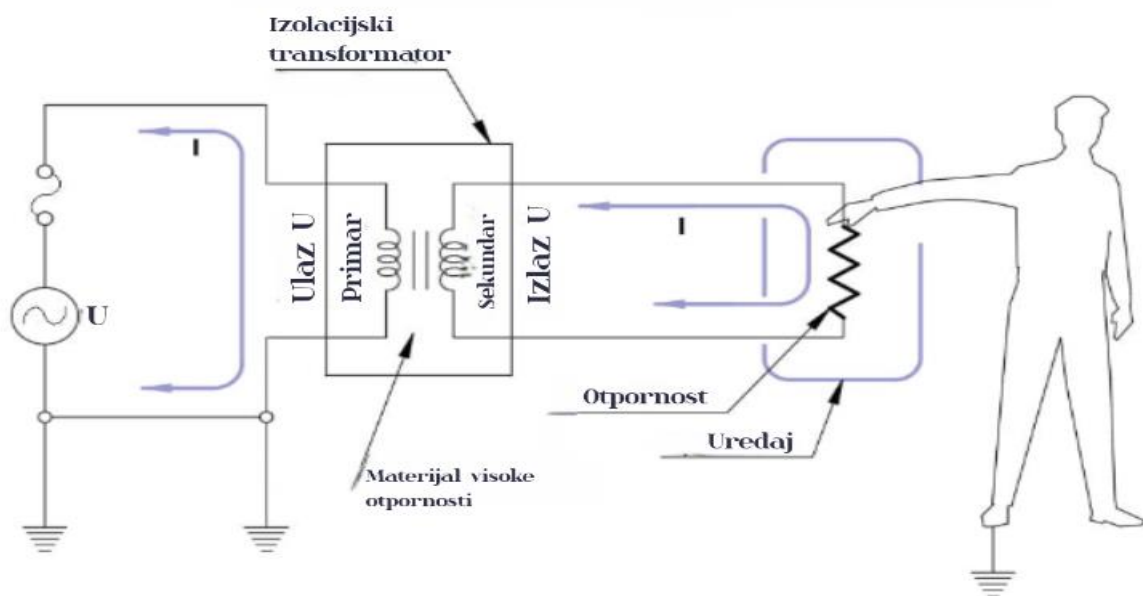


Slika 5.5. Transformator za zavarivanje [40]

5.3. Izolacijski transformatori

Izolacijski transformator je statički uređaj koji služi za odvajanje primarnih i sekundarnih namotaja, pružajući fizičku i električnu izolaciju između strujnih krugova. Ovaj uređaj prenosi električnu energiju putem magnetske indukcije, upotrebljavajući magnetsko polje za indukciju elektromotorne sile u sekundarnom krugu, pri čemu se akumulira stalna frekvencija. Ova vrsta transformatora pruža električnu izolaciju između svojih primarnih i sekundarnih namota. Konstrukcija izolacijskog transformatora omogućava siguran prijenos električne energije iz izvora izmjenične struje na uređaje ili opremu, dok istovremeno drži opremu električki odvojenu od izvora napajanja. Ovakva vrsta izolacije koriste se ponajviše u svrhe sigurnosti ili za smanjenje električnih prijelaznih pojava [30].

Načelo funkcioniranja izolacijskih transformatora temelji se na elektromagnetskoj indukciji. Kada izmjenična struja prolazi kroz primarni krug, u jezgri transformatora se stvara promjenjivo magnetsko polje. Magnetsko polje inducira električnu struju u sekundarnom krugu, čime se generira izlazni napon. S obzirom na to da su oba kruga galvaniski izolirana, ne postoji direktna električna veza između njih. Galvanska izolacija je od naročite važnosti u slučajevima kada je potrebno zaštititi opremu od električnih smetnji ili spriječiti nastanak uzemljenih petlji (slika 5.6.) [31].



Slika 5.6. Namjena izolacijskog transformatora [30]

Izolacijski transformatori imaju široku primjenu u različitim područjima. Koriste se u fotonaponskim sustavima, posebno u području obnovljivih izvora energije. Važni su za zaštitu jer energija proizvedena fotonaponskim panelima mora biti sigurna za krajnje korisnike i električnu mrežu. Između ostalog, koriste se u sustavima za punjenje električnih vozila zbog zaštite vozila i električne mreže od problema s izolacijom. Izolacijski transformatori se upotrebljavaju u audio i video sustavima zbog eliminacije buke i zujanja koja bi mogla ugroziti kvalitetu slike ili zvuka. Ovi transformatori se često primjenjuju u laboratorijima ili okruženja s osjetljivom elektroničkom opremom jer pomaže u suzbijanju oštećenja uzrokovanih električnim pražnjenjima [31].



Slika 5.7. Izolacijski transformator [30]

Izolacijski transformatori sadrže mnoge prednosti, a najistaknutija prednost je sigurnost. Ovi transformatori unapređuju sigurnost i štite ključnu opremu koja se koristi u područjima visoke ovisnosti. Isto tako, korisni su u smanjenju buke zbog njihovog dizajna koji filtrira zvuk te koriste zaslone kako bi onemogućili da električna polja sprječavaju protok energije. Medicinska oprema te skupi kućanski aparati uvijek su izloženi riziku od oštećenja. Izolacijski transformatori sprječavaju daljnje kvarove, čime se smanjuje rizik od električnog udara za pacijente i osoblje. Ovi transformatori služe za zaštitu od prenapona i izuzetno su pogodni za primjenu u visokofrekvencijskim operacijama, kao i za izolaciju visokog napona. [32]

Iako postoje mnoge prednosti korištenja izolacijskih transformatora, isto tako se mogu uočiti i neki nedostaci. U određenim okolnostima, izolacijski transformator može funkcionirati kao pulsni transformator. Kada radi na niskim frekvencijama, može izazvati distorziju u sustavu i stvoriti nepoželjne sekundarne valne oblike. Kada se izolacijski transformator koristi s istosmjernim pulsним signalom, svojstvo zasićenja jezgre se smanjuje. Izolacijski transformator je posebno konstruiran, što ga čini skupljim od konvencionalnog transformatora [33].

6. ZAKLJUČAK

Posebne vrste transformatora predstavljaju značajnu stavku u elektroenergetskim sustavima. Završni rad obuhvaća podjelu i detaljan opis svakog specijalnog tipa transformatora. Kroz rad je objašnjena važnost svakog transformatora u modernom elektroenergetskom sustavu. Za svaki transformator je opisan njihov princip rada, podjela, primjena, prednosti i nedostaci. Autotransformator predstavlja vrstu transformatora u kojoj su dva namota povezani kako galvanski, tako i magnetski. Na visokonaponskoj strani nalaze se serijski i zajednički (paralelni) namot, dok niskonaponska strana obuhvaća isključivo zajednički namot. Mjerni transformatori mogu biti strujni mjerni transformatori i naponski mjerni transformatori. Strujni transformator je vrsta mjernog transformatora koji je osmišljen za proizvodnju izmjenične struje u svom sekundarnom namotu, pri čemu je ta struja proporcionalna struji koja se mjeri u primarnom namotu. Naponski transformator je vrsta mjernog transformatora čija je uloga da visoke naponske vrijednosti pretvara u niže, što je neophodno za mjerenje i zaštitu. Regulacijski transformator je uređaj koji prilagođava amplitudu i fazni kut na specifičnoj točki unutar elektroenergetskog sustava. Njegova osnovna funkcija je kontrola napona na sabirnici i upravljanje protokom snage, što se ostvaruje regulacijom faznog kuta transformatora. Transformator za zavarivanje obično radi na izmjeničnu struju, dok je ispravljач potreban kada zavarivački transformator isporučuje istosmjernu struju. Izmjenična struja iz mreže s visokim naponom i niskom strujom pretvara se u izmjeničnu struju s niskim naponom i visokom strujom, što omogućava njegovu primjenu u zavarivanju. Izolacijski transformator je statički uređaj koji omogućava odvajanje primarnih i sekundarnih namotaja, osiguravajući fizičku i električnu izolaciju između strujnih krugova.

Posebne vrste transformatora se mogu primjenjivati u brojnim industrijama i sustavima. Najčešće se koriste u industrijskim procesima, telekomunikacijskim sustavima, medicinskoj opremi, laboratorijima, građevinarstvu, elektroničkim komponentama te audio i video sustavima. Usprkos nekoliko nedostataka, posebne vrste transformatora su neizostavni elementi u modernom sustavu. Uz adekvatna proučavanja i tehnološke ideje, posebne vrste transformatora će nastaviti biti ključan element u budućnosti elektroenergetskog sustava.

LITERATURA

- [1] D. Štefanović, Tehnička enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 1997.
- [2] B. Skalicki, J. Grilec, Električni strojevi i pogoni, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.
- [3] K. Daware, *Electrical Transformer - Basic construction, working and types* [online], electricaleasy, 2014, dostupno na: <https://www.electriceasy.com/2014/03/electrical-transformer-basic.html> [17.7.2024.]
- [4] Nep Electric Blog, *Electrical transformer: Basic Construction & Working Principle* [online], Blog Nepelectrics, 2024, dostupno na: <https://blog.nepelectrics.com/electrical-transformer-construction-working/> [17.7.2024.]
- [5] Joshua, *Transformer construction* [online], Electronics tutorial, 2024, dostupno na: <https://www.electronics-tutorials.ws/transformer/transformer-construction.html> [19.7.2024.]
- [6] D. Žarko, B. Čučić, Transformatori u teoriji i praksi, Graphis, Zagreb, 2020.
- [7] D. Žarko, *Autotransformator*, Kupdf, 2017, dostupno na: https://kupdf.net/download/autotransformator_5968afaddc0d602357a88e7c_pdf [24.7.2024.]
- [8] J.J. Winders. Jr. *Power Transformers Principles and Application*, Marcel Deeker, Inc., 2002, dostupno na: power_transformers_principles_and_application.pdf [24.7.2024.]
- [9] Testbook, *Auto Transformer: Working, Advantages, Disadvantages & Uses* [online], Testbook, 2024, dostupno na: <https://testbook.com/electrical-engineering/auto-transformer> [26.7.2024.]
- [10] V. Hartl, *Električni strojevi 1*, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [11] ABB, *Instrument transformers*, ABB, dostupno na: <https://library.e.abb.com/public/e2462bd7f816437ac1256f9a007629cf/ITTechInfoAppGuide.pdf> [27.7.2024.]
- [12] Schneider Electric, *Current and Voltage Transformers*, Schneider Electric, dostupno na: https://www.se.com/ww/en/tools/npag-online-re14y/pdf/B2-Current_and_Voltage_Transformers.pdf [30.7.2024.]
- [13] Electronics Tutorial, *The Current transformer* [online], Electronics Tutorial, dostupno na: <https://www.electronics-tutorials.ws/transformer/current-transformer.html> [30.7.2024.]
- [14] Entes, *What is current transformer? Where do we use current transformers?* [online], Entes, dostupno na: <https://www.entes.eu/what-is-current-transformer-where-do-we-use-current-transformers/> [31.7.2024.]
- [15] A. Roderick, *Types of Current Transformers and Their Construction* [online], Eepower, 2021, dostupno na: <https://eepower.com/technical-articles/current-transformer-operation-and-applications/> [1.8.2024.]
- [16] A. Beam, *Accuracy Class of Current Transformers and the Determination of the Required Number per Circuit* [online], As Beam, 2024, dostupno na: https://asbeam.com/news/current_transformers_accuracy_class-cn.html [1.8.2024.]

- [17] Cqbluejay, *What Are Advantages and Disadvantages of Current Transformer?* [online], Cqbluejay, dostupno na: <https://cqbluejay.com/what-are-advantages-and-disadvantages-of-current-transformer/> [1.8.2024.]
- [18] Testbook, *Current Transformer: Learn its Construction, Working, Types & Uses* [online], Testbook, 2023, dostupno na: <https://testbook.com/electrical-engineering/current-transformer> [1.8.2024.]
- [19] Testbook, *Potential Transformer; Working, Construction, Types, Connection of PT, Phasor Diagram* [online], Testbook, 2023, dostupno na: <https://testbook.com/electrical-engineering/potential-transformer-symbol-diagram-and-applications> [1.8.2024.]
- [20] Electricity Magnetism, *Inductive voltage transformers* [online], Electricity Magnetism, dostupno na: <https://www.electricity-magnetism.org/inductive-voltage-transformers/> [4.8.2024.]
- [21] Circuit Globe, *Potential Transformer (PT)* [online], Circuit Globe, dostupno na: <https://circuitglobe.com/potential-transformer-pt.html> [4.8.2024.]
- [22] Macroplast Transformers, *What are Potential Transformers? Explain its Principles & Applications.* [online], Macroplast Transformers, 2023, dostupno na: <https://www.macroplasttransformers.com/blog/what-are-potential-transformers-explain-its-principles-applications/> [6.8.2024.]
- [23] Circuit Globe, *Regulating transformer* [online], Circuit Globe, dostupno na: <https://circuitglobe.com/regulating-transformer.html> [6.8.2024.]
- [24] Lushan Electronic, *The Different Types and Technical Aspects of Regulating Transformers* [online], Lushan Electronic, 2023, dostupno na: <https://www.lstransformer.com/Faq/the-different-types-and-technical-aspects-of-regulating-transformers> [7.8.2024.]
- [25] A. Dolenc, *Transformatori 1. i 2. dio*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991..
- [26] Breimer-Roth Transformatoren, *Welding Transformers* [online], Breimer-Roth. Transformatoren, dostupno na: <https://bre-trafo.de/en/glossar/welding-transformers/> [8.8.2024.]
- [27] H.Jain, *What is Transformer Welding Machine? Working and Uses* [online], Blog The Piping Mart, 2023, dostupno na: <https://blog.thepipingmart.com/other/what-is-transformer-welding-machine-working-and-uses/> [8.8.2024.]
- [28] JSN, *The Advantages of using a welding transformer* [online]. JSN, dostupno na: <https://jsn.com.np/blog/the-advantages-of-using-a-welding-transformer/> [10.8.2024.]
- [29] P. Karia, *Transformer Welding Machine – Advantages and Disadvantages* [online], Blog The Piping Mart, 2023, dostupno na: <https://blog.thepipingmart.com/other/transformer-welding-machine-advantages-and-disadvantages/> [14.8.2024.]
- [30] Industrial Quick Search. *Isolation Transformers* [online], Industrial Quick Search, dostupno na: <https://www.iqsdirectory.com/articles/electric-transformer/isolation-transformers.html> [14.8.2024.]

- [31] Orteanext. *Isolation transformer: what it is used for and when to choose it* [online], Orteanext, 2023, dostupno na: <https://www.orteanext.com/transformer-reactance/isolation-transformer-what-it-is-used-for-and-when-to-choose-it/> [16.8.2024.]
- [32] Power System International, *The Advantages and Disadvantages of Isolation Transformers* [online], Power System International, dostupno na: <https://powersystemsinternational.com/the-advantages-and-disadvantages-of-isolation-transformers/> [20.8.2024.]
- [33] Deltek Powerlines, *What Are The Applications, Advantages And Disadvantages Of Isolation Transformer?* [online], Deltek Powerlines, 2023, dostupno na: <http://deltekpowerlines.co.in/advantages-and-disadvantages-of-isolation-transformers> [26.8.2024.]
- [34] A. T. Joy, *Current Transformers* [online], Tameson, 2022, dostupno na: <https://tameson.co.uk/pages/current-transformer> [1.8.2024.]
- [35] M. Pužar, I. Mandić, *Transformatori i električni rotacijski strojevi, predavanje iz kolegija Transformatori i električni rotacijski strojevi*, Osijek, 2007.
- [36] P. Babu, *Difference between Capative Voltage Transformer CVT and CCVT* [online], Electengmaterials, 2022, dostupno na: <https://electengmaterials.com/difference-between-capacitive-voltage-transformer-cvt-and-ccvt/> [7.8.2024.]
- [37] Pazific Power Inc., *Inductive Voltage Transformer* [online], Pazific Power Inc., dostupno na: <https://www.ppi.ph/product/inductive-voltage-transformertype-vpu-inductive-up-to-550-kv-up-to-6-secondary-windings/> [7.8.2024.]
- [38] Hamada, *Welding Transformers* [online], Your electric home, dostupno na: <https://yourelectrichome.blogspot.com/2011/08/welding-transformers.html> [14.8.2024.]
- [39] Wilson Power Solutions, *Voltage Regulation* [online], Wilson Power Solutions, dostupno na: <https://www.wilsonpowersolutions.co.uk/products/voltage-regulation/> [17.8.2024.]
- [40] Power Tech Welding, *Arc Welding Transformer* [online], Power Tech Welding, dostupno na: <https://www.powertechwelding.com/arc-welding-transformer-machine/> [17.8.2024.]
- [41] Bender, *Measuring current transformers* [online], Bender, dostupno na: <https://www.bender.de/en/products/current-transformers/measuring-current-transformers/> [17.8.2024.]
- [42] Hitachi Energy, *Autotransformers* [online], Hitachi Energy, dostupno na: <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/transformers/distribution-transformers/dry-type-transformers/autotransformers> [19.8.2024.]
- [43] EE Power, *Potential Transformer Operation, Applications and Accuracy* [online], EE Power, dostupno na: <https://eepower.com/technical-articles/potential-transformer-operation-applications-and-accuracy/#> [19.8.2024.]

SAŽETAK

Posebne vrste transformatora i njihova primjena

U ovom radu su analizirane posebne vrste transformatora te su prikazane njihove primjene. Nakon uvodnog pregleda o transformatorima, u drugom poglavlju je opisan transformator, njegov način rada, konstrukcija te kriteriji za njegovu klasifikaciju. Treće poglavlje namijenjeno je autotransformatoru, gdje se istražuje njegova podjela, princip rada, primjena, snaga, kao i prednosti i nedostaci. Četvrto poglavlje usredotočuje se na mjerne transformatore, koji su značajni za mjerenje i sigurnost unutar elektroenergetskog sustava. U ovom poglavlju detaljno su objašnjene dvije vrste mjernih transformatora: strujni mjerni transformator i naponski mjerni transformator. Za svaki tip mjernog transformatora navedena je podjela, konstrukcija, prednosti i nedostaci. U petom poglavlju predstavljeni su ostali posebni tipovi transformatora, uključujući regulacijske transformatore, transformatore za zavarivanje i izolacijske transformatore. U ovom poglavlju bit će opisani svi navedeni tipovi posebnih transformatora, ističući njihovu relevantnost u elektroenergetskom sustavu.

Ključne riječi: autotransformator, izolacijski transformator, mjerni transformator, regulacijski transformator, transformator za zavarivanje

ABSTRACT

Special types of transformers and their application

In this paper, special types of transformers are analyzed, and their applications are presented. After the introductory overview of transformers, the second chapter describes the transformer, its mode of operation, construction, and criteria for its classification. The third chapter is dedicated to the autotransformer, where its division, working principle, application, power, and advantages and disadvantages are investigated. The fourth chapter focuses on measuring transformers, which are important for measurement and safety within the power system. In this chapter, two types of measuring transformers are explained in detail: current-measuring transformers and voltage-measuring transformers. The division, construction, advantages, and disadvantages are listed for each measuring transformer. Chapter 5 presents other special types of transformers, including control transformers, welding transformers, and isolation transformers. In this chapter, all the mentioned types of special transformers will be described, highlighting their relevance in the power system.

Keywords: autotransformer, isolation transformer, measuring transformer, regulation transformer, welding transformer