

Visokonaponski mjerni transformatori

Krofl, Sara

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:190:571208>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-03**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Stručni prijediplomski studij elektrotehnike

Završni rad

VISOKONAPONSKI MJERNI TRANSFORMATORI

Rijeka, siječanj 2024.

Sara Krofl

0069075961

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Stručni prijediplomski studij elektrotehnike

Završni rad

VISOKONAPONSKI MJERNI TRANSFORMATORI

Mentor: mr. sc. Marijana Živić Đurović v. pred.

Rijeka, siječanj 2024.

Sara Krofl

0069075961

Rijeka, 27. veljače 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**
Predmet: **Elementi elektroenergetskih postrojenja**
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Sara Krofl (0069075961)**
Studij: **Stručni prijediplomski studij elektrotehnike**

Zadatak: **Visokonaponski mjerni transformatori / High-voltage measuring transformers**

Opis zadatka:

U radu je potrebno analizirati ulogu mjernih transformatora u prienosnoj i distribucijskoj mreži. Opisati izvedbu strujnih, naponskih (induktivnih i kapacitivnih) i kombiniranih mjernih transformatora. Definirati i opisati klase točnosti i podjelu prema namjeni - mjerni transformatori za mjerenje i mjerni transformatori na zaštitu. Opisati tehničke zahtjeve za mjerne transformatore.

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

Sara Krofl
Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

M. Živić
Mr. sc. Marijana Živić Đurović, v. pred.

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

Prof. dr. sc. Đubrāvko Franković
Prof. dr. sc. Đubrāvko Franković

IZJAVA

Sukladno s člankom 7. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih prijediplomskih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci od ožujka 2023. godine izjavljujem da sam samostalno izradila završni rad pod naslovom "Visokonaponski mjerni transformatori", prema zadatku za završni rad od " 20. ožujka 2023."

Sara Krofl

Rijeka, siječanj 2024.

Sara Krofl

0069075961

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆENITO O MJERNIM TRANSFORMATORIMA	2
2.1. Idealni transformator	3
2.2. Realni transformator.....	3
2.3. Vektorski dijagram.....	5
3. IZVEDBE MJERNIH TRANSFORMATORA	7
3.1. Standardne vrijednosti nazivnih struja i napona	7
3.2. Označavanje stezaljki.....	8
3.3. Strujni mjerni transformatori.....	10
3.3.1. Strujni transformatori izolirani epoksidnom smolom	11
3.3.2. Strujni transformatori izolirani uljem.....	16
3.3.3. Strujni transformatori izolirani plinom SF6	19
3.4. Naponski mjerni transformatori	20
3.4.1. Naponski transformatori izolirani epoksidnom smolom	22
3.4.2. Naponski transformatori izolirani uljem	24
3.4.3. Naponski transformatori izolirani plinom SF6.....	28
3.5. Kapacitivni naponski mjerni transformatori	29
3.5.1. Kapacitivni naponski mjerni transformatori izolirani uljem i plinom SF6	30
3.6. Kombinirani mjerni transformatori	32
4. KLASE TOČNOSTI	35
4.1. Strujni transformatori za mjerenje.....	35
4.2. Strujni transformatori za zaštitu	38
4.3. Naponski transformatori za mjerenje i zaštitu.....	39
5. TEHNIČKI ZAHTJEVI MJERNIH TRANSFORMATORA	41
5.1. Tehničke značajke	41
5.2. Pogreške transformatora.....	42
5.3. Mjeriteljske značajke.....	43
5.4. Natpisi i oznake.....	46
6. ZAKLJUČAK	49
7. LITERATURA	50
8. SAŽETAK	52

1. UVOD

Visokonaponski mjerni transformatori predstavljaju ključnu komponentu u elektroenergetskim sustavima, obavljajući značajnu ulogu u distribucijskoj i prijenosnoj mreži. Ovaj rad istražuje različite aspekte ovih transformatora, s fokusom na njihovu ulogu, izvedbe, klase točnosti, te tehničke zahtjeve.

Prvo, analizirat će se važnost mjernih transformatora u elektroenergetskim sustavima, s posebnim naglaskom na njihovu ulogu u distribucijskoj i prijenosnoj mreži. Razmatrat će se kako ovi transformatori omogućuju precizno mjerenje i praćenje visokonaponskih parametara, što je ključno za održavanje stabilnosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava.

Nadalje, rad će detaljno razmotriti različite izvedbe visokonaponskih mjernih transformatora, uključujući strujne, naponske (induktivne i kapacitivne) te kombinirane transformatore.

Klase točnosti mjernih transformatora bit će još jedan ključan element analize, pri čemu će se razjasniti kako ove klase odražavaju preciznost mjerenja i pouzdanost transformatora. Također, rad će opisati podjelu transformatora prema namjeni i zaštiti, naglašavajući specifične karakteristike transformatora prilagođene različitim potrebama elektroenergetskog sustava.

Konačno u zadnjem poglavlju, tehnički zahtjevi za visokonaponske mjerni transformatori bit će temeljito opisani. Ovaj rad će pružiti cjelovit pregled visokonaponskih mjernih transformatora, unaprjeđujući razumijevanje ove važne komponente elektroenergetskih sustava.

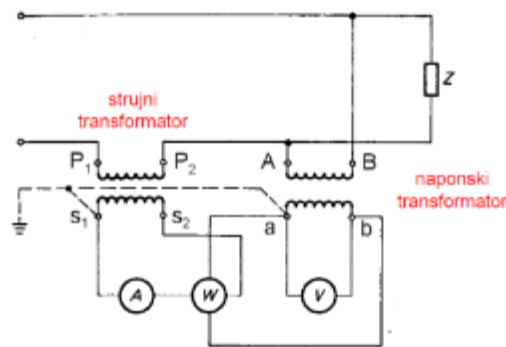
2. OPĆENITO O MJERNIM TRANSFORMATORIMA

Mjerni transformatori su električni uređaji koji se koriste u izmjeničnim visokonaponskim postrojenjima. Imaju ulogu da u propisanoj klasi točnosti transformiraju napon i struju na standardne nazivne mjerljive vrijednosti (primjerice 1 ili 5 A za struju, 100 ili 110 V za napon). Ovakav pristup omogućuje izradu standardiziranih uređaja za mjerenje i zaštitu, što uvelike pojeftinjuje njihovu izradu. Direktna spoj mjerne i zaštitne opreme na visokonaponske vodove bio bi neisplativ, a ponekad čak i neizvediv. [1]

Prednosti koje se postižu korištenjem mjernih transformatora su:

- Pomoću izolacijskog sustava mjerni transformatori, električni odvajaju sekundarne krugove, odnosno opremu i ljude da bi se rukovanje učinilo sigurnim, a konstrukcija pojednostavila, nije potrebno izolirati ih za visoki napon.;
- Mjerne struje i napone različitih nazivnih vrijednosti uvijek se transformiraju na iste standardne nazivne vrijednosti;
- Sprječava utjecaj magnetskog i električnog polja na njihov rad, udaljavajući mjerne instrumenta i uređaje od mjernog strujnog kruga;
- Zaštićuju se mjerni uređaji i instrumenti od štetnih dinamičkih i termičkih učinka struje kratkog spoja posebnim izvedbama mjernih transformatora;
- Galvansko odvajanje strujnih krugova; [2]

Mjerni transformatori sastoje se od magnetske jezgre, te primarnog i sekundarnog namota, koji su međusobno odvojeni i izolirani u mjernom krugu. Primarni namot priključuje se u mjerni krug, dok se sekundarni namoti koriste za spajanje mjernih ili zaštitnih uređaja. Dvije najčešće vrste mjernih transformatora su naponski i strujni (*Slika 2.1.*). [2]



Slika 2.1. Spajanje mjernih transformatora u mjerni krug [3]

2.1. Idealni transformator

Kod naponskog mjernog transformatora, primarni namot priključuje se paralelno potrošaču, time da struja koja prolazi kroz namot mora biti niža od struje potrošača. Kod strujnog mjernog transformatora to je obrnuto, primarni namot priključuje se serijski s potrošačima, pa samim time teče puna struja potrošača. Pad napona na primaru mora biti neznatan prema naponu potrošača. [2] Primarne i sekundarne veličine moraju biti bez faznog pomaka i u praktički stalnom omjeru. Navedene zahtjeve može samo idealan transformator ispuniti kod kojeg ne bi bilo nikakvih padova napona, struje magnetiziranja, te stalni odnos između primarnog U_1 i sekundarnog U_2 napona, odnosno struja koji je određen brojem zavoja na primaru N_1 i sekundaru N_2 . [3]

$$U_1:U_2 = N_1:N_2 \quad (2.1)$$

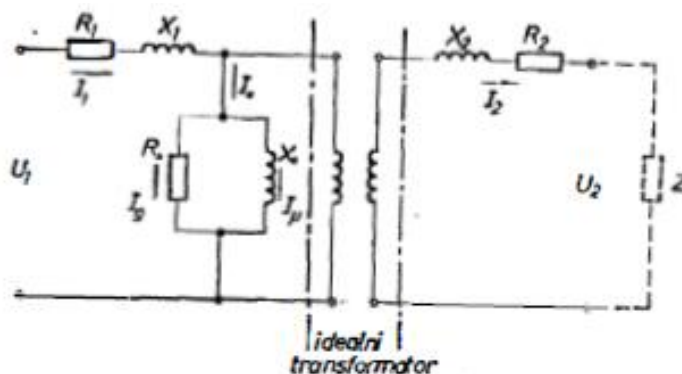
Također primarni amperzavoji jednaki su sekundarnima u idealnom transformatoru, gdje je I_1 primarna, a I_2 sekundarna struja. [2]

$$I_1:N_1 = I_2:N_2 \quad (2.2)$$

2.2. Realni transformator

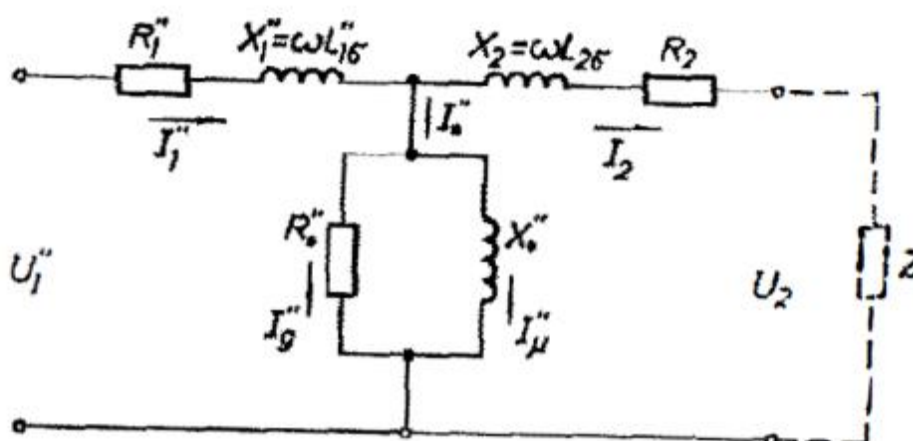
Kod realnog transformatora nije slučaj da su stalni odnosi između primarnih i sekundarnih napona i struja, zbog pojave djelatnog otpora R_1 na primarnom, te R_2 na sekundarnom namotu. Osim

djelatnih otpora pojavljuje se i primarna rasipna reaktancija $X_1 = \omega L_1$ na primaru realnog transformatora, koju uzrokuje primarni rasipni tok koji je razmjeran primarnoj struji. Sličan proces imamo i na sekundarnoj strani, gdje je obuhvaćena sekundarna rasipna reaktancija $X_2 = \omega L_2$ rasipnim tokom sekundarnog namota (Slika 2.2.). Magnetiziranjem jezgre nastali gubici spajaju se paralelno idealnom transformatoru, te se nadomještaju gubicima otpora R_0 i reaktancije X_0 . [2]



Slika 2.2. Shema realnog transformatora [2]

Broj zavoja na primarnom i sekundarnom namotu kod nadomjesne sheme transformatora (Slika 2.3.) nije toliko bitan kao kod realnog transformatora. Bitno je reducirati sve vrijednosti na primarnu ili sekundarnu stranu transformatora. [2]



Slika 2.3. Nadomjesna shema transformatora [2]

Reducirane vrijednosti sekundara:

Mjerni transformatori još su klasificirani prema razredu točnosti koji definiraju njihove prijenosne i fazne pogreške. Prijenosna pogreška ukazuje na odstupanje stvarnih omjera primarnih i sekundarnih veličina od nazivnog prijenosnog omjera transformatora, dok se fazna pogreška izražava kao razlika u fazama tih veličina. Uzrok pogreške struja kod strujnih transformatora je magnetiziranje jezgre, a kod naponskih padovi napona na otporima namota i njihovim rasipnim induktivitetima što se može vidjeti iz vektorskog dijagrama (*slika 2.4.*). [3]

3. IZVEDBE MJERNIH TRANSFORMATORA

Danas susrećemo velik broj izvedbi strujnih i naponskih mjernih transformatora, ovisno o nazivnim naponima, strujama, namjeni te vrsti izolacijskih i konstrukcijskih materijala. [2]

3.1. Standardne vrijednosti nazivnih struja i napona

Prema pravilima i normama na nacionalnoj razini za mjerne transformatore, kojima su danas dobro definirani pojmovi, nazivne vrijednosti, oznake, granice pogrešaka, uvjeti rada i metode ispitivanja, olakšava se njihova uporaba, nabavka i proizvodnja. Koriste se nacionalne norme kao što je IEC pomoću kojih su definirani osnovni pojmovi, nazivne vrijednosti, označavanje, granice pogreške uvjeti rada itd.

U pravilima za strujne mjerne transformatore, nazivna primarna struja definira se kao efektivna vrijednost primarne struje i služi kao temelj za definiranje svojstva transformatora i uvjeta za njihov rad. Kod transformatora s višim omjerom transformacije, standardne vrijednosti nazivne sekundarne struje su 5 A i 1 A, a kada se radi o transformatorima namijenjenim za spoj u trokut, te vrijednosti podijele se s $\sqrt{3}$ kako bi bile standardne. Nazivnu sekundarnu struju od 5 A odabiremo kada imamo veliku nazivnu struju na primaru, da bismo izbjegli stvaranje visokog napona koji može biti opasan po život. Međutim, pri nižoj nazivnoj sekundarnoj struju od 1 A, potrošnja energije je znatno manja, što može biti korisno kod prostranih postrojenja.

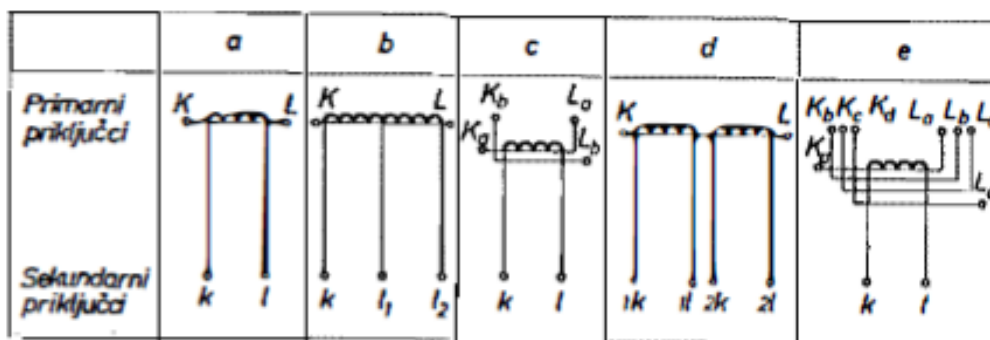
Kod naponskih transformatora, ključna karakteristika je nazivni primarni napon, koji je efektivna vrijednost napona na primarnoj strani transformatora. Ova vrijednost se obično upisuje na natpisnoj pločici transformatora i služi kao osnova za određivanje svojstva i uvjeta rada transformatora.

Vrijednosti 100 V ili 200 V su standarde vrijednosti nazivnog sekundarnog napona kod jednofaznih naponskih mjernih transformatora u jednofaznim mrežama i za trofazne transformatore priključene između faza. Za jednofazne naponske transformatore u trofaznoj mreži, standardni nazivni sekundarni naponi između faze i zemlje su: $100\sqrt{3}$ i $200\sqrt{3}$. [2]

3.2. Označavanje stezaljki

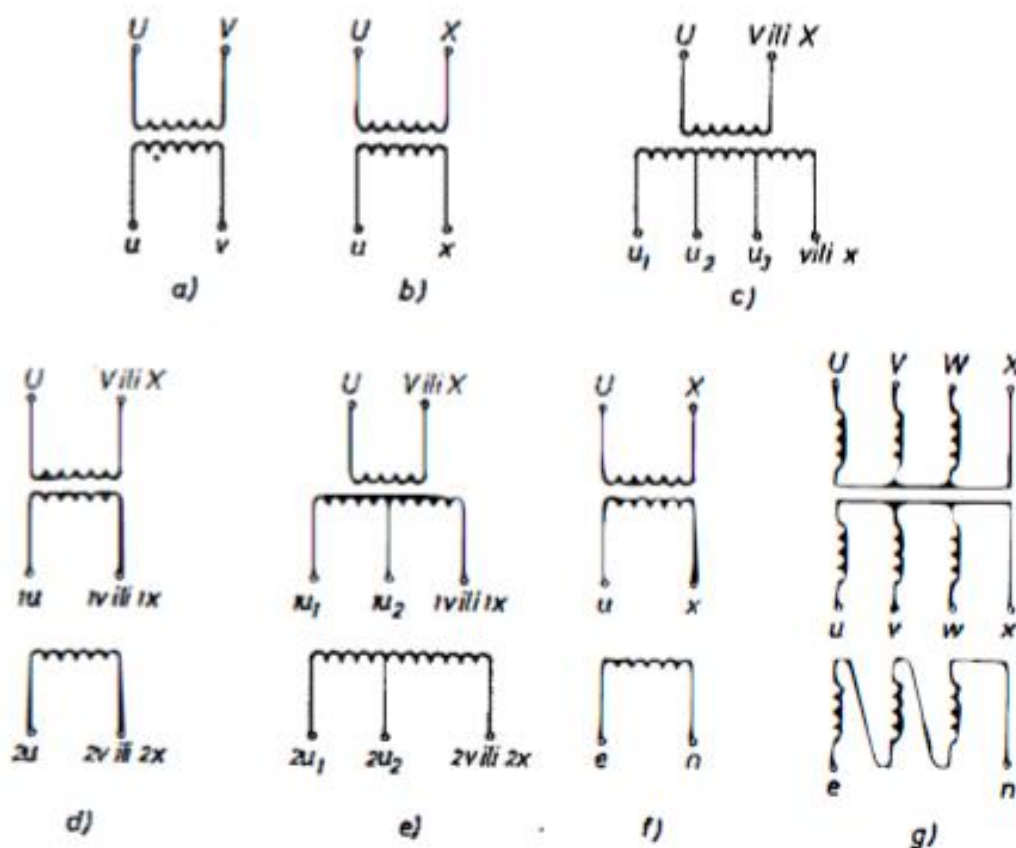
Stezaljke na mjernim transformatorima imaju oznake kako bi se jasno razlikovali primarni i sekundarni namoti, kao i njihove sekcije. Također, ove oznake omogućuju određivanje relativnog polariteta namota, što je važno za ispravno povezivanje s mjernim uređajima kako što su voltmetri, ampermetri i brojila. Stoga je bitno da stezaljke budu jasno označene i da te oznake budu trajne i vidljive, bilo na površini stezaljki ili u njihovoj neposrednoj blizini. [2]

Velikim slovima K i L označavaju se primarne stezaljke strujnog transformatora, dok se sekundarne stezaljke označavaju malim slovima k i l (Slika 3.1.). Međunarodna elektrotehnička komisija (IEC) preporuča upotrebu oznaka S_1 i S_2 za sekundarne stezaljke, te P_1 i P_2 za primarne stezaljke. [1]



Slika 3.1. Označavanje stezaljki strujnih transformatora [2]

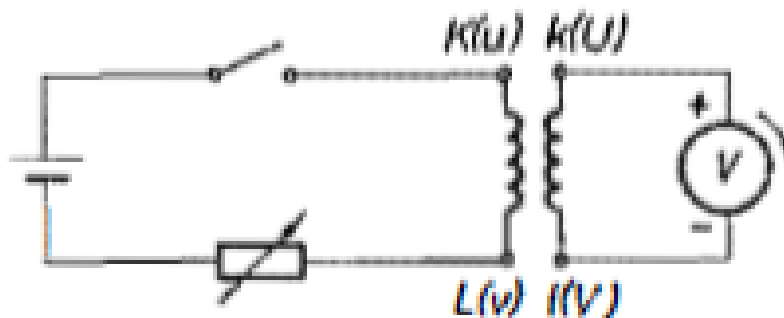
Stezaljke na primaru kod naponskih transformatora označavaju se velikim slovima: U, V, W, X, dok se na sekundarnoj strani koriste mala slova: u, v, w i x (Slika 3.2.). Velika slova U, V i W označavaju izolirane stezaljke, dok slovo X označava stezaljku uzemljenja. Još imamo slovo e i n koje koristimo kada spajamo stezaljke u otvoreni trokut. Kao i kod strujnih transformatora polariteti stezaljki velikih i malih slova moraju biti jednaki. [2]



Slika 3.2. Označavanje stezaljki naponskih transformatora [2]

Pomoću istosmjernog voltmetra i izvora istosmjernog napona mogu se provjeriti polariteti stezaljki kod oba transformatora. Korištenjem preklopke stezaljka K (ili u) povezuju se s pozitivnim polom izvora, dok se stezaljka L (ili v) spaja na negativni pol izvora (Slika 3.3.). [2]

Istosmjerni voltmetar spoji se na sekundarne stezaljke, dok je njegova pozitivna stezaljka priključena na k (ili U) stezaljku, a negativna na l (ili V). Prilikom uključivanja preklopke P, u jezgri će se stvoriti magnetski tok, te će se inducirati napon na primarnom i sekundarnom namotu. Prikazati će se otklon na voltmetru u pozitivnom smjeru. Ako je otklon negativan, znači da je transformator krivo označen, te tada samo treba izmijeniti vodove ili oznake. Pri isključenju preklopke, otklon voltmetra će biti u suprotnu stranu. Postoje i drugi uređaji pomoću kojih možemo provjeriti oznake stezaljki. Kod njih se gleda otklon koji nastaje prilikom isključenja preklopke P, dok je galvanometar kratko spojen njezinim uključivanjem. [2]



Slika 3.3. Provjera oznaka stezaljki [2]

3.3. Strujni mjerni transformatori

Strujni mjerni transformatori imaju zadaću da transformiraju mjerne struje na mjerljivu vrijednost i odvajaju visokonaponski krug od sekundarne opreme i ljudi u praktički stalnom omjeru i bez faznog pomaka. Nazivni omjer transformacije K_n određen je omjerom nazivne primarne struje I_{1n} i nazivne sekundarne struje I_{2n} . [2]

$$K_n = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \quad (3.1)$$

Sastoje se od primarnog i sekundarnog namota, te željezne jezgre. Jezgre su uglavnom sačinjene od magnetskih materijala s visokom permeabilnošću i niskom magnetskom indukcijom. Sekundarne stezaljke pogona, nikako ne smiju ostati otvorene, jer mogu nastati visoki naponi koji mogu biti opasni po život, te može doći do pretjeranog zagrijavanja i gubitaka u jezgri. [4] Razlikujemo strujne transformatore za mjerenje i strujne transformatore za zaštitu, ovisno o teretu koji se priključuje na njih. Kod strujnih transformatora za mjerenje se traži ograničena promjena sekundarne struje kod kratkih spojeva radi zaštite instrumenata, dok kod strujnih transformatora za zaštitu želi se precizan prijenos struja mnogo većih od nazivnih. [2] Strujna pogreška (p_i) definirana kod oba transformatora:

$$p_i = \frac{K_n \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Gdje je:

K_n – nazivni omjer transformacije

I_1 – primarna struja

I_2 – sekundarna struja

Kutna pogreška (δ_t) strujnog transformatora, definirana je kao fazna razlika između vektora primarne i sekundarne struje. Pogreška je pozitivna ako vektor sekundarne struje prethodi primarnu struju, te se izražava u minutama. [5]

Postoje tri glave izvedbe izolacijskog sustava mjernih transformatora a to su:

1. Papir impregniran uljem
2. Epoksidna smola
3. Plin SF₆

Najčešća vrsta izolacije na visokonaponskim mjernim transformatorima jest papirno uljna, dok je epoksidna smola manje-više ograničena za transformatore srednjeg napona. Plin SF₆ koristi se prvenstveno za GIS postrojenja, odnosno plinom oklopljena postrojenja.

Osim podjele mjernih transformatora prema vrsti izolacije, možemo ih razvrstati i prema vrsti ugradnje. A to su transformatori za unutarnju i vanjsku ugradnju.

Obzirom na veličinu napona mogu se podijeliti u 4 kategorije:

1. Niskonaponski do 1kV
2. Srednjenaponski do 35kV
3. Visokonaponski do 800kV
4. Transformatori izolirani plinom SF₆

3.3.1. Strujni transformatori izolirani epoksidnom smolom

Mjerni transformatori s epoksidnom smolom, koja se kombinira s punilima, zamijenili su porculanske transformatorske izolacije za napone do 35 kV i čak 110 kV. To je zbog tehničkih prednosti epoksidne smole u usporedbi s porculanom. Porculanska izolacija zahtjeva dugotrajno pečenje na visokoj temperaturi, dok epoksidni transformatori omogućuju izradu cijelog aktivnog

dijela bez tako visokih temperatura. Epoksidna smola se stvrdnjava na nižim temperaturama, te time omogućuje kompaktnu konstrukciju i lakšu ugradnju u razna postrojenja. [2]

Ovisno o primjeni i zahtjevima, strujni mjerni transformatori izvode se kao potporni i provodni, a prema izvedbi kao štapni, provlačni i namotni. [2]

Epoksidni potporni namotni strujni transformator dizajniran je za najviše pogonske napone razine do 17,5 kV ili 38 kV. Može imati primarne nazivne struje od 2x10 A do 2x400 A, a sekundarni namot ima nazivnu struju od 5 A. Zadovoljava različite klase točnosti i snage za mjerenje i zaštitu. Također može biti opremljen s dvije jezgre, pri čemu jedna služi za mjerenje, a druga za zaštitu. Prikladan je za različite primjene radi svoje kompaktne izvedbe. [2]



Slika 3.4. Potporni strujni transformator [6]

Provodni strujni transformator koristi se za unutarnju ugradnju, najčešće između zidova. [6]



Slika 3.5. Provodni strujni transformator [6]

Štapni strujni transformatori su jednostavni transformatori s jednim štapnim vodičem na primarnoj strani, koji se koriste za visoke primarne struje i praktički neograničene dinamičke struje. Međutim, nisu prikladni za visoke snage i male primarne struje, obično se koriste za primarne struje od 100 A ili više. [7]



Slika 3.6. Štapni strujni transformator tipa ASA, Končar [8]

Provlačni transformatori nemaju vlastiti primarni namot, već se primarna struja mjerenja provodi kroz sabirnicu. [7] Uglavnom koriste se za niske napone i ugrađuju između zidova ili pregrada. [6]



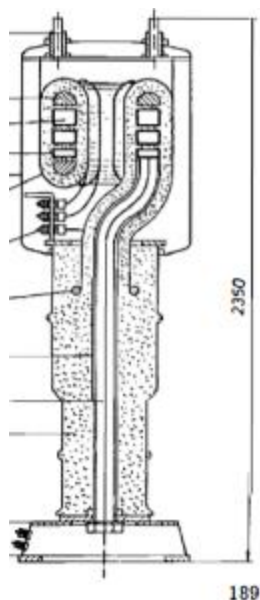
Slika 3.7. Provlačni strujni transformator [9]

Namotni transformatori se koriste kad je potrebno više zavoja u primarnom namotu, često se dijele na dijelove i omogućuju mjerenje pri različitim naponskim razinama. [7]



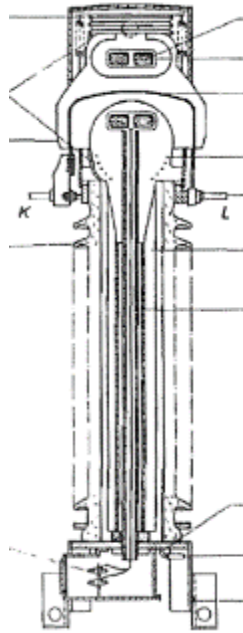
Slika 3.8. Epoksidni potporni (namotni) transformator [7]

Epoksidni strujni transformator za 110 kV, prikazan na (slika 3.9.), primarni namot je zaliven, što pomaže u smanjenju pregrijavanja pri kratkom spoju u mreži. U ovom transformatoru, vodoravno postavljene prstenaste jezgre i sekundarni namoti smješteni su u glavi, pridržavani prstenom i potpornom cijevi. Elastični izolacijski sloj nalazi se između njih i epoksidne smole kojom su preliveni. Taj sloj ne propušta smolu, a na njemu se nalazi glatki vodljivi sloj koji je na potencijalu zemlje. Sredinom izolatora od epoksidne smole prolazi potporna cijev, a gornji dio ima prstenastu elektrodu koja ravnomjerno raspodjeljuje napon uzduž površine izolatora. Gornji dio transformatora zaštićen je metalnim kućištem na kojem su priključci za prespajanje primarnog namota u različitim omjerima. Zbog osjetljivosti na ultraljubičaste zrake epoksidne smole, ova izvedba je pogodna samo za unutrašnju montažu. [2]



Slika 3.9. Epoksidni strujni transformator za nazivni napon 110 kV za unutrašnju montažu [2]

Ukoliko površina smole nije pod električkim naprezanjem, moguće je koristiti običnu epoksidnu smolu u vanjskim izvedbama kao na (slika 3.10.), što se primjenjuje kod strujnih transformatora do 220 kV. Ovdje se primarni i sekundarni namoti, zajedno s jezgrom, nalaze u glavi transformatora i izolirani su epoksidnom smolom, dok je izolacija prema zemlji ostvarena porculanskim izolatorom s papirnim kondenzatorskim provodnikom impregniranim uljem. [2]



Slika 3.10. Eposkidni strujni transformator za nazivni napon 220 kV za vanjsku montažu [2]

3.3.2. Strujni transformatori izolirani uljem

Postoje tri osnovne izvedbe strujnih transformatora za visoke nazivne napone.. U lončastoj izvedbi, sva visokonaponska izolacija obuhvaća primarni namot smješten na dnu transformatora u metalnom kotlu (Slika 3.11.). Križno-prstenasta izvedba ima izolaciju podijeljenu između primarnog i sekundarnog namota, obično smještenih u sredini porculanskog izolatora (Slika 3.12.). Glavasta izvedba ima svu izolaciju oko sekundarnog namota i jezgre, koje su smještene u glavi transformatora (Slika 3.13.). Tanke metalne bandaže unutar izolacije osiguravaju jednoličnu raspodjelu potencijala. [2]



Slika 3.11. Lončasta izvedba strujnog transformatora [10]



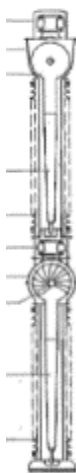
Slika 3.12. Križno-prstenasta izvedba strujnog transformatora [11]



Slika 3.13. Glavata izvedba strujnog transformatora tipa AGU, Končar [12]

Mjerni transformatori obično su dvodijelni ili višedijelni radi izvedbenih i transportnih razloga. Visina transformatora raste približno razmjerno nazivnom naponu. U modernim izvedbama, primarni namot može imati oblik slova U s dva kapacitivna provodnika namotana strojno, omogućujući dobro hlađenje i mehaničko učvršćivanje.

Za najviše nazivne napone, ponekad se koristi kaskadno spajanje dva ili više transformatora (*Slika 3.14.*). Papirna izolacija omotava sekundarni namot i jezgru u glavi transformatora, a kondenzatorski provodnici osiguravaju jednoliko naprezanje izolacije. Ove inovacije omogućuju učinkovito proizvodne procese i olakšavaju transport transformatora u horizontalnom položaju zbog velike visine.[2]



Slika 3.14. kaskadni strujni transformator [2]

3.3.3. Strujni transformatori izolirani plinom SF₆

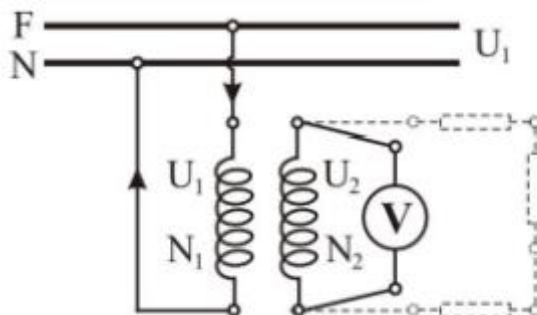
U urbanoj i industrijskoj sredini s rastućom potrebom za električnom energijom, često se zahtijevaju viši pogonski naponi, što predstavlja izazov za postavljanje tradicionalnih visokonaponskih postrojenja na otvorenom prostoru. Rješenje za ovakve situacije su metalna oklopljena postrojenja s plinom pod pritiskom, primjerice sumporni heksafluorid (SF₆), koji omogućuje značajno smanjenje dimenzija. Osim kompaktnosti, prednosti uključuju otpornost na atmosferske uvjete, sigurnost od dodira pod naponom, jednostavno održavanje te brzu montažu. Ova rješenja se primjenjuju za pogonske napone do 800 kV. [2]



Slika 3.15. Strujni transformatori izolirani SF₆ [13]

3.4. Naponski mjerni transformatori

Naponski transformatori moraju precizno transformirati naponske vrijednosti s minimalnim faznim pomakom, prilagođene za napajanje mjernih instrumenata, zaštitnih i regulacijskih uređaja. [7] Spajaju se paralelno s izvorom ili potrošačem na primarnoj strani, dok su sekundarne stezaljke spojene paralelno na voltmetar (Slika 3.16.). [14]



Slika 3.16. Spajanje naponskog transformatora na mrežu [14]

Različite konstrukcijske mjere, poput povećanja presjeka žica i smanjenja indukcije u feromagnetskom materijalu, smanjuju naponske i fazne pogreške, čineći naponske mjerne transformatore visoko kvalitetnima. [14] Nazivni omjer transformacije (K_n) naponskog transformatora definiran je omjerom nazivnog primarnog napona (U_{1n}) i nazivnog sekundarnog napona (U_{2n}). [7]

$$K_n = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad (3.3)$$

Uz to, naponski transformatori mogu biti dvopolno ili jednopolno izolirani, ovisno o faznom naponu mreže. [7] Jednofazni naponski transformatori jednopolno izolirani imaju jedan kraj primarnog namota izoliran prema nazivnom stupnju izolacije. Povezuju se između jedne faza i zemlje. Dok jednofazni naponski transformatori dvopolno izolirani ima oba kraja primarnog namota i priključka izoliranog prema zemlji. Povezuje se između 2 faza vodiča.

Naponska i fazna pogreška transformatora proizlaze iz padova napona induciranih primarnom i sekundarnom strujom. Naponska pogreška definirana je izrazom:

$$p_u = \frac{K_n \cdot U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

Gdje je:

K_n – nazivni omjer transformacije

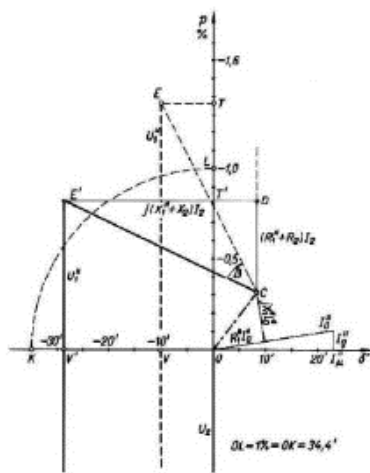
U_1 – primarni nazivni napon

U_2 – sekundarni nazivni napon

Padovi napona su manji kada je opterećenje manje ili kada je transformator bliže stanju praznog hoda. Naponska i fazna pogreška (δ_u) ovise o opterećenju priključenom na sekundarne stezaljke. Vrijednost tereta se izražava pomoću prividne vodljivosti i faktora snage tereta, te se može definirati i kroz prividnu snagu koju teret troši pri nazivnom sekundarnom naponu uz odgovarajući faktor snage. [2]

Naponski transformatori koriste se za mjerenje i zaštitu, s većom točnošću za mjerenje na užem naponskom području, dok se zaštitni transformatori koriste s manjom točnošću, ali održavajući stabilnost na širem naponskom području. [7]

Vektorski dijagrami pokazuju padove napona naponskih i faznih pogrešaka uzrokovane primarnom i sekundarnom strujom, a njihova kvantitativna analiza može se provesti kroz dijagrame vektora napona (Slika 3.17.). Naponske i fazne pogreške ovise o broju zavoja, opterećenju i korekcijama kako bi se osigurala stabilnost i točnost mjerenja. [7]



Slika 3.17. Kvantitativni fazorski dijagram transformatora [4]

Kako bi se spriječilo oštećenje, ne preporučuje se kratko spajanje sekundarnog kruga naponskog transformatora. Priključivanje primarnog namota obično se odvija putem osigurača. Ako se transformator povezuje na mjesto koje već ima zaštitu, osigurači na primarnoj strani mogu biti izostavljeni. Naponski transformatori nisu predviđeni za zaštitu visokonaponskih osigurača, već postrojenja od potencijalnih kvarova u transformatoru ili iza njega.

Preporučljivo je izbjegavati osiguranje primarnog i sekundarnog namota kod transformatora povezanih s automatskim regulatorom napona generatora. Sekundarni vodovi obično se osiguravaju, osim ako su uzemljeni. Metalni dijelovi transformatora koji nisu pod naponom trebaju biti uzemljeni.

Pogonski napon znatno utječe na izvedbu naponskih transformatora. Za niske pogonske napone koriste se suhe izvedbe s impregnacijom izolacijskim lakom radi zaštite od vlage. Epoksidne smole sve češće se primjenjuju za pogonske napone do 38 kV, pri čemu je primarni namot zaliven epoksidnom smolom. Za više pogonske napone u rasponu od nekoliko kilovolta, primjenjuju se uljne izvedbe, gdje je jezgra s primarnim i sekundarnim namotom smještena u kotlu ispunjenim transformatorskim uljem. [4]

Posebni naponski transformatori, prilagodljivi za različite napone, koriste se za precizna laboratorijska mjerenja s malim naponskim i faznim pogreškama. Kod visokih napona primjenjuju se i transformatori s otvorenom jezgrom u obliku stupa, čime se smanjuju dimenzije i pojednostavljuje izolacija. Otvorena jezgra uzrokuje povećanje struje magnetizacije, ali unutar prihvatljivih granica. Fazna pogreška uzrokovana padom napona može se kompenzirati odgovarajućim spojevima. Izolacija primarnog namota kod mjernih transformatora visokih napona predstavlja izazov, a kaskadni transformatori pružaju rješenje. Kaskadni transformatori olakšavaju izolaciju, iako povećavaju težinu namota i jezgre. [4]

3.4.1. Naponski transformatori izolirani epoksidnom smolom

Epoksidni naponski transformatori obično se proizvode za različite nazivne primarne napone, uključujući 3, 5, 6, 10, 20 i 25 kV, te čak do 110 kV. Mogu biti dvopolno ili jednopolno izolirani, prilagođeni unutrašnjoj montaži i ugradnji u različite položaje. [2]

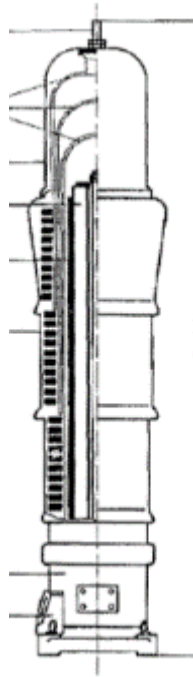


Slika 3.18. Dvopolno izolirani naponski transformator za vanjsku montažu (35 kV) [15]



Slika 3.19. Jednopolno izoliran naponski transformator za vanjsku montažu (35 kV) [15]

Na (slika 3.20.) je prikazan epoksidni naponski transformator za 110 kV s otvorenom jezgrom i primarnim namotom podijeljenim u tri dijela. Unutrašnja i vanjska površina epoksidnih kapa su metalizirane, osim dijela koji dodiruje primarni namot. Ovaj dizajn sprječava ionizaciju zraka u zračnom rasporu između kapa.[2]



Slika 3.20. Eposkidni naponski transformator s otvorenom jezgrom 110 kV [2]

3.4.2. Naponski transformatori izolirani uljem

Za primjenu na visokim naponima, često se koriste hermetički zatvoreni malouljni mjerni transformatori kako bi se smanjio utjecaj vlage na izolaciju. Ovi transformatori sadrže jezgru, primarni i sekundarni namot koji je smješten unutar uljnog kotla, s metalnom ili gumnom membranom za održavanje konstantnog pritiska unutar transformatora. Dvopolno (*Slika 3.21.*) i jednopolno (*Slika 3.22.*) izolirane varijante ovih transformatora, dizajnirane za vanjsku montažu, nude širok raspon nazivnih primarnih napona od 12 do 52 kV. [2]



Slika 3.22. Jednopolno izoliran naponski transformator tipa VKU [16]



Slika 3.21. Dvopolno izoliran naponski transformator tipa VKU [16]

Za visoke i vrlo visoke naponske razine koriste se uljni naponski transformatori koji mogu imati otvorenu ili zatvorenu jezgru. Otvorena jezgra omogućuje kompaktnije dimenzije i pojednostavljenu izolaciju, posebno pri vanjskoj montaži. [2]

Transformator s otvorenom jezgrom ima oblik stupa, s magnetskim tokom koji prolazi kroz zrak. Jezgra, postavljena okomito, nosi sekundarni, pa zatim primarni namot, odvojeni izolatorskim

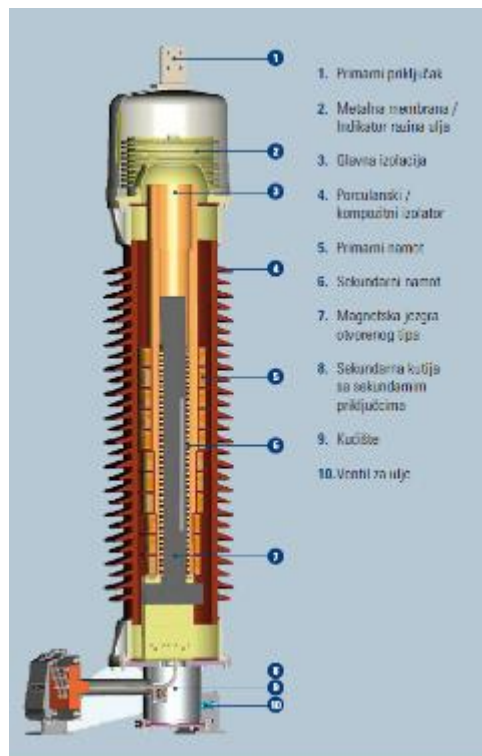
cilindrom s kondenzatorskim zaslonima za ravnomjernu raspodjelu potencijala. Ovaj dizajn smanjuje dimenzije transformatora i olakšava izolaciju bez potrebe za izolacijom prema jarmu.

Prednosti uključuju:

- Optimalno smještanje primarnog napona za ravnomjernu raspodjelu napona i hlađenje namota.
- Mogućnost visokog termičkog opterećenja zbog odličnih termičkih svojstava aktivnog dijela.
- Galvansko povezivanje sekcija primarnog napona smanjuje rizik od atmosferskih prenapona.
- Relativno velika struja magnetiziranja eliminira rizik od ferorezonancije.
- Praktično rješenje za kombinirani mjerni transformator pruža se korištenjem inverznog strujnog transformatora. [17]

Kaskadno spajanje transformatora često se koristi kod vrlo visokih napona, što olakšava izolaciju. Uobičajeno, jezgra s primarnim i sekundarnim namotom smještena je unutar metalnog kotla kod transformatora sa zatvorenim jezgrom. [2]

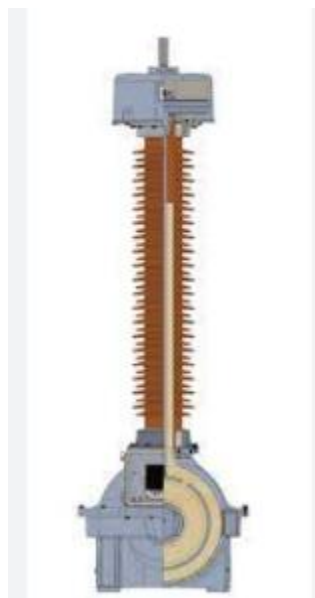
Presjek namota može varirati, ali pravokutni presjek s dodatnim elektrodama postaje češći u novijim izvedbama, omogućujući ravnomjernu raspodjelu potencijala. Za napone do 220 kV često se koriste transformatori s jednim stupnjem, dok se za veće napone, poput 400 i 750 kV, primjenjuje kaskadno spajanje dva ili više transformatora. [2]



Slika 3.23. Visokonaponski otvoreni induktivni transformator tipa VPU [18]



Slika 3.24. Kaskadni otvoreni naponski transformator [2]



Slika 3.25. Visokonaponski zatvoreni naponski transformator tip VEOT [19]

3.4.3. Naponski transformatori izolirani plinom SF₆

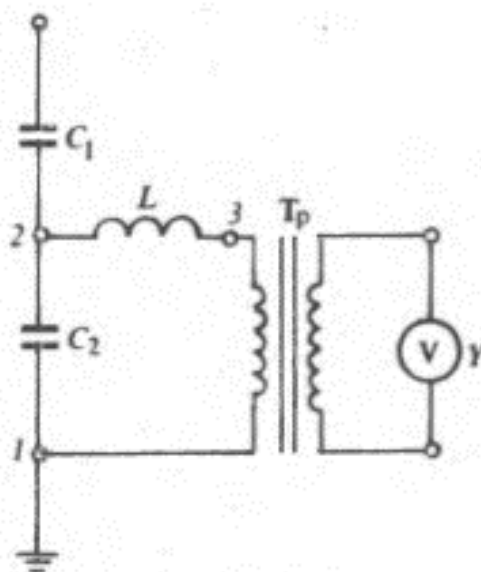
Naponski transformatori izolirani s SF₆ plinom koriste se za pretvorbu visokih napona na prijenosnim dalekovodima (do 800 kV) u standardizirane niske i lako mjerljive vrijednosti. Te vrijednosti koriste se za mjerenje, zaštitu i kontrolu sustava visokog napona. Stoga je nužna precizna i pouzdana transformacija napona. Naponski transformatori također pružaju odgovarajuću električnu izolaciju između opreme visokog napona i opreme za mjerenje niskog napona.



Slika 3.26. Naponski transformator izoliran plinom SF₆ [20]

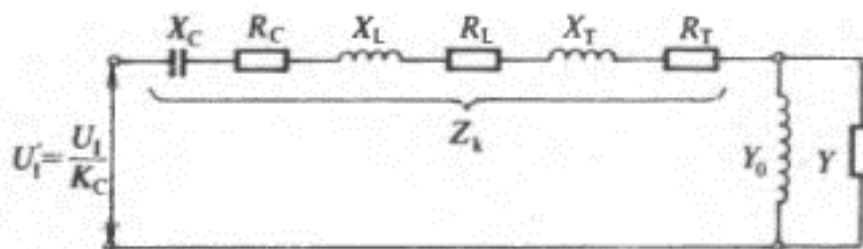
3.5. Kapacitivni naponski mjerni transformatori

Kapacitivni naponski transformatori igraju ključnu ulogu u mjerenju visokih mrežnih napona. Ovi transformatori sastoje se od visokonaponskog kondenzatora C_1 , povezanog u seriju s kondenzatorom većeg kapaciteta, C_2 . Pad napona na kondenzatoru C_2 obično iznosi oko 10-20 kV. U nadomjesnoj shemi (Slika 3.27.), reaktancija X_C označava kombinirani kapacitet C_1 i C_2 , dok R_C označava otpor uzrokovan gubicima u oba kondenzatora.



Slika 3.27. shema kapacitivnog mjernog transformatora [2]

Značajna komponenta kapacitivnog naponskog transformatora je prigušnica, koja ima ključnu ulogu u minimiziranju unutrašnje impedancije Z_k transformatora. Ovo smanjenje impedancije pridonosi smanjenju naponskih i faznih pogrešaka. Pogreške mjerenja ovise o frekvenciji, a optimalan omjer transformacije transformatora može povećati preciznost mjerenja. [7]



Slika 3.28. Nadomjesna shema kapacitivnog transformatora [7]

Važno je napomenuti da u nekim situacijama, kao što je serijsko povezivanje kondenzatora i prigušnica s nelinearnom karakteristikom, može doći do pojave ferorezonancije. Ova pojava može uzrokovati snažne oscilacije koje potencijalno mogu oštetiti kondenzatore zbog pretjeranog zagrijavanja ili prenapona. Da bi se spriječile takve situacije, ugrađuju se zaštitna iskrišta i odgovarajući pomoćni sklopovi. Zadatak prigušnice je minimizirati unutarnju impedanciju Z_k kapacitivnog transformatora postavljanjem $X_l = X_c - X_t$. [5]

Umjesto tradicionalnih sklopova s prigušnicom i transformatorom, moderna rješenja koriste elektroničko pojačalo koje se povezuje s kondenzatorom C_2 . Na izlazu elektroničkog pojačala nalaze se mjerni instrumenti ili sustav zaštite. Visok ulazni otpor elektroničkog pojačala omogućava upotrebu manjeg kapaciteta, što pojednostavljuje konstrukciju visokonaponskog kondenzatora, posebno u oklopljenim rasklopnim postrojenjima s stlačenim plinom, poput sumpor-heksafluorida (SF_6). Elektrode ovog kondenzatora čine dva kratka koaksijalna metalna valjka između kojih se nalazi SF_6 plin s visokom dielektričnom čvrstoćom. [5]

3.5.1. Kapacitivni naponski mjerni transformatori izolirani uljem i plinom SF_6

Elektromagnetska jedinica čini sastavni dio kapacitivnih naponskih transformatora, koja uključuje kapacitivni i induktivni dio. Kapacitivni dio ima niz kondenzatora smještenih u porculanskim izolatorima, hermetički zatvorenih, a kondenzatori su pod konstantnim tlakom kako bi omogućili prilagodbu volumena ulja promjenama temperature. Za nazivne napone iznad 220 kV, kondenzatori se često raspoređuju u više porculanskih izolatora koji se montiraju na licu mjesta.[2]

Induktivni dio elektromagnetske jedinice smješten je na dnu transformatora u metalnom kotlu. Induktivni dio ima konstantnu cijenu, dok cijena kapacitivnog dijela obično raste s nazivnim naponom. Stoga se kapacitivni naponski transformatori češće koriste za visoke nazivne napone, iznad 110 kV.[2]

Osim u mjerenju visokih mrežnih napona, kapacitivni naponski transformatori se primjenjuju i za prijenos visokofrekvencijskih signala. Oni omogućuju visoku propusnost za signale, dok istovremeno izoliraju uređaje od visokih napona. [2]



Slika 3.29. Kapacitivni mjerni transformator izoliran papirno uljnom izolacijom [21]



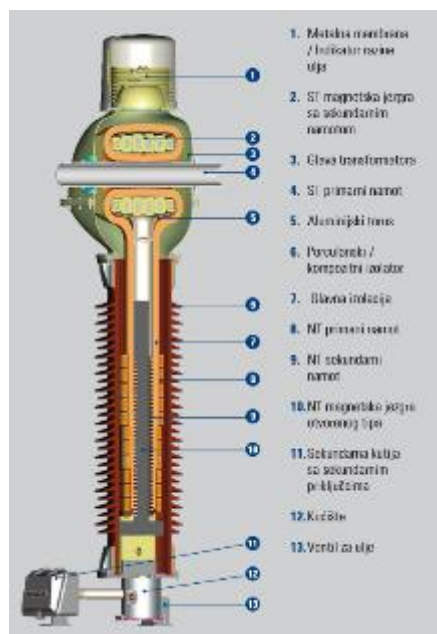
Slika 3.30. Kapacitivni transformator izoliran plinom SF₆ [22]

3.6. Kombinirani mjerni transformatori

Kombinirani mjerni transformatori služe za prilagodbu visokih struja i napona na vrijednosti unutar precizno definirane točnosti, što je pogodno za povezivanje uređaja za mjerenje, zaštitu i upravljanje. Također, osiguravaju izolaciju povezanih uređaja od visokog napona mreže. Ovaj tip transformatora obuhvaća induktivni naponski transformator i strujni transformator kao svoje dvije mjerne jedinice. [23]

- Inverzni strujni transformator smješten je u glavi kombiniranog transformatora, dok je induktivni transformator s zatvorenom jezgrom smješten u podnožju transformatora u zasebnom metalnom kućištu.
- Glavna izolacija strujnog transformatora koristi se kao visokonaponski djelatelj kapacitivnog naponskog transformatora, pri čemu je induktivna jedinica smještena u odvojeno kućište.
- Kombinirani transformator s izolacijom od plina SF₆, gdje su obično strujni i naponski transformatori smješteni u glavi kombiniranog transformatora.
- Novo rješenje predstavlja kombinirani transformator s inverznim strujnim transformatorom i naponskim transformatorom s otvorenom magnetskom jezgrom

Slika 3.31. Tehničke varijante kombiniranih transformatora [17]



Slika 3.32. Presjek kombiniranog mjernog transformatora tipa VAU [23]

Kombinirani trofazni mjerni transformator VAH, projektiran za vanjsku montažu i srednji napon, ima tri strujna i jedan naponski mjerni transformator za naponske razine od 24 kV i 36 kV. Glavnu izolaciju čini epoksidna smola, a strujni transformatori djeluju i kao visokonaponski provodni izolatori. Unutar metalnog kućišta, ispunjenog transformatorskim uljem, nalazi se naponski transformator. Prednosti VAH transformatora uključuju pouzdanost, jednostavnost, sigurnost i nepotrebnost posebnog održavanja. [24]



Slika 3.33. Kombinirani trofazni mjerni transformator tipa VHA [24]

Razlikujemo još jedan visokonaponski kombinirani mjerni transformator koji je izoliran plinom SF_6 . SF_6 je inertan, netoksičan i nezapaljiv plin s odličnim izolacijskim svojstvima. Ovi transformatori namijenjeni su postavljanju u atmosferi i slični su konstrukciji transformatora izoliranih uljem. Prednosti uključuju odsutnost efekta starenja, kompaktni dizajn, manju masu, sigurnost od eksplozija zahvaljujući sigurnosnom disku, te ekološki prihvatljiv izolacijski sustav koji omogućava prilagodbu dielektričnih svojstava putem regulacije pritiska plina, uz stalnu daljinsku kontrolu pritiska plina u pogonu. [17]



Slika 3.34. Kombinirani mjerni transformator izoliran SF_6 tipa VAP [25]

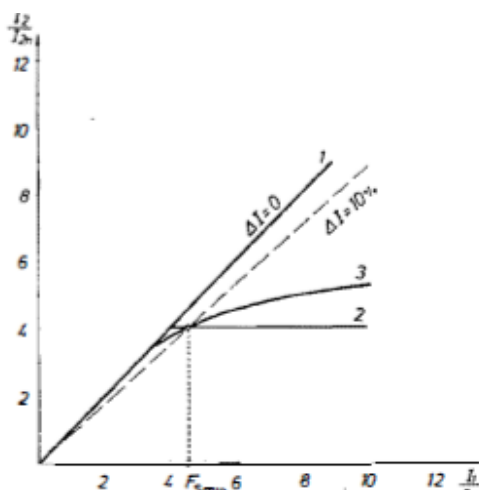
4. KLASSE TOČNOSTI

Klase točnosti mjernih transformatora definiraju standardizirane razine preciznosti tih uređaja. Transformatori struje ili napona koriste se za mjerenje i zaštitu u električnim sustavima. Viša klasa točnosti zahtijeva preciznije komponente za točnija mjerenja. Razumijevanje klasa točnosti je ključno pri odabiru transformatora za specifične elektroenergetske primjene.

4.1. Strujni transformatori za mjerenje

Kod kratkih spojeva u mreži, primarna struja strujnog transformatora može dramatično porasti iznad nazivne vrijednosti. Ovaj porast rezultira povećanjem struje u sekundaru, induciranog napona te magnetske indukcije u jezgri. Da bi se osigurala zaštita i očuvala ispravnost mjerenja, posebno kod strujnih transformatora za mjerenje, koriste se transformatori s visokom indukcijom u jezgri. To zasićenje jezgre sprječava prekomjerno povećanje sekundarne struje pri manjim preopterećenjima.

Standardizirane vrijednosti faktora sigurnosti $F=5$ i $F=10$ koriste se za bolju zaštitu instrumenata tijekom kratkih spojeva. Krivulje nadstrujne karakteristike prikazuju kako se transformatori ponašaju u različitim uvjetima, dok se granična pogreška približava pogrešci transformatora bez jezgre pri potpunom zasićenju. [2]

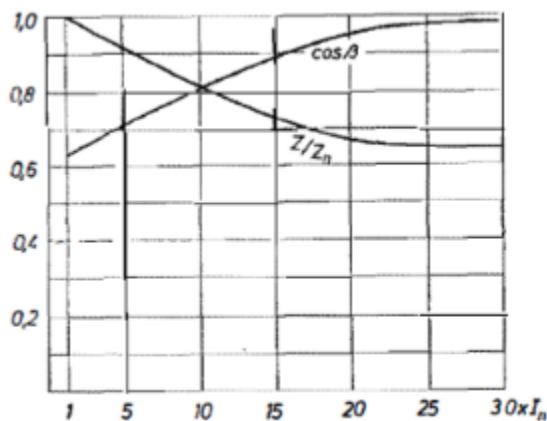


1. Nadstrujna karakteristika transformatora bez pogreške
2. Idealna nadstrujna karakteristika
3. Realna nadstrujna karakteristika

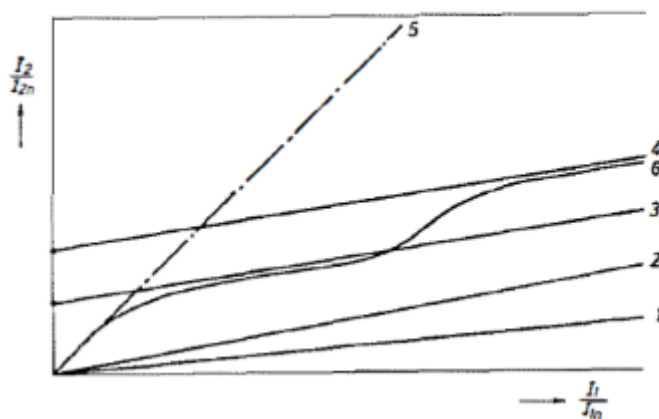
Slika 4.1. Nadstrujna karakteristika strujnog transformatora [2]

Da bi se analizirala nadstrujna karakteristika strujnog transformatora, važno je razumjeti promjene impedancije poprečne grane u nadstrujnom području. Omjer između primarne i sekundarne struje može se izračunati koristeći odgovarajuće fazne pomake impedancija. Zaštita instrumenata pri nadstrujnim uvjetima postiže se povećanjem ukupne impedancije sekundarnog kruga i smanjenjem granične impedancije. Omjer između tih impedancija, ključan za zaštitu instrumenata, trebao bi biti što veći. Međutim, postizanje tog cilja zahtijeva balans različitih zahtjeva, poput očuvanja točnosti mjerenja u redovnom radu. U praksi, odabir materijala s visokom relativnom permeabilnosti može značajno povećati omjer sekundarne struje u odnosu na primarnu, čime se poboljšava zaštita instrumenata pri nadstrujnim uvjetima.

Faktor sigurnosti, koji označava zaštitu instrumenata u sekundarnom krugu tijekom kratkog spoja, postaje manji kada je opterećenje transformatora manje od nazivnog. To zahtijeva veću struju kako bi jezgra došla do zasićenja (*Slika 4.2.*). Smanjenje impedancije sekundarnog kruga za dvostruko rezultira udvostručenom sekundarnom strujom kako bi se održala ista indukcija u jezgri. Pri odabiru strujnog transformatora, važno je uskladiti nazivno opterećenje sa stvarnim teretom kako bi se postigla optimalna zaštita instrumenata. Ovisno o smanjenju impedancije sekundarnog kruga, faktor sigurnosti može značajno porasti (*Slika 4.3.*). [2]



Slika 4.2. Impedancija i faktor snage indukcijskog brojila ovisno o njegovoj struji [2]



Slika 4.3. Nadstrujna karakteristika strujnog transformatora pri teretu sa željeznom jezgrom [2]

Opis slike:

- 1 i 2 transformator bez željezne jezgre s nezasićenim, odnosno zasićenim teretom
- 3 i 4 transformator gdje mu se jezgra zasićuje s nezasićenim, odnosno zasićenim teretom
- 5 transformator bez pogreške
- 6 realni strujni transformator i teret

Prema preporukama Međunarodne elektrotehničke komisije, strujni transformatori za mjerenje klasificirani su u šest različitih klasa točnosti: 0,1, 0,2, 0,5, 1, 3 i 5. Granica strujne pogreške, izražena u postocima pri nazivnoj struji i teretu, odnosi se na apsolutnu vrijednost oznake klase točnosti. Granice pogrešaka, maksimalna struja i drugi parametri definirani su u skladu s preporukama.

Tablica 4.1. Granice pogrešaka strujnih transformatora za mjerenje [2]

Klasa točnosti	± granice strujnih pogrešaka u % pri				± granice faznih pogrešaka u min pri			
	0,1 I _n	0,2 I _n	1,0 I _n	1,2 I _n	0,1 I _n	0,2 I _n	1,0 I _n	1,2 I _n
0,1	0,25	0,2	0,1	0,1	10	8	5	5
0,2	0,5	0,35	0,2	0,2	20	15	10	10
0,5	1,0	0,75	0,5	0,5	60	45	30	30
1	2	1,5	1,0	1,0	120	90	60	60
3		0,5—1,2 I _n : 3,0			nisu propisane			
5		0,5—1,2 I _n : 5,0			nisu propisane			

Klase strujnih transformatora 0,1 do 1 moraju zadovoljiti granice strujnih i faznih pogrešaka pri različitim strujama i teretima. Transformatori s proširenim mjernim opsegom, klase 0,1 do 1, imaju

maksimalnu struju od 150 ili 200% nazivne primarne struje. Točnost se provjerava tipskim ispitivanjima za različite vrijednosti primarne struje i tereta.

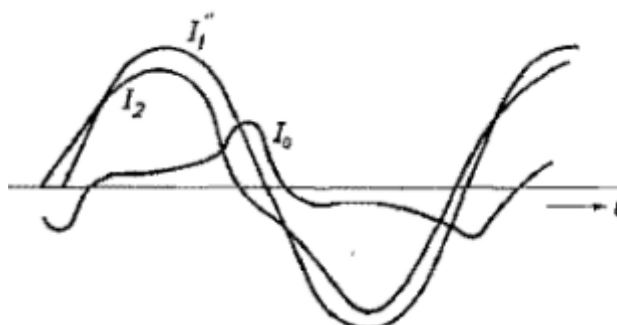
Tablica 4.2. Standardne vrijednosti nazivnih snaga strujnog transformatora za mjerenje [2]

Nazivna snaga (VA)	2,5	5	10	15	30
Nazivna impedancija (Ω) pri nazivnoj struji od 1 A	2,5	5	10	15	30
Nazivna impedancija (Ω) pri nazivnoj struji od 5 A	0,1	0,2	0,4	0,6	1,2

Nazivni teret izražen je u voltamperima, a preporučuje se dodavanje odgovarajuće impedancije ako impedancija tereta ne doseže četvrtinu nazivne vrijednosti. Nova predložena pravila uključuju klasifikaciju s klasama točnosti $0,05 I_n$, s promijenjenim granicama pogrešaka i dodatnim klasama 0,2 s i 0,5 s. Nova pravila također propisuju granice pogrešaka pri različitim trajanjima. [2]

4.2. Strujni transformatori za zaštitu

Strujni transformator ima ključnu ulogu u zaštiti od preopterećenja i kratkih spojeva u mreži, a njegova pogreška u nadstrujnom području može biti značajna. U donjem dijelu nadstrujnih karakteristika, pogreška nije značajna, no u gornjem dijelu brzo raste, što je posljedica zasićenja jezgre uslijed brzog porasta struje magnetiziranja (Slika 4.4.). Zbog tog naglog porasta, struja magnetiziranja odstupa od sinusnog oblika, uzrokujući da sekundarna struja također izgubi sinusni oblik.



Slika 4.4. Struje strujnog transformatora kada je jezgra zasićena [2]

Granična struja točnosti i faktor točnosti pri nazivnoj primarnoj struji, standardne su vrijednosti koje karakteriziraju strujne transformatora za zaštitu. Klase točnosti, poput 5P i 10P (Tablica 4.3.), označavaju toleranciju u pogrešci, a na natpisnoj pločici transformatora navodi se klasu točnosti i faktor točnosti. [2]

Tablica 4.3. Granice pogrešaka strujnih transformatora za zaštitu [2]

Klasa točnosti	Granice strujne pogreške pri nazivnoj primarnoj struji	Granice fazne pogreške pri nazivnoj primarnoj struji	Granice složene pogreške pri nazivnoj primarnoj graničnoj struji točnosti
	%	min	%
5P	± 1	± 60	5
10P	± 3	nisu propisane	10

4.3. Naponski transformatori za mjerenje i zaštitu

Prema preporukama Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC), naponski transformatori koriste se za mjerenja i zaštitu te su razvrstani prema klasama točnosti. Postoje pet različitih klasa točnosti za mjerenja: 0, 1, 0,2, 0,5, 1,0 i 3,0, dok su za zaštitu dostupne dvije klase točnosti: 3P i 6P. Klasa točnosti kod transformatora za mjerenje označava apsolutnu vrijednost najveće dopuštene naponske pogreške (p_u).

Tablica 4.4. Granice faznih i naponskih pogrešaka naponskih transformatora za mjerenje [2]

Klasa točnosti	$\pm p_u$ %	$\pm \delta_u$	
		min	grad
0,1	0,1	5	0,15
0,2	0,2	10	0,3
0,5	0,5	20	0,6
1,0	1,0	40	1,2
3,0	3,0	nije propisana	nije propisana

Naponski transformatori za mjerenje imaju određene zahtjeve za naponske i fazne pogreške pri nazivnoj frekvenciji, s ograničenjem za napone između 80% i 120% nazivnog napona te teretom u rasponu od 25% do 100% nazivnog tereta uz induktivni faktor snage od 0,8. Preporučuju se standardizirane vrijednosti nazivne snage u VA, s naglaskom na one označene. Vrijednosti za trofazne transformatore odnose se na snagu po fazi. Isto tako, kod naponskih transformatora za

mjerenje s dva neovisna sekundarna namota, navedeni su opsezi snaga za svaki namot, gdje gornja granica mora odgovarati standardiziranoj vrijednosti nazivne snage, s time da minimalna vrijednost donje granice ne može biti manja od 25% maksimalne vrijednosti gornje granice. Opterećenje jednog namota utječe na pogrešku drugoga, pa se zahtijeva da svaki namot zadovoljava točnost za svoj opseg snage.[2]

Naponski transformatori za zaštitu imaju slične zahtjeve za naponske i fazne pogreške, uz nazivnu frekvenciju, 5% nazivnog napona i terete od 25% do 100% nazivnog tereta. Nazivni faktor napona ovisi o načinu uzemljenja mreže. Standardne vrijednosti tog faktora su:

- 1.2/trajno;
- 1.5/30 s;
- 1.9/30 s;
- 1.9/8 h;

Mjerni pretvarači i elektronička zaštita, uvedeni u novije vrijeme, koriste manje snage u usporedbi s klasičnim instrumentima i elektromehaničkim sustavima zaštite. U modernijim postrojenjima često nisu potrebne tako visoke snage mjernih transformatora kao ranije, s obzirom na manju potrošnju novih tehnologija. [2]

Tablica 4.5. Klase točnosti naponskih transformatora za zaštitu [2]

Klasa točnosti	$\pm p_u$ %	$\pm \delta_u$	
		min	crad
3 P	3,0	120	3,5
6 P	6,0	240	7,0

5. TEHNIČKI ZAHTJEVI MJERNIH TRANSFORMATORA

Pravilnikom o mjeriteljstvu i tehničkim zahtjevima utvrđuju se standardi za strujne i naponske mjerne transformatore različitih razreda točnosti, koji se koriste u izmjeničnim mrežama frekvencije 50 Hz. Razredi točnosti strujnih transformatora su 0,1 – 0,2 – 0,5 – 0,2 S – 0,5 S, dok razredi točnosti naponskih mjernih transformatora su 0,1 – 0,2 – 0,5.

Pravilnik pokriva različite tipove mjernih transformatora (*Slika 5.1.*):

1. strujni transformatori;
2. strujni transformatori proširenog opsega;
3. trofazni strujni transformatori izrađeni kao cjelina od dva ili tri strujna transformatora;
4. jednopolno izolirani naponski transformatori;
5. dvopolno izolirani naponski transformatori, pojedinačan ili dva transformatora u V-spoju u zajedničkom kućištu s tri izolatora;
6. kapacitivni naponski transformatori;
7. kombinirani transformatori izrađeni kao cjelina od jednog strujnog transformatora i jednog naponskog transformatora, jednopolno izoliranog u zajedničkom kućištu;
8. trofazni kombinirani mjerni transformatori izrađeni kao cjelina od dva ili tri strujna transformatora i dva ili tri naponska transformatora u zajedničkom kućištu.

Slika 5.1. Tipovi mjernih transformatora [26]

Tablica 5.1. Norme tipskih ispitivanja mjernih transformatora [26]

Vrsta Mjernog Transformatora	Norme za Ispitivanje
Strujni Transformatori	HRN EN 60044-1
Induktivni Naponski Transformatori	HRN EN 60044-2
Kombinirani Transformatori	IEC 60044-3
Kapacitivni Naponski Transformatori	IEC 60044-5
Ostali Mjerni Transformatori	Prema odgovarajućim hrvatskim normama i pravilnicima

5.1. Tehničke značajke

Svi mjerni transformatori moraju biti prilagođeni za rad na nazivnoj frekvenciji od 50 Hz i njihove nazive vrijednosti moraju obuhvaćati sljedeće:

- Za strujne transformatore, određena je nazivna sekundarna struja u rasponu od 1 A – 5 A.
- Naponski transformatori moraju imati nazivni sekundarni napon koji iznosi ili 100 V - $100/\sqrt{3}$ V.
- Primarna struja strujnih transformatora ima nazivne vrijednosti od 10 A – 12,5 A – 15 A – 20 A – 25 A – 30 A – 40 A – 50 A – 60 A – 75 A – 80 A, uključujući decimalne dijelove ili umnoške. Ove vrijednosti primjenjuju se i na najmanju vrijednost nazivne primarne struje kod prespojivih mjernih transformatora.
- Nazivni primarni naponi naponskih transformatora specificirani su prema normi IEC 60038.
- Snaga strujnih transformatora ima nazivne vrijednosti od 2,5 VA – 5 VA – 10 VA – 15 VA – 30 VA, dok snaga naponskih transformatora iznosi od 10 VA – 15 VA – 25 VA – 30 VA – 50 VA – 75 VA – 100 VA – 150 VA – 200 VA – 300 VA.
- Razredi točnosti za strujne transformatori su 0,1 – 0,2 – 0,5 – 0,2 S – 0,5 S, pri čemu se jezgre razreda točnosti 1 – 3 – 5 koriste za druga mjerenja, a jezgre razreda točnosti 5P i 10P za zaštitu.
- Oznake struje proširenog mjernog opsega obuhvaćaju **ext.** 120 % – **ext.** 150 % – **ext.** 200%.
- Razredi točnosti naponskih transformatora su 0,1 – 0,2 – 0,5, pri čemu se mjerne jezgre razreda točnosti 1 i 3 koriste za druga mjerenja.
- Razredi točnosti kapacitivnih naponskih transformatora su 0,2 – 0,5, pri čemu se mjerne jezgre razreda točnosti 1 i 3 koriste za druga mjerenja.

Slika 5.2. Nazivne vrijednosti transformatora [26]

5.2. Pogreške transformatora

Strujna pogreška strujnog mjernog transformatora definira se izrazom:

$$p_i = \frac{K_n \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

gdje je:

K_n – nazivni transformatorski omjer,

I_1 – primarna struja efektivne vrijednosti u A

I_2 – sekundarna struja efektivne vrijednosti u A

Razlika u fazi između vektora primarne i sekundarne struje odnosi se na faznu pogrešku strujnog transformatora. Za idealni mjerni transformator, odabire se smjer vektora kako bi fazna razlika bila nula. Ako vektor sekundarne struje ide ispred vektora primarne struje, fazna pogreška strujnog transformatora smatra se pozitivnom. Ova pogreška izražava se u minutama.

Naponska pogreška mjernog transformatora definira se izrazom:

$$p_u = \frac{K_n \cdot U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\% \quad (5.2)$$

gdje je:

K_n – nazivni transformatorski omjer,

U_1 – primarni napon efektivne vrijednosti u V

U_2 – sekundarni napon efektivne vrijednosti u V

Fazna razlika između vektora primarnog napona i vektora sekundarnog napona definira faznu pogrešku naponskog transformatora. Smjer vektora odabire se tako da za idealan mjerni transformator fazna razlika bude nula. Pozitivna fazna pogreška naponskog transformatora javlja se kada vektor sekundarnog napona prethodi vektoru primarnog napona. Ova pogreška izražava se u minutama. [26]

5.3. Mjeriteljske značajke

Ispitne točke za testiranje pogrešaka strujnih transformatora izražene su postocima nazivne primarne struje, prema (Tablica 5.2.). Pri tome, vrijednosti struje proširenog mjernog opsega od 120 %, 150 % i 200 % nazivne primarne struje označene su kao struje proširenog mjernog opsega (ext. 120 %, ext. 150 % ili ext. 200 %).

Tablica 5.2. Granice pogrešaka strujnih transformatora [26]

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

Napomena:

* Vrijednost struje proširenog mjernog opsega (120 %, 150 % ili 200 % od nazivne primarne struje) varira ovisno o oznaci struje proširenog mjernog opsega (ext. 120 %, ext. 150 % ili ext. 200 %).

** Kod ispitivanja strujnih transformatora razreda točnosti 0,2 S i 0,5 S koriste se vrijednosti struje od 1 % nazivne primarne struje.

Granice pogrešaka strujnih transformatora pri nazivnim frekvencijama trebaju biti u usklađene s odredbama (Tablica 5.2.) za bilo koje vrijednosti tereta od 25% do 100% nazivnog tereta. Razredi klase točnosti strujnih transformatora 0,1 – 0,2 – 0,2S mogu imati mogućnosti specificiranja proširenog opsega opterećenja, ako njihov nazivni teret ne premašuje 15 VA. Strujna i fazna pogreška moraju ostati unutra dopuštenih granica koje su definirane (Tablica 5.2.), za raspon vrijednosti tereta od 1 VA do 100% nazivnog tereta. Teret koji se koristi za ispitivanje mora biti induktivan s faktorom snage od 0,8, osim ako je manje od 5 VA, tada faktor snage mora iznositi 1. Ako je izražen u voltamperima, teret ne smije biti manji od 1 VA. [26]

U mjernoj grupi za mjerenje električne energije, strujni transformatori moraju zadovoljiti dopuštene pogreške definirane za svaku upotrijebljenu jezgru (Tablica 5.2.). Čak i kada su sekundarni namoti ostalih jezgri kratko spojeni ili opterećeni nazivnim teretima, ovo pravilo ostaje važeće. [26]

Ispitivanje pogrešaka naponskih mjernih transformatora provodi se prema (Tablica 5.3.) na točkama izraženim u postocima nazivnog napona. [26]

Tablica 5.3. Dopuštene granice pogrešaka za naponske mjerne transformatore [26]

Oznaka Razreda točnosti	Granice dopuštenih pogrešaka u ovisnosti o postotku nazivnog napona					
	Naponska pogreška P_u (%)			Fazna pogreška δ_u (min)		
	120	100	80	120	100	80
0,1	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	± 5	± 5	± 5
0,2	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	± 10	± 10	± 10
0,5	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	± 20	± 20	± 20

Induktivni naponski mjerni transformatori trebaju imati naponske i fazne pogreške unutar dopuštenih granica, za bilo koje vrijednosti sekundarnog tereta od 25 % do 100 % nazivnog tereta, s induktivnim faktorom snage od 0,8. Razredi klase točnosti induktivnih mjernih transformatora 0,1 i 0,2 mogu imati mogućnosti specificiranja proširenog opsega opterećenja, ako njihov nazivni teret ne premašuje 10 VA. Pogreške u naponu i fazi moraju ostati unutar dozvoljenih granica utvrđenih (Tablica 5.3.), za sekundarne vrijednosti tereta u rasponu od 0 VA do 100 % nazivnog tereta, pri čemu je faktor snage jednak 1. Kapacitivni naponski mjerni transformatori s naponskim i faznim pogreškama u razredu točnosti 0,2 i 0,5 moraju imati identične pogreške kao odgovarajući induktivni naponski transformatori. Naponske i fazne pogreške naponskih transformatora mjere se na njihovim priključcima, uz upotrebu postavljenih osigurača i otpornika, pod uvjetom da su oni integrirani kao dio samog transformatora. [26]

Ako naponski transformatori imaju više namota koji se koriste u mjernoj grupi za mjerenje električne energije, moraju zadovoljiti definirane dopuštene pogreške (Tablici 5.3). Čak i kada su ostali sekundarni namoti opterećeni nazivnim teretima ili su u praznom hodu, ova odredba ostaje važeća. Pri ispitivanju razreda točnosti naponskog transformatora, namot za spajanje u otvoreni trokut ostaje neopterećen. [26]

Kombinirani transformatori, sastavljeni od strujnog i naponskog transformatora u zajedničkom kućištu, moraju ispunjavati sljedeće uvjete:

1. Naponski transformator, radeći između 80 % i 120 % nazivnog napona, mora zadovoljiti dopuštene granice pogrešaka za svoj razred točnosti pri svim teretima.

2. Strujni transformator, radeći pri svim vrijednostima primarne struje (*Tablica 5.2.*), za sve terete na svim jezgrama, mora zadovoljiti dopuštene granice pogrešaka za svoj razred točnosti. [26]

5.4. Natpisi i oznake

Natpisna pločica, koja sadrži podatke i oznake, mora biti postavljena na vidljivom mjestu na strujnim i naponskim transformatorima. Oznake i natpisi trebaju biti napisani na hrvatskom jeziku, trajno i jasno vidljivi u uobičajenim radnim uvjetima te postavljeni na način koji onemogućuje brisanje ili skidanje. [26]

- Ime, naziv ili znak proizvođača, te mjesto proizvodnje.
- Oznaku tipa transformatora.
- Oznaku vrste transformatora (npr. "Strujni transformator" ili "Naponski transformator").
- Tvornički broj i godinu proizvodnje (zadnje dvije znamenke godine mogu biti odvojene kosom crtom).
- Nazivnu vrijednost primarne struje i sekundarne struje, ili primarnog napona i sekundarnog napona.
- Nazivnu frekvenciju.
- Nazivnu snagu i oznaku razreda točnosti.
- Za transformatore s više jezgri ili namota, navesti nazivne snage i oznake razreda točnosti za svaku jezgru ili namot.
- Službenu oznaku mjernog transformatora.
- Oznaku odgovarajućih priključaka, jezgara ili namota (posebno za transformatore s više jezgra ili namota).
- Najviši pogonski napon, s odvojenim podacima za ispitni izmjenični i ispitni udarni napon (ispitni udarni napon daje se samo za transformatore namijenjene ugradnji na otvorenom prostoru).
- Oznaku struje proširenog opsega (npr. ext 200 %).
- Toplinski razred izolacije, ako se razlikuje od razreda A.
- Faktor sigurnosti za strujne mjerne transformatore.
- Nazivnu kratkotrajnu toplinsku struju (I_{th}) za strujne mjerne transformatore.
- Nazivni faktor napona i odgovarajuće nazivno trajanje za naponske mjerne transformatore.

Slika 5.3. Informacije na natpisnoj pločici transformatora [26]

Kada su u pitanju strujni i naponski transformatori s više sastavnih dijelova, na natpisnoj pločici obavezno je navesti podatke o svakom sastavnom dijelu.

Kombinirani transformatori, koji predstavljaju cjelinu od strujnog i naponskog transformatora u zajedničkom kućištu, trebaju imati posebne podatke izdvojene za svaki dio, odnosno za strujni transformator i za naponski transformator. [26]

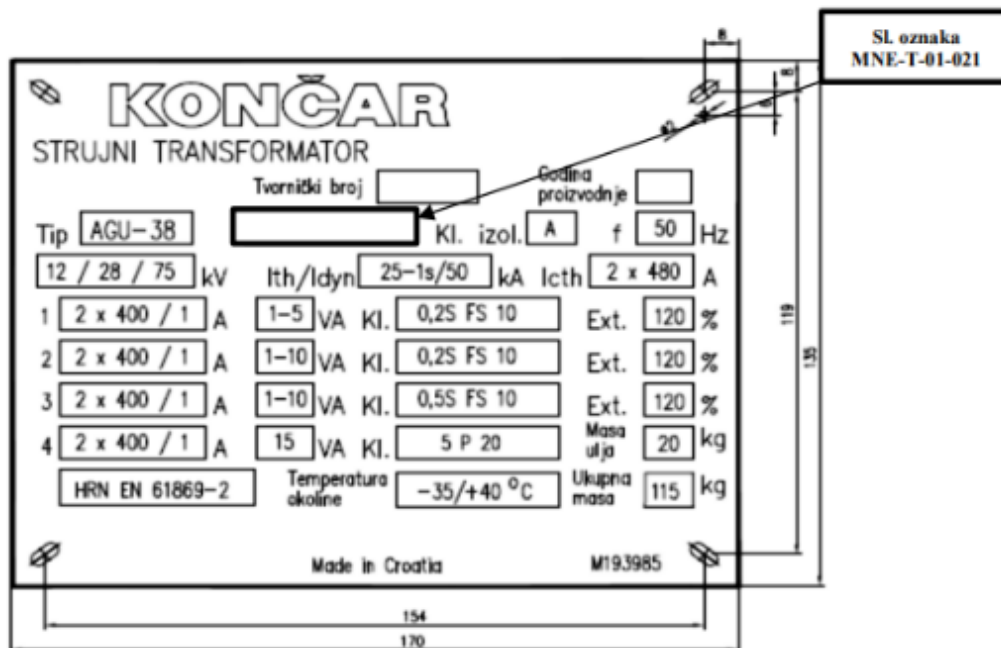
Za kapacitivne naponske transformatore, natpisna pločica treba sadržavati dodatne informacije (*Tablica 5.4.*)

Tablica 5.4. Informacije na natpisnoj pločici kapacitivnog transformatora [26]

1. Nazivni kapacitet djelitelja napona.
2. Nazivni napon djelitelja napona u kilovoltima.

Prema konstrukcijskim smjernicama, potrebno je osigurati odgovarajući broj predviđenih mjesta na strujnim i naponskim transformatorima za postavljanje žigova. Ti žigovi se primjenjuju na natpisnoj pločici i, ako je potrebno, na ostalim dijelovima transformatora, u skladu s odredbama navedenim u odobrenju tipa mjerila. [26]

Sekundarni priključci strujnih i naponskih transformatora trebaju biti opremljeni odgovarajućim poklopcem. Ovaj poklopac mora biti konstruiran na način da se nakon priključenja sekundarnih vodiča može zaštititi žigom kako bi se spriječio neovlašteni pristup. [26]



Slika 5.1. Natpisna pločica strujnog mjernog transformatora [27]

6. ZAKLJUČAK

Mjerni transformatori ključni su elemente u elektroenergetskim sustavima. Ulaganje u prijenosnoj i distribucijskoj mreži, podcrtava važnost mjernih transformatora u praćenju i upravljanju elektroenergetskim mrežama. Njihova sposobnost preciznog mjerenja struje i napona od ključne je važnosti za održavanje stabilnosti i učinkovitosti mreža.

Razmatranje različitih izvedbi strujnih i naponskih mjernih transformatora, uključujući induktivne, kapacitivne i kombinirane mjerne transformatore, ukazuje na fleksibilnost i prilagodljivost ovih uređaja u različitim uvjetima i zahtjevima elektroenergetskih sustava. Raznolikost klase točnosti i namjena transformatora za mjerenje i zaštitu pruža jasnu podjelu prema potrebama sustava, omogućavajući optimalno korištenje resursa i poboljšanje ukupne učinkovitosti.

Isto tako, analiza tehničkih zahtjeva, uključujući fazne i strujne pogreške, standardizirane nazivne snage te ostale parametre, ističe potrebu za dosljednom implementacijom i ispunjenjem normi. Ovi zahtjevi čine ključnu osnovu za osiguranje točnih mjerenja i pouzdane zaštite elektroenergetskih sustava od preopterećenja ili drugih opasnosti.

U konačnici, visokonaponski mjerni transformatori igraju ključnu ulogu u osiguravanju stabilnosti, pouzdanosti i učinkovitosti elektroenergetskih sustava. Njihov razvoja je od suštinskog značaja za unapređenje tehnologije i podršku budućim potrebama elektroenergetskog sektora.

7. LITERATURA

- [1] Požar, H.: Visokonaponska rasklopna postrojenja, Zagreb 1990.
- [2] Bego, V.: Mjerni transformatori, Školska knjiga, Zagreb 1977.
- [3] Krčum, P.: Električna mjerenja, Fakultet u Splitu, odjel za stručne studije, Split 2012.
- [4] Bego, V.: Mjerenja u elektrotehnici, 8. dopunjeno izdanje, Zagreb 1990.
- [5] Električna postrojenja, Mjerni transformatori – predavanje izv.prof.dr.sc. Dubravko Franković
- [6] Završni rad, Strujni mjerni transformatori – Siniša Kanjuh, Rijeka 2016.
- [7] Tehnička enciklopedija, Mjerni transformatori
https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/mjerni_transformatori.pdf
- [8] http://www.koncar-mjt.hr/en/docs/koncarmjtHR/documents/29/1_0/Original.pdf
- [9] <http://fmt.rs/wp-content/uploads/2019/09/niskonaponski-strujni-transformatori.pdf>
- [10] <https://www.hyee-current-transformer.com/current-transformer/33kv-current-transformer-hair-pin-type-oil.html>
- [11] <https://www.hyee-current-transformer.com/voltage-transformer/72-5kv-cascade-voltage-transformer.html>
- [12] http://www.koncar-mjt.hr/docs/koncarmjtHR/documents/35/1_0/Original.pdf
- [13] <https://trench-group.com/products/sf6-insulated-current-transformers/>
- [14] Mjerenja u elektrotehnici - lekcije, Mr.sc Rajko Židovec
<https://pdfcoffee.com/mue-mjerni-transformatori-pdf-free.html>
- [15] http://www.koncar-mjt.hr/proizvodi/srednjenaponski_mjerni_transformatori/Naponski_epoksidni_transformatori
- [16] http://www.koncar-mjt.hr/proizvodi/srednjenaponski_mjerni_transformatori/Uljni_transformatori
- [17] Naponski mjerni transformatori
<https://pdfcoffee.com/naponski-transformatori-pdf-free.html>

- [18] http://www.koncar-mjt.hr/proizvodi/visokonaponski_mjerni_transformatori/Naponski_transformatori
- [19] https://trench-group.com/wp-content/uploads/2022/08/OIL-Insulated-Voltage-Transformer_2022_web.pdf
- [20] <https://trench-group.com/products/sf6-insulated-voltage-transformers/>
- [21] http://www.koncar-mjt.hr/docs/koncarmjtHR/documents/54/1_0/Original.pdf
- [22] <https://www.gdshp.com/product/capacitor-transformer/>
- [23] http://www.koncar-mjt.hr/docs/koncarmjtHR/documents/53/1_0/Original.pdf
- [24] http://www.koncar-mjt.hr/proizvodi/sredjenaponski_mjerni_transformatori/Kombinirani_trofazni_transformatori
- [25] http://www.koncar-mjt.hr/docs/koncarmjtHR/documents/50/1_0/Original.pdf
- [26] Pravilnik o mjeriteljskim i tehničkim zahtjevima za mjerne transformatore u mjernim grupama za mjerenje električne energije, državni zavoda za mjeriteljstvo, (»Narodne novine« broj 163/03), Zagreb 2006.
- [27] <https://metrologija.me/wp-content/uploads/OT/T-01/MNE-T-01-021.pdf>

8. SAŽETAK

Završni rad pruža pregled visokonaponskih mjernih transformatora u elektroenergetskim sustavima, analizirajući njihovu ključnu ulogu, različite izvedbe te klasu točnosti. Posebna pažnja posvećena je strujnim, naponskim (induktivnim i kapacitivnim) i kombiniranim transformatorima. Naglašena je podjela transformatora prema namjeni - mjerenje i zaštita, pritom istražujući tehničke zahtjeve, uključujući fazne i strujne pogreške te standardizirane snage.

KLJUČNE RIJEČI: mjerni transformatori, tehnički zahtjevi, klasa točnosti

SUMMARY

This paper gives an overview of high voltage instrument transformers in power supply systems and analyzes their crucial role, different designs and accuracy classes. Particular attention is paid to current, voltage (inductive and capacitive) and combined transformers. The classification of transformers according to their intended use - measurement and protection - is highlighted, examining the technical requirements, including phase and current errors, and the standardized ratings.

KEY WORDS: measuring transformers, technical requirements, accuracy class