

Usporedba nekonvencionalnih i konvencionalnih visokonaponskih mjernih transformatora

Gajčević, Matej

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:200:164661>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**

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

**Usporedba nekonvencionalnih i konvencionalnih
visokonaponskih mjernih transformatora**

Završni rad

Matej Gajčević

Osijek, 2024.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. KONVENCIONALNI MJERNI TRANSFORMATORI.....	2
2.1. Visokonaponski naponski mjerni transformatori	5
2.1.1. Točnost naponskih transformatora	9
2.2.1. Označavanje stezaljki naponskih transformatora	10
2.2.2. Izvedbe naponskih transformatora	12
2.2.3. Induktivna djelila	14
2.2.4. Kapacitivni naponski mjerni transformatori	17
2.3. Visokonaponski strujni mjerni transformatori	19
2.3.1. Točnost	23
2.3.2. Termička i dinamička struja strujnog mjernog transformatora.....	25
2.3.3. Označavanje stezaljki strujnih transformatora	26
2.3.4. Izvedbe strujnih mjernih transformatora.....	28
2.3.5. Kombinirani mjerni transformatori.....	31
2.3.6. Strujni transformatori za istosmjernu struju.....	34
2.3.7. Mjerenje pogrešaka mjernih transformatora.....	36
2.3.8. Mjere za smanjenje pogrešaka strujnih transformatora.....	38
3. NEKONVENCIONALNI MJERNI TRANSFORMATORI	40
4.1. Naponski optički mjerni pretvarači.....	41
4.2. Strujni optički mjerni pretvarači.....	41
4.3. Mjerenje struje padom napona na otporniku (shuntu)	43
4.4. Hall sonde	44
4.5. di/dt pretvarači	46
4. Pravilnik o mjeriteljskim i tehničkim zahtjevima mjernih transformatora.....	48
5. KONČAR mjerni transformatori	52

5.1. Primjer : Posjeta tvornici „Končar – mjerni transformatori“	52
5.2. Nekonvencionalni mjerni transformatori tip TRENCH GROUP	52
5.3. Nekonvencionalni mjerni transformatori tip ABB GROUP	56
5.3.1. Fiber-optički strujni senzor za visoki napon.....	56
5.3.2. Magnetno-optički strujni transformator za zaštitu (MOST-Z)	58
6. KAKVA SU OČEKIVANJA OD NEKONVEKIONALNIH MJERNIH TRANSFORMATORA?	60
7. ZAKLJUČAK	62
LITERATURA.....	64
SAŽETAK	67
ABSTRACT	68
ŽIVOTOPIS	69

1. UVOD

Zadatak završnog rada je usporedba konvencionalnih i nekonvencionalnih mjernim transformatorima. U okviru rada su predstavljeni i uspoređeni konvencionalni mjerni transformatori te su prikazani njihovi principi rada, karakteristike i izvedbe. Nakon toga, obrađeni su i nekonvencionalni mjerni transformatori koji su, također, međusobno uspoređeni te su navedene njihove prednosti, nedostaci i načini na koje se vrše mjerenja.

Zaštitna i mjerna oprema (odnosno uređaji) u visokonaponskim postrojenjima ne spajaju se izravno na visokonaponske vodove. Takvo se spajanje instrumenata i releja na visokonaponske vodove može izbjeći korištenjem mjernog transformatora za pretvaranje radnog visokog napona u vrijednost koja omogućuje upotrebu instrumenta i releja normalne veličine. [\[2\]](#)

Pomoću konvencionalnih naponskih mjernih transformatora visoki se naponi mogu svesti na niže vrijednosti prihvatljive za priključak, kako mjernih instrumenata, tako i zaštitnog uređaja. Kod naponskog mjernog transformatora rad se odvija u praznom hodu, zbog čega je odnos napona jednak broju namota. Namot može pregoriti ako je naponski mjerni transformator kratko spojen na sekundaru, zbog čega se sekundarni namoti uvijek osiguravaju s uzemljenjem. [\[2\]](#)

Kod visokonaponskih mjernih transformatora glavna je zadaća osigurati mjerenje visokih napona te zaštititi osoblje i instrumente od previsokih dodirnih napona. Razlikuju se dvije grupe naponskih mjernih transformatora: induktivni i kapacitivni. Induktivni su transformatori najisplativiji za napone do približno 150 kV, dok je kod kapacitivnih napon iznad 150 kV. Induktivni transformatori omogućuju vrlo točnu podjelu priključnog napona pri čemu se postiže vrlo malo pogrešaka. Kapacitivni se, pak, koriste u svrhu smanjenja troškova u sustavu, a namijenjeni su za vrlo visoke napone i cijena im je manja od induktivnih naponskih transformatora. [\[1\]](#)

Nekonvencionalni mjerni transformatori došli su do razine zrelosti i performansi koji čine da implementacija u potpunosti digitalnog mjerenja struje za visokonaponske transformatore bude moguća. Iznimna rješenja za svjetlovodni optički strujni senzor prikazana su skupa uz Rogowskijev svitak i elektronički naponski transformator u originalnim rješenjima koja odlikuju značajnim operativnim performansama, ekološkim, sigurnosnim i inženjerskim koristima kod transformatora, a da pritom podržavaju sva naredna ulaganja u transformatore.

2. KONVENCIONALNI MJERNI TRANSFORMATORI

Temeljem elektromagnetske indukcije, izmjenična struja jedne jakosti i napona može se u transformatoru pretvoriti u izmjeničnu struju jednake frekvencije, no različite jakosti i napona.

Mjerni transformator sastoji se od pravokutne željezne jezgre sastavljene od tankih željeznih limova i primarnog i sekundarnog namota koji su međusobno izolirani,

Izmjenična struja mijenja magnetski tok u željeznoj jezgri na primarnom namotu. Tako se i na sekundarnom namotu inducira izmjenični napon na istoj frekvenciji. Na svim je mjestima frekvencija ista, odnosno konstantna.

Idealni je transformator definiran ako se zanemare gubici u transformatoru, odnosno kod zakona o očuvanju energije snaga se ne gubi na primarnoj i sekundarnoj strani te treba biti jednaka.

Transformatori su vrlo važni pri prijenosu električne energije na velikim udaljenostima.

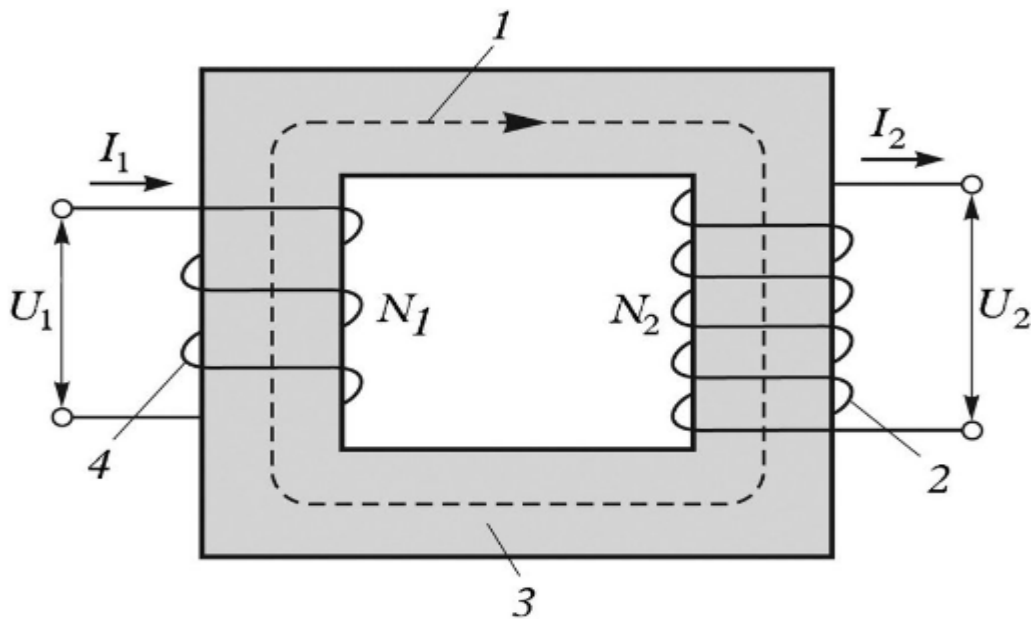
Mjerni transformatori rade na principu elektromagnetske indukcije. Visokonaponski strujni i naponski mjerni transformatori imaju važnu ulogu u prijenosnim i distribucijskim mrežama, a koriste se pri odvajanju mjernih i zaštitnih uređaja od visokih napona, gdje se koriste za izolaciju mjerne i zaštitne opreme od visokih napona te za pretvaranje izmjerenih struja i napona u veličine prikladne mjernoj i zaštitnoj opremi.

Mjerenje visokih AC (engl. *alternating current* – izmjenična struja) napona, velikih struja, snage i energije pomoću opreme spojene izravno na mjerni krug zahtijeva opremu velikih dimenzija. Veće vrijednosti napona i struje gotovo je nemoguće izravno izmjeriti, pa se za podešavanje tih vrijednosti na vrijednosti pogodne za mjerenje koriste mjerni transformatori.

Mjerni transformatori podešavaju izmjerene vrijednosti na standardizirane transformirane vrijednosti, tj. struju na 1 A i 5 A, a napone na 100 V i 200 V, $\frac{100}{\sqrt{3}}$, $\frac{200}{\sqrt{3}}$. [\[1\]](#)

Primarni namot spojen je na mjerni krug, a sekundarni namot spojen je na mjerni instrument ili zaštitni uređaj. [\[1\]](#)

Shematski prikaz osnovnih dijelova transformatora može se vidjeti na slici 2.1.



Slika 2.1.: Transformator – shematski prikaz osnovnih dijelova [18]

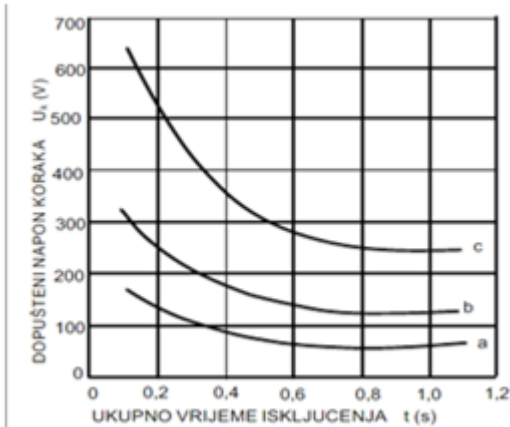
Brojem 1 označen je magnetski tok, 2 označava sekundarni namot, 3 jezgru, a broj 4 primarni namot.

Konstantan omjer napona, struje i zavoja primara i sekundara vrijedi kod idealnog transformatora. [18]

$$U_1 : U_2 = N_1 : N_2 \quad , \quad I_1 : I_2 = N_2 : N_1 \quad (2-1)$$

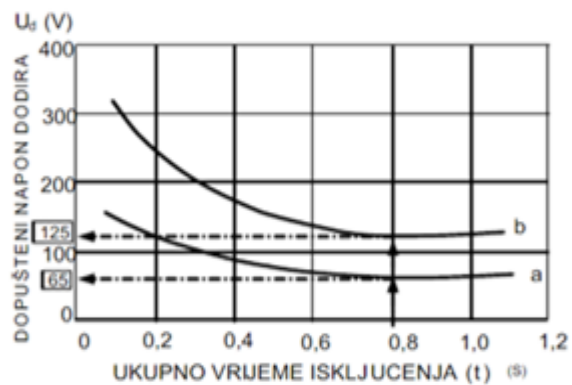
Tehničke specifikacije za elektroenergetsko postrojenje s nazivnim naponima iznad 1000 V koriste se dopuštenim naponom dodira i naponom koraka kao standardima za proračun uzemljenja.

Zaštitne ograde za visokonaponsko postrojenje trebaju biti postavljene tako da se u slučaju kvara na zemlji izvan ograde ne pojave naponi dodira ili naponi koraka veći od dopuštenih vrijednosti, koje prikazuju slike 2.2. i 2.3. koje se nalaze u nastavku. [11]



Slika 2.2.

Slika 2.2. (lijeva): Krivulja dozvoljenog napona koraka: a) od prometnica izvan ograde b) unutarnji i vanjski dio ograde bez prometnice, c) unutar ograde uz korištenje izolacijskih čizama za min. 3 kV [11]



Slika 2.3.

Slika 2.3. (desna): Krivulja dozvoljenog napona dodira: a) izvan područja ograde, b) unutar područja ograde [11]

Dogodi li se kvar u postrojenju pri zemljospoju, napon metalnih dijelova prema zemlji nikako ne smije premašiti 125 V, dok kod napona dodira ne smije premašiti iznos od 65 V.

Tablica 2.1. Sigurnosne udaljenosti zone rada pod visokim naponom te zone približavanja. [12]

Nazivni visoki napon mreže (kV)	Sigurnosna udaljenost zone rada pod visokim naponom DL (mm)	Sigurnosna udaljenost zone približavanja DV (mm)
36	380	1380
110	1000	2000
220	1600	3000
380	2500	4000

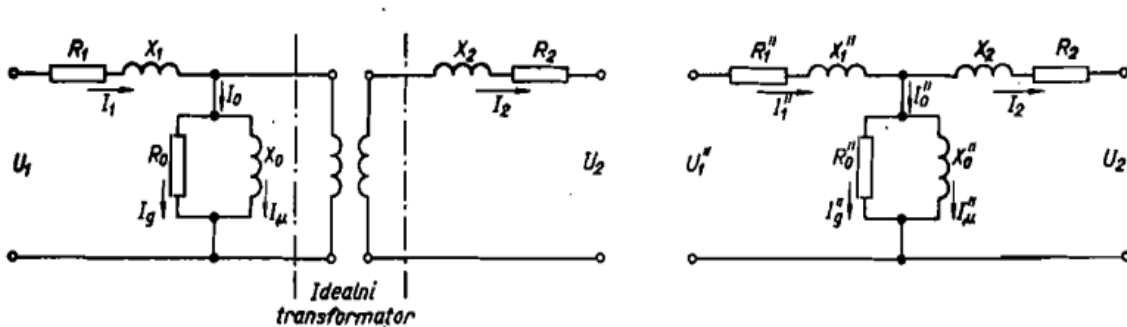
2.1. Visokonaponski naponski mjerni transformatori

Zadaća svih naponskih mjernih transformatora: moraju ispuniti to jest transformirati izmjerene napone u skoro pa konstantnom omjeru i bez faznih pomaka u vrijednosti koje odgovaraju napajanju mjernih instrumenata, kao i opremi za zaštitu i regulaciju.

Osim ovog zahtjeva, primarni i sekundarni namoti obuhvaćaju čitav magnetski tok, odnosno nemaju nikakvih rasipnih tokova. [16]

Pomoću transformatora može se jednostavno izmjeriti vrijednost napona priključenog na primarni namot istog transformatora, ukoliko se izmjeri napon na sekundarnim stezaljkama transformatora i pomnoži s omjerom broja zavoja $\frac{N_1}{N_2}$.

Na slici 2.4. prikazana je nadomjesna shema transformatora, na desnoj strani je sekundar sveden na primar.

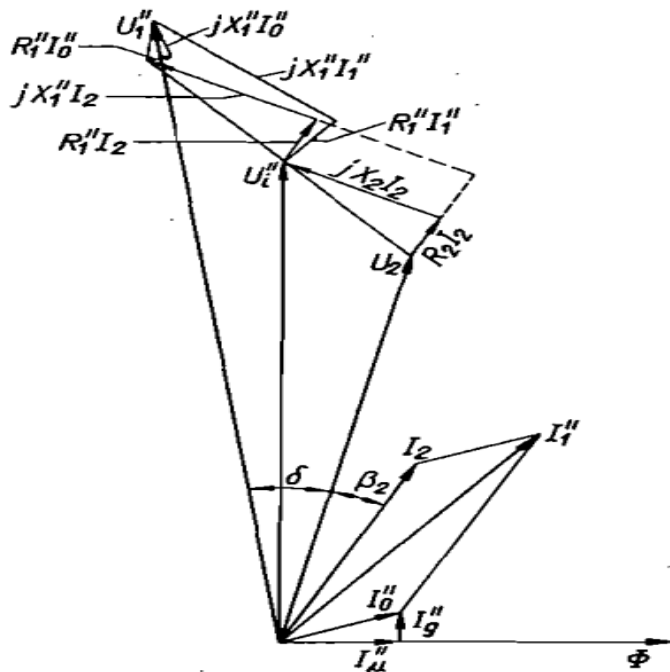


Slika 2.4.: Nadomjesna shema transformatora [1]

pri čemu je, prema [1]:

- | | |
|---|---|
| I_2 – struja sekundarnog namota, | I_g – djelatna komponenta struje magnetiziranja, |
| R_2 – djelatni otpor sekundarnog namota, | R_0 – nadomjesni otpor djelatnih gubitaka nastalih uslijed magnetiziranja jezgre, |
| X_2 – rasipna reaktancija sekundarnog kruga, | I_1 – struja primarnog namota, |
| U_2 – napon sekundara, | X_1 – rasipna reaktancija primarnog kruga, |
| U_1'' – inducirani napon (koji drži ravnotežu padovima napona), | U_1 – napon primara, |
| I_{μ} – induktivna komponenta struje magnetiziranja, | X_0 – induktivna reaktancija primarnog kruga, |
| I_0 – struja magnetiziranja, | R_1 – djelatni otpor primarnog namota. |

Vektorski dijagram naponskog transformatora prikazuje slika 2.5.



Slika 2.5.: Vektorski dijagram naponskog transformatora [1]

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

$$I_1'' = I_2 \frac{N_1}{N_2} \quad (2-3)$$

$$R_1'' = R_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (2-4)$$

$$X_1'' = X_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (2-5)$$

Iz slike 2.5. vidljivo je da između vektora napona U_1'' i U_2'' , kao i struje I_1'' i I_2'' , postoje dvije vrste razlike, odnosno pogreške: amplitudna i fazna. Fazna pogreška δ ustvari je fazna razlika između vektora primarnog napona i onog sekundarnog, iskazana u stupnjevima, tj. minutama. Iz toga se može zaključiti da će kod naponskih mjernih transformatora prevladavajući uzrok pogreškama biti padovi napona na impedancijama namota I_2 ($R_2 + jX_2$) i I_1'' ($R_1'' + jX_1''$), a kod strujnih transformatora struja magnetiziranja I_0'' .

Kod realnog transformatora vidljivo je da omjer između napona U_1 i U_2 nije jednak omjeru N_1 i N_2 , niti su naponi u U_1 i U_2 potpuno u fazi. Sve to se događa zbog pada napona izazvanih od strane

primarne struje I_1 u otporu R_1 i reaktanciji X_1 te sekundarne struje I_2 u otporu R_2 i reaktanciji X_2 . Takav će pad napona biti manji što je manje i opterećenje transformatora, tj. ukoliko se ono gotovo izjednači sa stanjem praznoga hoda.

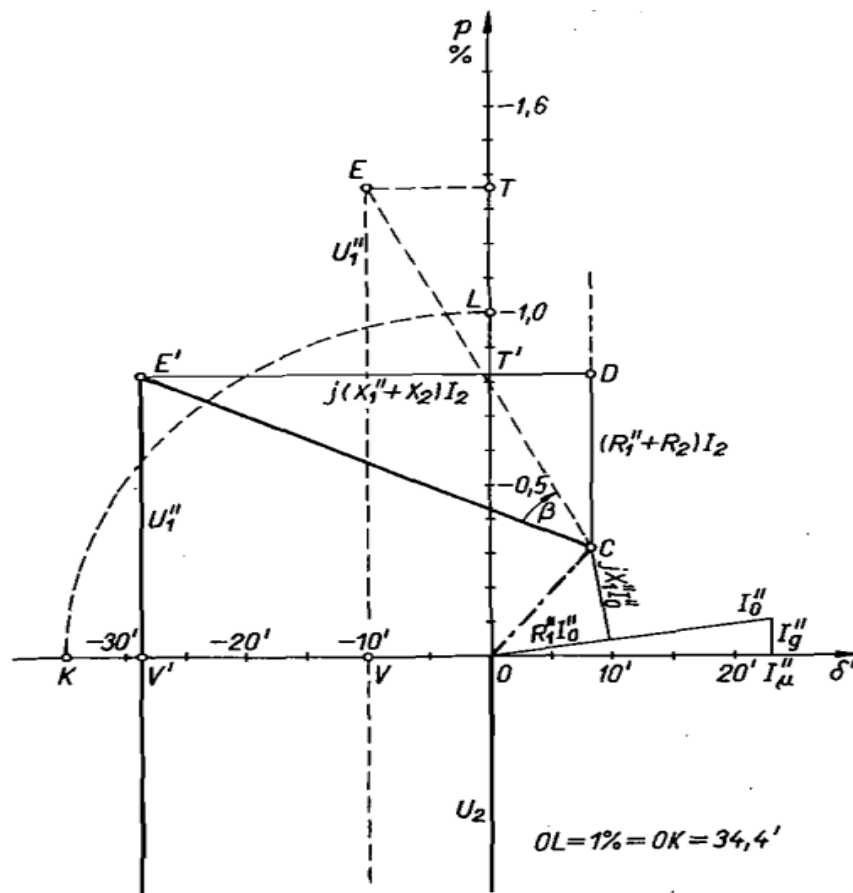
Naponski mjerni transformatori imaju određeno amplitudno i fazno prekoračenje u odnosu na nazivni omjer transformacije k_n , koji je određen omjerom broja zavoja N_1 primarnog namota prema broju zavoja N_2 sekundarnog namota [1]:

$$k_n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad (2-6)$$

Veličine U_{1n} i U_{2n} nazivne su vrijednosti primarnog, to jest sekundarnog napona i referentne su veličine pri konstrukciji i analizi pogrešaka mjernog transformatora. Relativnim odstupanjem izmjerene vrijednosti primarnog napona od njegove prave vrijednosti dobije se naponska pogreška transformatora p_u :

$$p_u = \frac{k_n U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\% \quad (2-7)$$

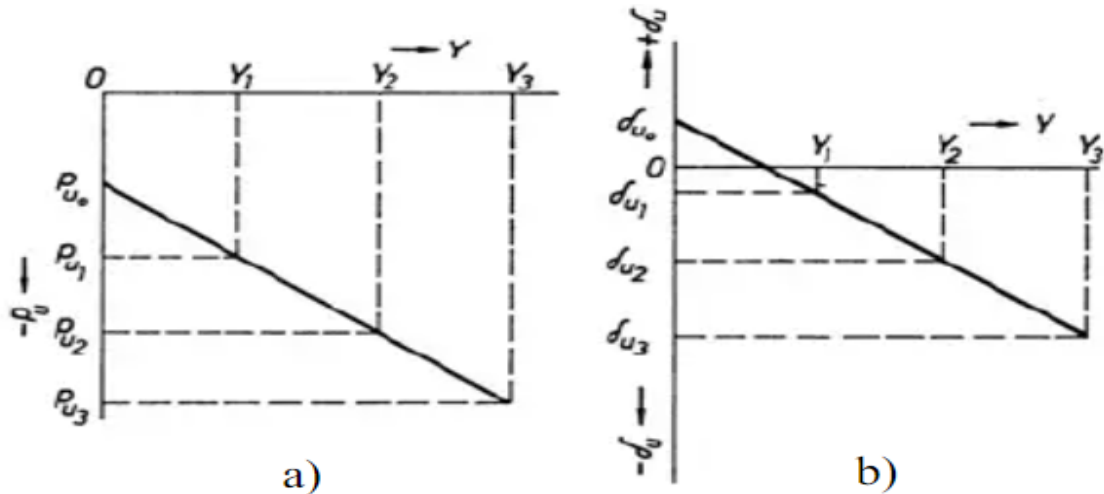
Mollinger-Geweckeov dijagram naponskog transformatora prikazan je na slici 2.6.



Slika 2.6.: Mollinger-Geweckeov dijagram naponskog transformatora [17]

Padovi napona vrlo su mali, budući da se od naponskih mjernih transformatora očekuje mala naponska i fazna pogreška. Zbog nepreglednosti koristi se Mollinger-Geweckeov dijagram, poznat kao p_U - δ dijagram, koji omogućuje i kvantitativna razmatranja, a pokazuje realne odnose kod mjernih veličina.

Ovisnost naponske pogreške p_u (a) i fazne δ (b) o opterećenju transformatora Y pri konstantnom naponu prikazuje slika 2.7.



Slika 2.7.: Ovisnost naponske p_u (a) i fazne pogreške δ (b) o opterećenju transformatora Y pri stalnom naponu [17]

Ukoliko je primarni napon konstantan, a opterećenje Y poraste (odnosno poveća se sekundarna struja I_2) naponska pogreška p_u postaje sve negativnija i bilježi linearan rast s porastom admitancije Y. Isto vrijedi i za faznu pogrešku δ – ako je teret stalan, a napon promjenjiv, proporcionalno dolazi do promjene magnetske indukcije unutar jezgre, čime se mijenja i struja magnetiziranja jezgre, odnosno mijenjaju se naponska i fazna pogreška u praznom hodu.

2.1.1. Točnost naponskih transformatora

Klasa točnosti uvijek se iskazuje brojčanom vrijednosti, a predstavlja najveću dopuštenu relativnu, tj. postotnu naponsku pogrešku. Mjerni se transformatori koriste sljedećim klasama točnosti: 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 i 3,0. Granice takvih pogrešaka za naponske transformatore prikazane su na tablici 2.2., i to prema normi HRN EN induktivni 60044-2 i kapacitivni prema HRN EN 60044-5. [1]

Tablica 2.2.1...: Granice pogrešaka za naponske transformatore za mjerenje [25]

Klasa točnosti	Pogreške	
	Naponske (%)	Fazne (%)
0.1	±0.1	±5
0.2	±0.2	±10
0.5	±0.5	±20
1	±1.0	±40
3	±3	Nisu ograničene

Tablica 2.2.1...: Granice pogrešaka za naponske transformatore za zaštitu [25]

Klasa točnosti	$\pm p_u$ [%]	$\pm \delta_u$	
		Min	crad
3P	3	120	3.5
6P	6	240	7.0

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.

Među vrijednostima nazivnog tereta uobičajene su postale sljedeće: 10, 15, 25, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500 VA. Međutim, uvijek su preporučene one vrijednosti koje su u prethodnom nizu podebljane. Osim nazivne snage, definirana je i ona granična (imajući u obziru zagrijavanje), koja je uglavnom nekoliko puta veća od spomenute nazivne.

2.2.1. Označavanje stezaljki naponskih transformatora

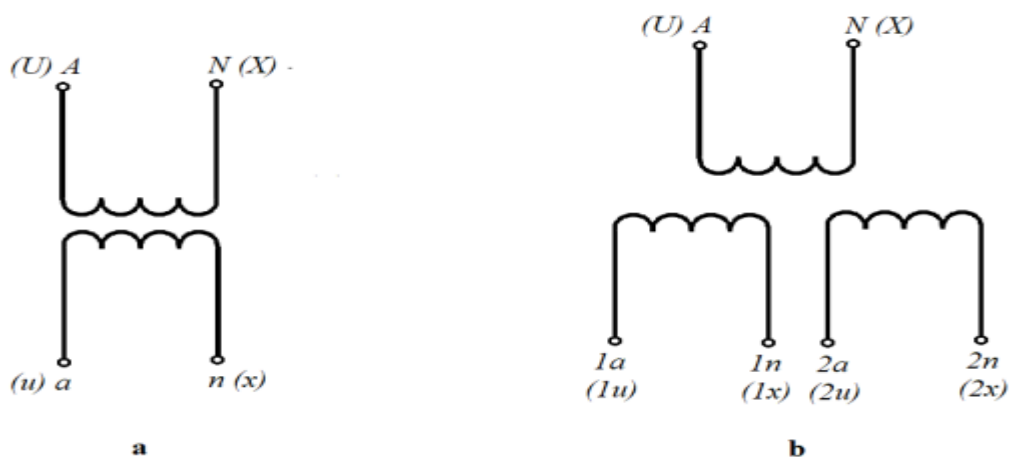
Stezaljke primarnog namota naponskih mjernih transformatora označavamo slovima A i B, ukoliko je transformator predviđen za mjerenje linijskog napona mreže. U tom slučaju je cijeli visokonaponski namot izoliran za pun ispitni napon. Sekundarne stezaljke se tada označavaju slovima a i b. Pri označavanju primarnih i sekundarnih stezaljki potrebno je paziti da primarni napon na stezaljkama A i B po polaritetu mora biti u fazi s naponom na sekundarnim stezaljkama

a i b, a apsolutno ne u protufazi. To je naročito važno kad se na sekundarne stezaljke priključuju naponske grane vatmetara, brojila i slično.

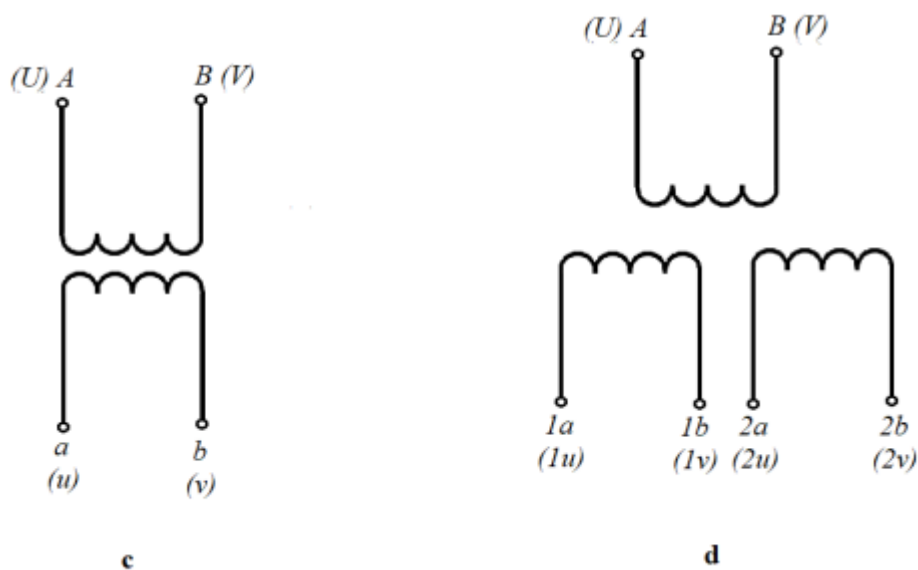
Na transformatorima koji se priključuju na fazni napon označavamo stezaljke primarnog namota slovima A i N, dok sekundarni označavamo slovima a i n. Stezaljka N je uzemljena i najčešće je znatno slabije izolirana.

Trofazne naponske mjerne transformatore označavaju se na primarnoj strani slovima A, B, C i N, odnosno slovima a, b, c i n na sekundarnoj strani.

Prikazane su sheme različitih spojeve naponskog mjernog transformatora prema Tehničkom priručniku Končar Oznake u zagradama su prema normi IEC 186/87.



Slika 2.8.: - jednopolno izolirani jednofazni naponski transformator s jednim sekundarnim namotom, b - jednofazni naponski transformator s dva sekundarna namota [29]



Slika 2.9. c – jednopolno izolirani naponski mjerni transformator s jednim sekundarnim namotom, d - jednopolno izolirani naponski mjerni transformator s dva sekundarna namota [29]

2.2.2. Izvedbe naponskih transformatora

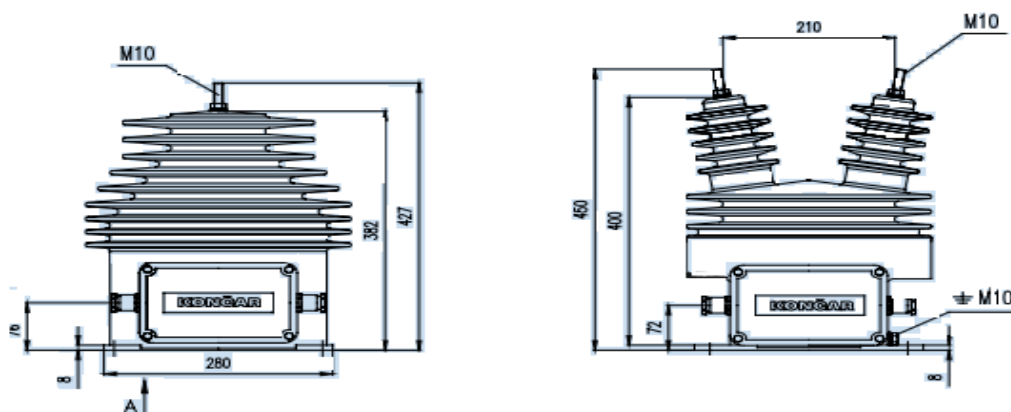
Može se zaključiti kako će do opadanja naponskih i faznih pogrešaka transformatora doći uslijed smanjivanja djelatnoga otpora, kao i rasipnih reaktancija obaju namota, čime se dobiju osnovne upute za proračun i konstrukciju mjernoga transformatora.

Ako je presjek žice povećan, a broj zavoja smanjen, djelatni je otpor onda smanjen, što rezultira povećanjem presjeka jezgre. Kako bi se smanjile rasipne reaktancije, također valja smanjiti broj zavoja, smanjiti razmake između namota i povećati samu duljinu namota. Struja magnetiziranja izaziva pogrešku, zbog čega valja pripaziti da odabrana magnetska indukcija unutar željeza ne bude previsoka.

Izvedba je naponskih mjernih transformatora pod velikim je utjecajem pogonskog napona, dok se za niske napone koriste suhe izvedbe. [1]

Kod pogonskih napona koji iznose do 38 kV, valja se koristiti izvedbama s epoksidnim smolama. Kod takvih transformatora smola služi i kao izolacija među namotima te sekundaru i jezgri.

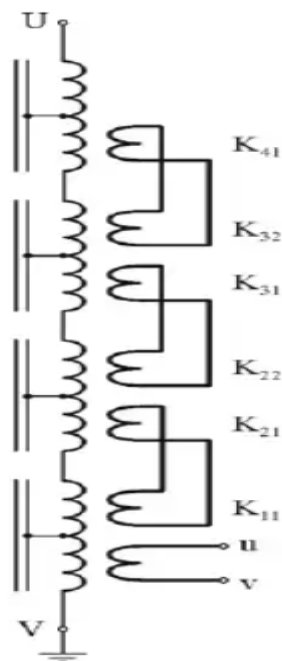
Epoksidni jedнопolno izolirani VPV1-38 (na lijevoj strani slike), kao i dvopolno izolirani VPV-24 (na desnoj strani slike) naponski transformator proizvodnje tvrtke Končar, prikazani su na slici 2.10.



Slika 2.10.: Epoksidni jedнопolno izolirani VPV1-38 (lijevo) i dvopolno izolirani VPV-24 (desno) naponski transformator proizvodnje tvrtke Končar [10]

Uljne se izvedbe koriste kod napona u iznosu od nekoliko tisuća volti do nekih najviših vrijednosti. Kod uljnih se izvedbi jezgra s primarom i sekundarom nalazi u kotlu s transformatorskim uljem. Postoje i naponski mjerni transformatori s otvorenom jezgrom koja ima oblik stupa, a najčešće je izrađena od radijalno složenih limova. Ovakvi se izolatori koriste zbog toga što znatno smanjuju dimenzije transformatora, a zbog malog se promjera jezgre smještaju u izolator od porculana. Sama izolacija primarnog namota za napone vrlo visokih vrijednosti dovodi do velikih poteškoća, zbog čega troškovi njegove izolacije prelaze sve ostale troškove. Kaskadni naponski transformatori sastoje se od nekoliko transformatora koji su međusobno povezani. Primarni namoti transformatora spojeni su i tvore seriju, a sredina je njegovog namota vezana uz jezgru istog transformatora. Ovakav način spajanja dovodi do potencijalne razlike između jezgri transformatora.

Na slici 2.11. shemizirano je spajanje kompenzacijskih namota kod kaskadnog naponskog transformatora, i to u četiri segmenta.



Slika 2.11.: Shema spajanja kompenzacijskih namota u kaskadnom naponskom transformatoru u četiri sekcije [17]

2.2.3. Induktivna djelila

Induktivna djelila vrsta su naponskih transformatora koji imaju odvojke zaslužne za poprilično točnu raspodjelu priključenog napona. Moguća je pojava manjeg odstupanja, zbog čega djelatnu komponentu struje magnetiziranja valja učiniti što manjom. Zahvaljujući pažljivoj izvedbi i jezgri napravljenoj od odličnog magnetskog materijala, dolazi se do pogreške koja je manja od 0,00001 %.

Oko same jezgre nalazi se deset omotanih vodiča koji imaju identičan presjek, svi su međusobno isprepleteni i vrlo su dobre magnetske vodljivosti. Vodiči su međusobno spojeni u seriji, dok su im se odvojci smjestili na spojnim mjestima. Sve to uzrok je ostvarenju gotovo jednakog magnetskog toka na svim mjestima, a k tome je i napon U_d približno savršen. Imajući takva izuzetna svojstva, induktivna djelila danas nalaze sve širu primjenu, a naročito u situacijama u kojima postoji potreba za poprilično točnim mjerenjem omjera napona. [1]

$$\text{Izraz } U_1 = 10U_d \cdot I_g \cdot (R_s + R_z) \quad (2-8)$$

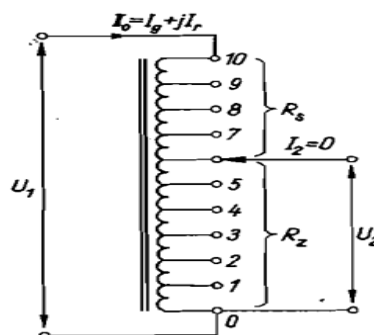
$$U_2 = n \cdot U_d + (I_g R_z) \quad (2-9)$$

Nadalje, formula glasi:

$$p_n = \frac{(nU_d + I_g R_z)10}{n} - \frac{10U_d - I_g(R_s + R_z)}{V_1} \cdot 100\% \quad (2-10)$$

$$P_n = \frac{I_g}{U_1} \left(\frac{10 - n}{\sqrt{n \times R_z - R_s}} \right) \cdot 100\% \quad (2-11)$$

Na slici 2.10. prikazana je shema jedne dekade induktivnog dijelila.

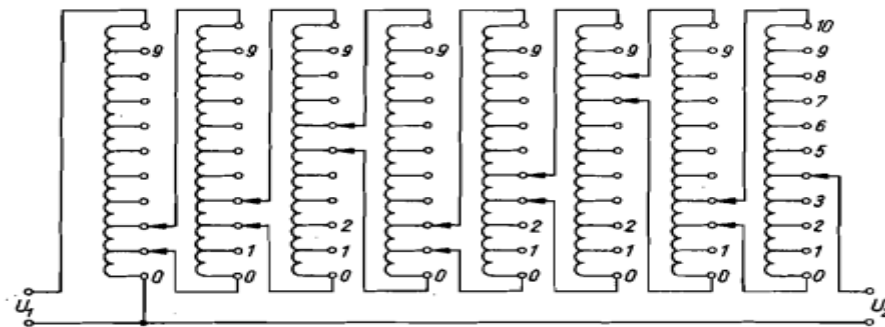


Slika 2.10.: Shematizirana dekada induktivnog dijelila [1]

Ukoliko je otpor dionica jednak i iznosi R_d , bit će : $R_z = n R_d$ i $R_s = (10 - n) R_d$, pa time posljedično dobivamo $p_n = 0$. Isto se ostvaruje od ovakve izvedbe u velikoj mjeri zbog toga što je u svim vodičima duljina, presjek, temperatura i otpornost žice iste vrijednosti. Veoma mala odstupanja se ne mogu izbjeći te je zbog toga poželjno da se u djelatnoj komponenti struje materijala postiže greška manja od 0,000 01 %. Ukoliko bismo spojili više ovakvih djelila na način kao kod kompozatora po Kelvin - Varleyu može se namjestiti omjer napona čak na osam mjesta (slika 2.11). Na taj način će svaka dekada opterećivati prethodnu, ali to opterećenje će uzrokovati samo malu dodatnu pogrešku. Uzrok tome je veoma velika ulazna impedancija pojedine dekade (otprilike 1 M(Ω) i paralelno 40 H) te njihova mala izlazna impedancija (oko 0,1 Ω i 1 Ω H). Pri višim frekvencijama ćemo uvidjeti utjecaj kapacitivnih struja koje teku između različiti dionica.

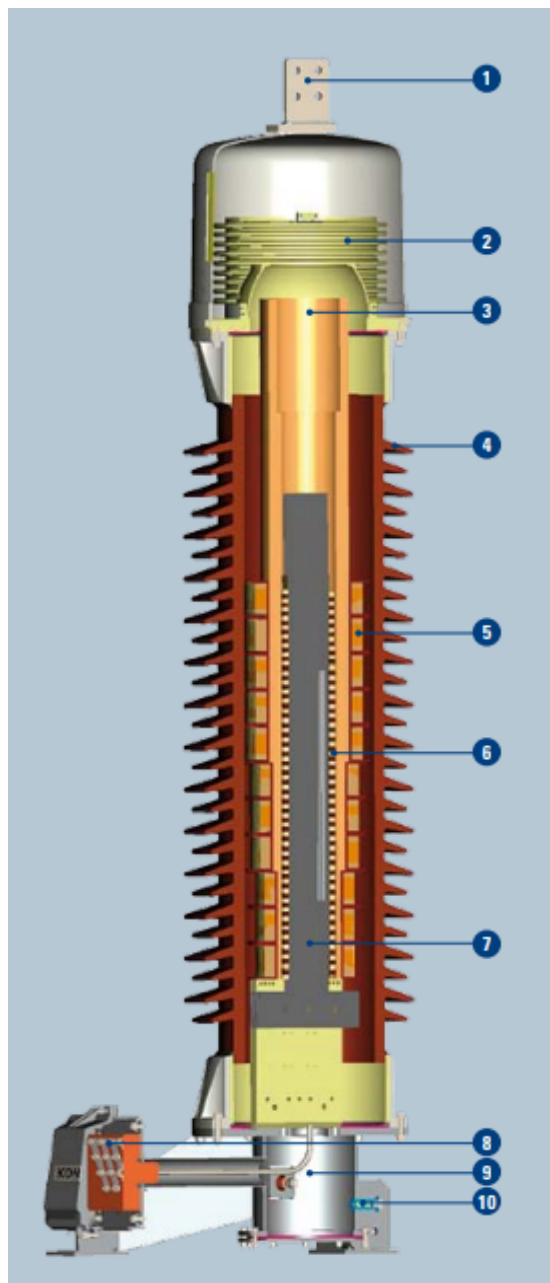
Izvanredna točnost se može postići posebnim izvedbama i pri frekvenciji od npr. 1 MH, te se taj utjecaj posljedično smanjuje. Ondje gdje je potrebno vrlo točno mjerenje omjera napona ovakva djelila pronalaze sve opsežniju primjenu.

Induktivno dijelilo sastavljeno od osam dekada prikazano je na slici 2.11.



Slika 2.11.: Induktivno dijelilo od osam dekada u Kelvin-Varleyevom spoju
(namještena vrijednost $U_2/U_1 = 0,12513724$) [1]

Na slici 2.13. [4] prikazan je induktivni visokonaponski mjerni transformator.



- 1 – primarni priključak,
- 2 – metalna membrana / indikator razine ulja,
- 3 – glavna izolacija,
- 4 – porculanski/kompozitni namot,
- 5 – primarni namot,
- 6 – sekundarni namot,
- 7 – magnetska jezgra otvorenog tipa,
- 8 – sekundarna kutija sa sekundarnim priključcima,
- 9 – kućište,
- 10 – ventil za ulje.

Slika 2.13.: Induktivni visokonaponski naponski mjerni transformator. [4]

2.2.4. Kapacitivni naponski mjerni transformatori

Umjesto induktivnih transformatora, nekad se pri mjerenju visokih napona koriste i kapacitivni naponski transformatori. Kapacitivni naponski transformatori služe za mjerenje visokih napona, od 150 kV prema gore. Smještaj kondenzatora obično je u porculanskom izolatoru ispunjenim uljem, dok su se pomoćni transformator T_p , kao i prigušnica, smjestili u postolju tog transformatora. [1]

Kad se govori o visokonaponskom kondenzatoru kapaciteta C_1 , riječ je o njegovom glavnom dijelu, koji s kondenzatorom tvori seriju s mnogo većim kapacitetom C_2 . Napon U_1 veže se sa serijskom kombinacijom kapaciteta C_1 i C_2 , dok je napon U_2 spojen na kapacitet C_2 .

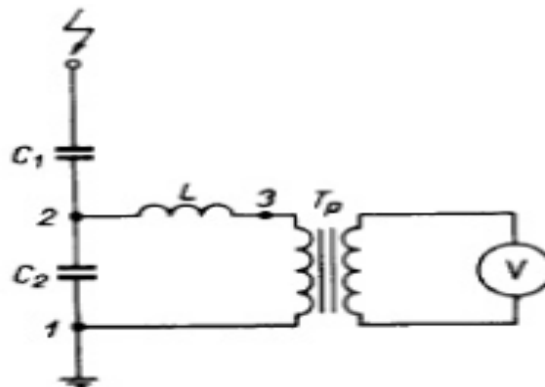
Pritom, odnos je napona i kapaciteta jednak sljedećem:

$$U_1: U_2 = \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}\right) : \left(\frac{1}{c_2}\right) \quad (2-12)$$

Ako se priključe i sljedeći parametri:

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\left(1 + \frac{c_{12}}{c_2} + \frac{1}{Rc_1\omega^2}\right)} \quad (2-13)$$

Na slici 2.14. prikazana je shema jednog takvog kapacitivnog naponskog transformatora.



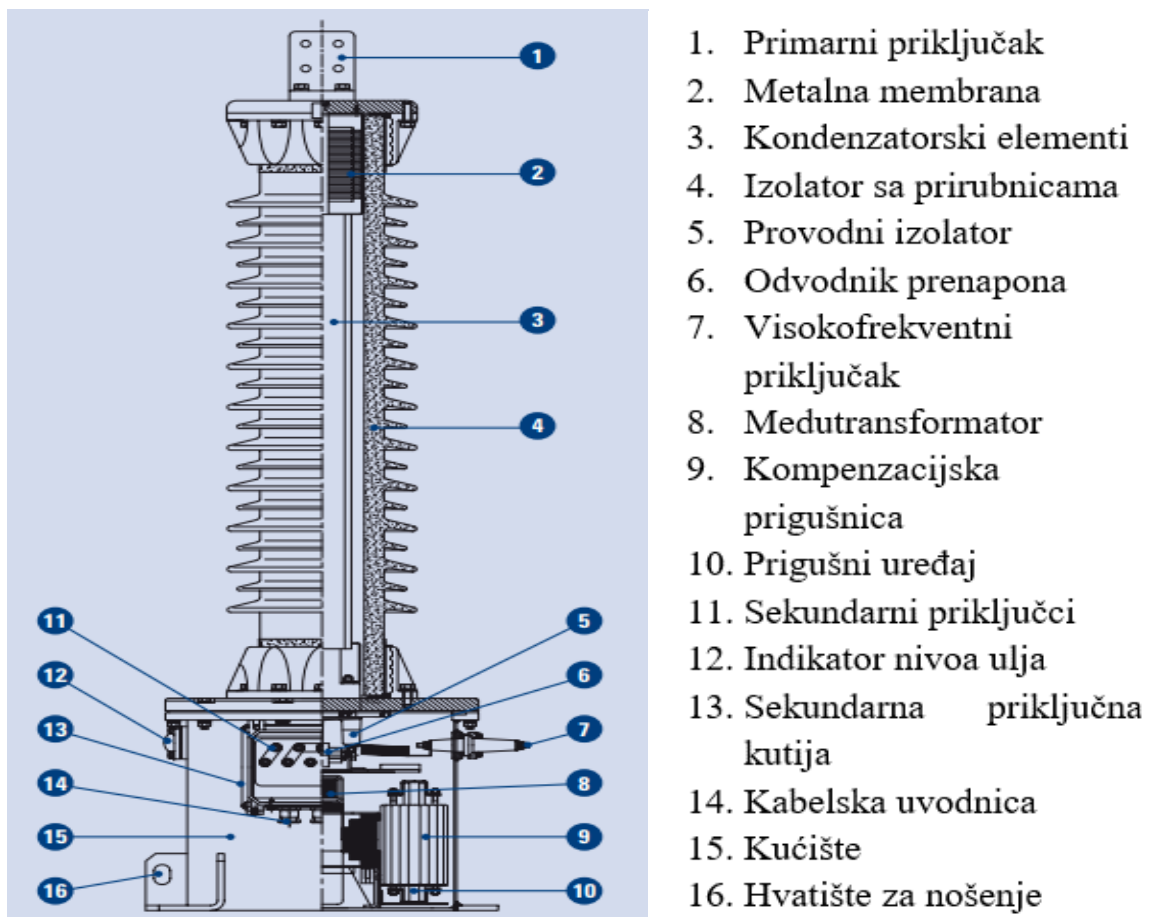
Slika 2.14.: Shema kapacitivnog naponskog transformatora [1]

Što se potrošnje tiče, kako bi bilo što jeftinije, kondenzator C_2 treba se smanjiti, napon povećati kod U_2 , a mjerni se instrumenti spajaju s mjernim transformatorom T_p . Upravo zbog već navedenih stvari, dolazi do povećanja prividne snage na kapacitetu C_1 . Ako se još doda svitak inuktiviteta pred transformatorom T_p [1]:

$$Z_u = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)} \quad (2-14)$$

$$L_\omega = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)} \quad (2-15)$$

Kapacitivni visokonaponski transformator prikazan je na slici 2.15.



Slika 2.15.: Kapacitivni visokonaponski transformator [3]

2.3. Visokonaponski strujni mjerni transformatori

Strujni se transformatori koriste u svrhu mjerenja struje u strujnom krugu. Prevelika struja razlog je zašto nije dopušten izravni priključak mjernih instrumenata, čime se nastoji što vjernije, uz konstantan omjer i sa što manjim faznim pomakom, pretvoriti izmjerenu struju u izmjerenu vrijednost prikladnu za uobičajene metode mjerenja malih struja. U visokonaponskim mrežama strujni se mjerni transformatori koriste i za izolaciju mjernih instrumenata od visokih napona.

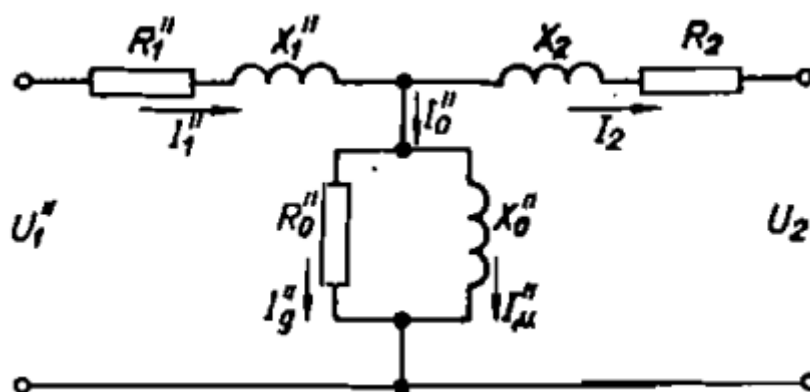
„Nazivni omjer transformacije K_n strujnog transformatora definiran je omjerom njegove nazivne primarne struje I_{1n} i njegove nazivne sekundarne struje I_{2n} , odnosno definiran je omjerom broja zavoja sekundara N_2 i primarnog namota N_1 “. [1]

U radu se strujni transformator približava idealnom transformatoru, s primarnim amper-zavojima jednakim sekundarnim amper-zavojima:

$$K_n = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2-16)$$

Nadomjesna shema strujnog mjernog transformatora ista je kao i kod naponskog transformatora, dok realni transformator prikazuje kako postoji neslaganje u odnosu primarne i sekundarne struje.

Taj je rad objašnjen preko nadomjesne sheme realnog transformatora koju se može vidjeti na slici 2.16.



Slika 2.16.: Nadomjesna shema - realni transformator [1]

Pri čemu je prema izvoru [1]:

I_2 – struja sekundarnog namota,

R_2 – djelatni otpor sekundarnog namota,

X_2 – rasipna reaktancija sekundarnog kruga,

U_2 – napon sekundara,

U_i'' – inducirani napon (koji drži ravnotežu padovima napona),

I_μ – induktivna komponenta struje magnetiziranja,

I_0 – struja magnetiziranja,

I_g – djelatna komponenta struje magnetiziranja,

R_0 – nadomjesni otpor djelatnih gubitaka nastalih uslijed magnetiziranja jezgre,

I_1 – struja primarnog namota,

X_1 – rasipna reaktancija primarnog kruga,

U_1 – napon primara,

X_0 – induktivna reaktancija primarnog kruga,

R_1 – djelatni otpor primarnog namota.

[1]

Kako bi se uzbudna struja smanjila, strujni se transformatori uglavnom koriste željeznim jezgrama izrađenim od magnetskih materijala s visokom magnetskom permeabilnošću, i to nižeg intenziteta magnetske indukcije. Upravo zbog toga, otpor priključenog opterećenja ne prelazi određenu vrijednost, koja je obično niska.

Ukoliko bi se dogodilo da su stezaljke na strujnom transformatoru nekim slučajem ostale otvorene, koristilo bi ih se kao primarnu struju za magnetiziranje željeza, čime bi došlo do njegova krajnjeg zasićenja, a tako i do visokog napona na sekundarnom namotu koji može životno ugroziti čovjeka. Zbog visoke indukcije u željezu dolazi do velikih gubitaka što rezultira pretjeranim zagrijavanjem. Sekundarne stezaljke strujnog transformatora uvijek u pogonu moraju biti zatvorene. Pri odspajanju instrumenta potrebno je prethodno kratko spojiti sekundarne priključke. [17]

Slično kao što je to bilo u vezi s naponskim transformatorima, postotna strujna pogreška P_i može se definirati ovako:

$$P_i = \frac{k_n I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100\% \quad (2-17)$$

sekundarnoj struji uzrokuje promjenu indukcije u jezgri. Ona utječe na struju magnetiziranja zbog magnetske propusnosti materijala, a njezin se nagli pad odvija pri vrlo niskoj indukciji u blizini ishodišta BH-karakteristike jezgre. Kada je struja znatno niža od nazivne struje, struja se magnetiziranja brzo povećava, jednako kao i strujna i fazna pogreška. Približavanjem struje nazivnoj vrijednosti, i to zbog porasta napona na jezgri, pogreške se postepeno smanjuju. Pri rasterećenom strujnom transformatoru sekundarnim namotom ne prolazi struja, zbog čega je cijela primarna struja zapravo i struja magnetiziranja jezgre. [17]

2.3.1. Točnost

Strujni transformatori podijeljeni su u 6 razina točnosti: razina 0.1; 0.2; 0.5; 1; 3 i 5. Za svaku oznaku stupnja točnosti vrijedi da je jednako s apsolutnom vrijednošću granice takve strujne pogreške (izraženo u postocima) pod nazivnim opterećenjem i nazivnom strujom. Tip mjernog transformatora ispituje se prema hrvatskoj normi HRN EN 60044-1. Kod strujnih transformatora induktivni naponski transformatori odgovaraju normi HRN EN 60044-2, kombinirani transformatori odgovaraju međunarodnoj normi IEC 60044-3, a kapacitivni naponski transformatori odgovaraju normi IEC 60044-5, odnosno odgovarajućim hrvatskim normama i propisima. [1]

Tablica 2.3.2.: Granica pogreške strujnih mjernog transformatora za mjerenje. [1]

Klasa točnosti	± granica strujne pogreške u % pri (0,05 In) (0,2 In) (1,0In) (1,2In)	± granica fazne pogreške u minutama pri (0,05 In) (0,2 In) (1,0 In) (1,2In)
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 – 1,2) In: 3,0	Nisu pod ograničenjem
5	(0,5 – 1,2) In: 5,0	Nisu pod ograničenjem

Tablica 2.3.1.: Granice pogrešaka strujnih mjernih transformatora za zaštitu [1]

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

Označena klasa točnosti u skladu je s postotnom granicom strujne pogreške (izraženo u postocima) nazivnog opterećenja i pod nazivnom strujom. Standardizirane su još i klase točnosti 0,2s i 0,5s za specijalnu namjenu (priključkom električnih brojila).

Razine točnosti strujne i fazne pogreške transformatora jesu 0,1, 0,2, 0,5 i 1, a kada nose opterećenja između 25 i 100 % nazivnog opterećenja, ne smiju premašiti vrijednosti prikazane u tablici 2.3. Nazivno opterećenje strujnog mjernog transformatora može se izraziti u voltamperima. Definirano je pet nazivnih vrijednosti snage P_n :

$$(2.5), (5), (10), (15), (30) \text{ [VA]}.$$

Između ostalog, standardizirano je i 10 nazivnih vrijednosti primarne struje I_{1n} :

$$(10), (12,5), (15), (20), (25), (30), (40), (50), (60), (75) \text{ [A]};$$

točnije, radi se o njihovim dekadskim višekratnicima ili omjerima između kojih je preporučeno korištenje podebljane vrijednosti.

Normirana nazivna vrijednost sekundarne struje I_{2n} jest 1A i 5A, a uzima se u obzir i vrijednost 2A kao dopuštena iznimka. Nazivni teret izražava se u voltamperima koji se dobije:

$$P_t = I_{2n}^2 Z_n \quad \text{[V/A]} \quad (2-19)$$

pri čemu Z_n prikazuje nazivnu impedanciju opterećenja, a I_{2n} prikazuje nazivnu sekundarnu struju. Nazivna snaga strujnog transformatora koji se koristi za mjerenje i standardne vrijednosti impedancije koje odgovaraju nazivnoj struji 1A i 5A prikazana je u tablici 2.4. [16]

Tablica 2.4.: Standardne vrijednosti nazivne snage i impedancija opterećenja strujnih mjernih transformatora [16]

Nazivna snaga (VA)	2,5	5	10	15	30
Nazivna impedancija tijekom nazivne struje 5A (Ω)	0,1	0,2	0,4	0,6	1,2
Nazivna impedancija tijekom nazivne struje 1A (Ω)	2,5	5	10	15	30

Ukoliko impedancija opterećenja transformatora s klasom točnosti koja iznosi između 0,1 i 1 ne dosegne četvrti dio nazivne vrijednosti (odnosno 25 %), preporučeno je spajanje odgovarajućeg otpornika seriji za opterećenje transformatora s opterećenjem koje zadovoljava propisanu granicu pogrešaka. [16]

2.3.2. Termička i dinamička struja strujnog mjernog transformatora

S obzirom na to da transformatori podnose mehaničke i toplinske struje kratkog spoja u mreži, trebaju imati odgovarajući presjek namota i biti dobro pričvršćeni. Najveća struja koja može proteći transformatorom ovisi o intenzitetu izvora, a ne o intenzitetu potrošača koji taj transformator mjeri. Transformatorima male nazivne struje omogućeno je izlaganje vrlo visokim strujama kratkog spoja. Utiskani su podaci na pločici o dinamičkoj i termičkoj struji koju može izdržati. Nazivnu kratkotrajnu toplinsku struju (I_{th}) opisuje se kao efektivnu vrijednost primarne struje koju transformator može izdržati unutar jedne sekunde kad je sekundarni namot u kratkom spoju. Nazivna dinamička struja (I_{dyn}) definirana je kao maksimalna vrijednost primarne struje s

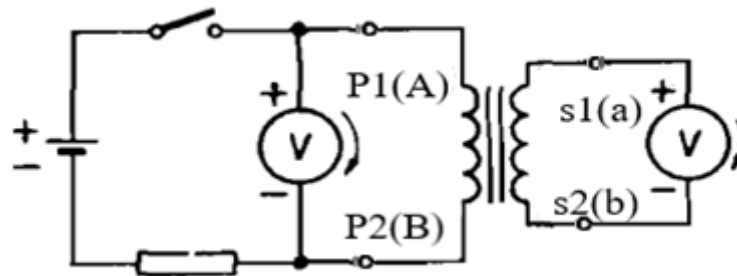
kojom transformator može raspolagati bez električnog ili mehaničkog oštećenja uslijed elektromagnetskog naprežanja u slučaju kratkog spoja u sekundarnom namotu. [1]

Formulom za presjek transformator može biti zaštićen:

$$S = I_{th} / \alpha \quad \text{Bakar } \alpha = 180 \text{ [A/mm}^2\text{]} \quad \text{Aluminij } \alpha = 118 \text{ [A/mm}^2\text{]} \quad (2-20)$$

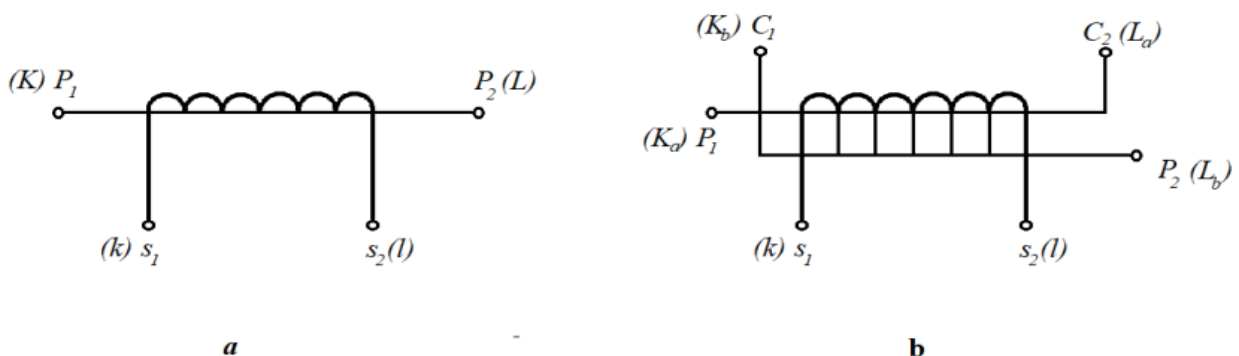
2.3.3. Označavanje stezaljki strujnih transformatora

Kod prvog se namota strujnog transformatora stezaljke označavaju s P_1 i P_2 , dok su na drugom označene sa s_1 i s_2 . Provjera oznaka stezaljki na mjernom transformatoru prikazano je na slici 2.19.

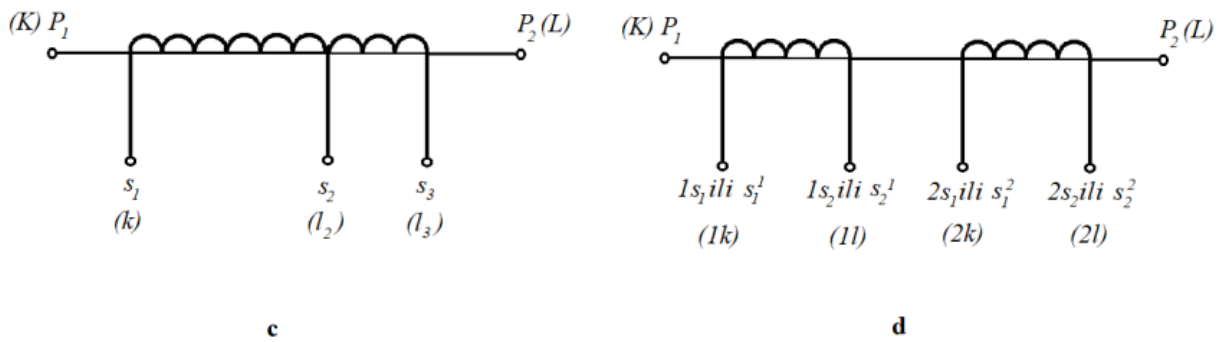


Slika 2.19.: Provjeravanje oznaka stezaljki mjernog transformatora [29]

Kao i kod stezaljki naponskih mjernih transformatora tako i stezaljke strujnog mjernog transformatora isto tako označava se velikim i malim slovima. Slova P1, P2, C1 i C2 su velika i koriste se za stezaljke na primarnoj strani strujnog mjernog transformatora, dok za sekundarne stezaljke koristimo uz brojke i to s1, s2 i s3 mala slova.



Slika [2.20]. a – strujni mjerni transformator s jednom jezgrom, b – strujni mjerni transformator s jednom jezgrom prespojiv na primarnoj strani (serijski i paralelno) [29]



Slika [2.21]. c-strujni mjerni transformator s dvije ili više jezgara i namotom s odvojcima na sekundarnoj strani, d - strujni mjerni transformator s dvije ili više jezgara, gdje priključci sekundarnog namota nose broj pripadne jezgre [29]

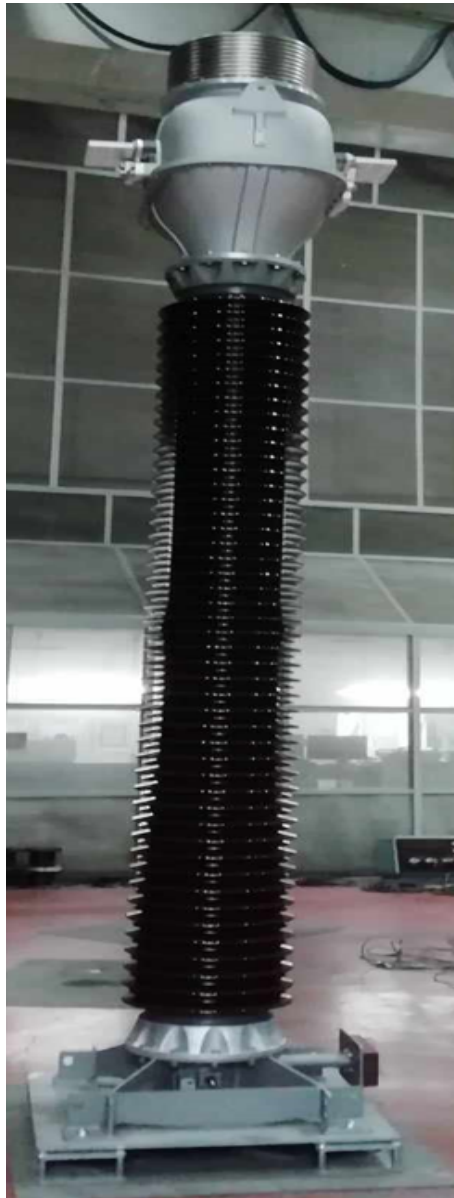
U slučaju da su stezaljke na pravilan način označene, može ih se koristiti kod mjernih transformatora sa spojenim varmetrima, vatmetrima i sl. Oznaka se može ispitati istosmjernim vatmetrom i istosmjernim naponom, a tome pomaže preklopka pomoću koje se pozitivni pol izvora priključi na stezaljku P_2 . Na sekundarnom se namotu nalaze stezaljke, a na njih valja priključiti istosmjerni voltmetar, pri čemu je stezaljka s_1 pozitivne, a druga, stezaljka s_2 , negativne naravi. Isključenjem preklopke unutar jezgre kreira se magnetski tok, čime dolazi do induciranja napona koji zatim ide u smjeru primarnog i sekundarnog namota. Onda vatmetar i na sekundaru dobije otklon vrlo kratkog trajanja, ali pozitivne naravi. U slučaju da bude negativne naravi, može se zaključiti da je transformator neispravno označen, zbog čega treba zamijeniti stezaljke ili dovod.

[1]

2.3.4. Izvedbe strujnih mjernih transformatora

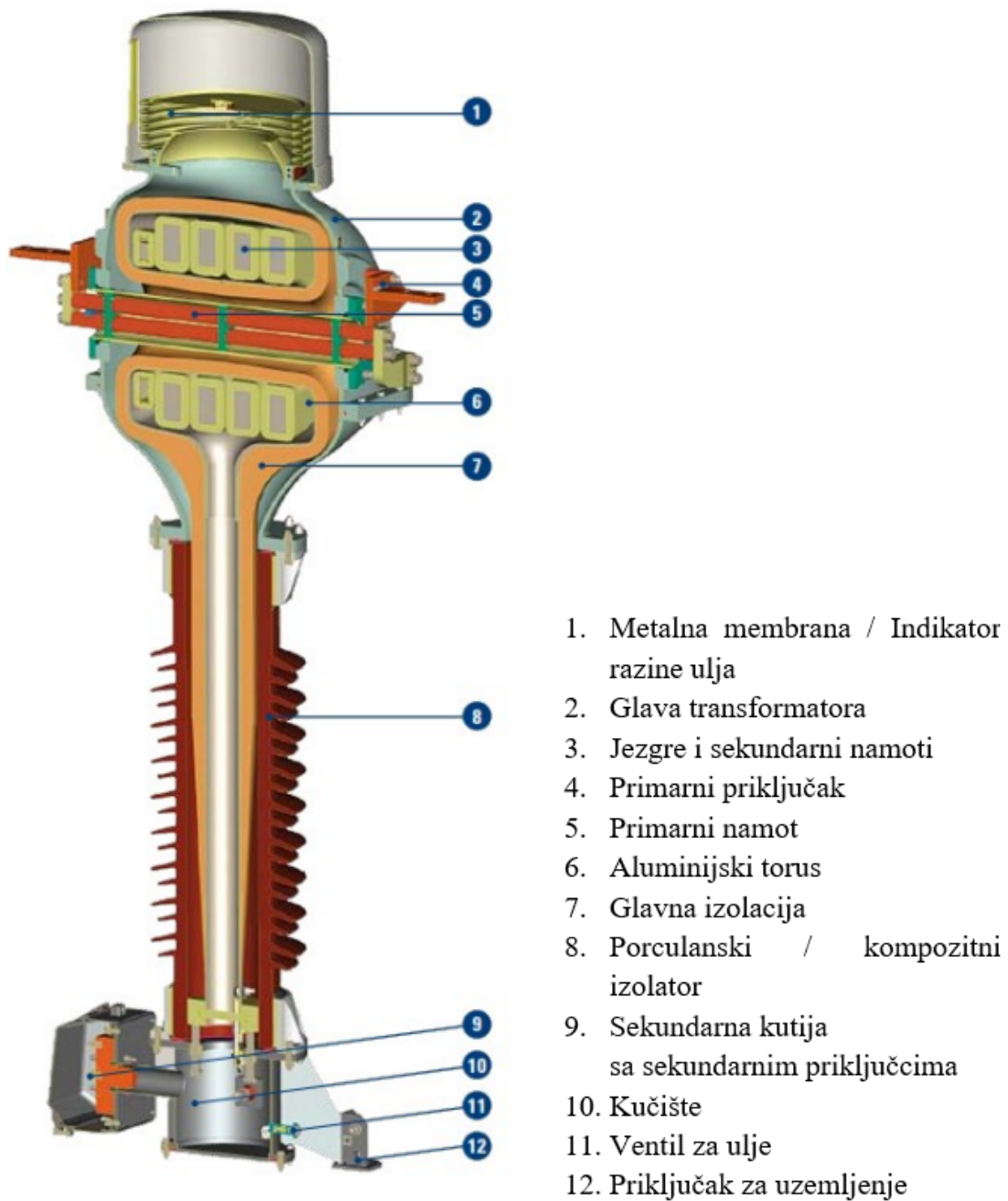
Velik je izbor rješenja izvedbi za mjerne transformatore, ovisno o primjeni, primarnoj struji i radnom naponu (pogonskom naponu). Kod laboratorijskih mjerenja valja se koristiti transformatorima koji se sastoje od više strujnih područja koja se mogu odabrati priključivanjem na točne stezaljke transformatora. Kod nekih se izvedbi može pronaći sklopka koja omogućava promjenu mjernog raspona i pri opterećenju. Kod mjerenja velikih struja jedan se vodič provlači kroz otvor na transformatoru, umjesto da se upotrijebe stezaljke. Niskonaponski strujni transformator i obični niskonaponski transformator izvedbeno se ne razlikuju. Današnji su transformatori takvih izvedbi da su im primarni namoti zaliveni epoksidnom smolom i tako izolirani, dok su prije korišteni porculanski izolatori. Transformatori za više napone redovno su uljni. Jezgra i namoti nalaze se u kotlu ispunjenim uljem, a izolirani su papirom. Strujna se kliješta koriste za kontrolna mjerenja; ustvari, ona i omogućavaju mjerenje bez da se strujni krug prekine. Dovoljno dugačke ručke od izolacijskog materijala omogućuju sigurno mjerenje. Pomoću Etalonskih strujnih transformatora može se vrlo precizno mjeriti struja. Oni se koriste ako je potrebno odrediti pogreške preciznih mjernih transformatora. Kako se transformatori koriste i u visokofrekventnim područjima, treba voditi računa o vrtložnim strujama u limovima jezgre koje dovode do potiskivanja magnetskog toka. [\[1\]](#)

Strujni mjerni transformator tvornice Končar prikazan je na slici 2.20.



Slika 2.20.: Strujni mjerni transformator tvornice Končar.

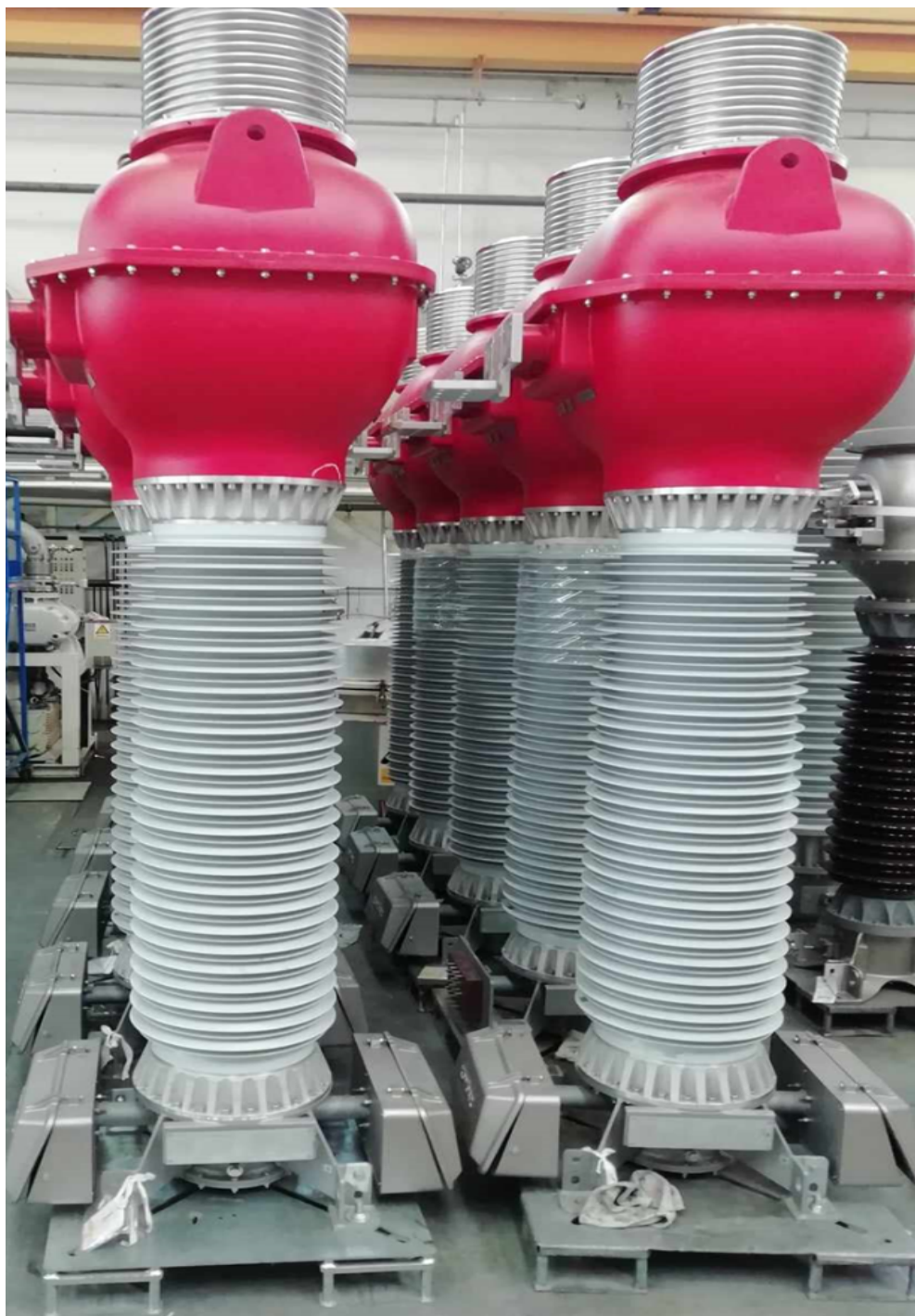
Presjek strujnog transformatora tip AGU (Končar) prikazuje slika 2.21.



Slika 2.21.: Presjek strujnog transformatora tip AGU (Končar) [19]

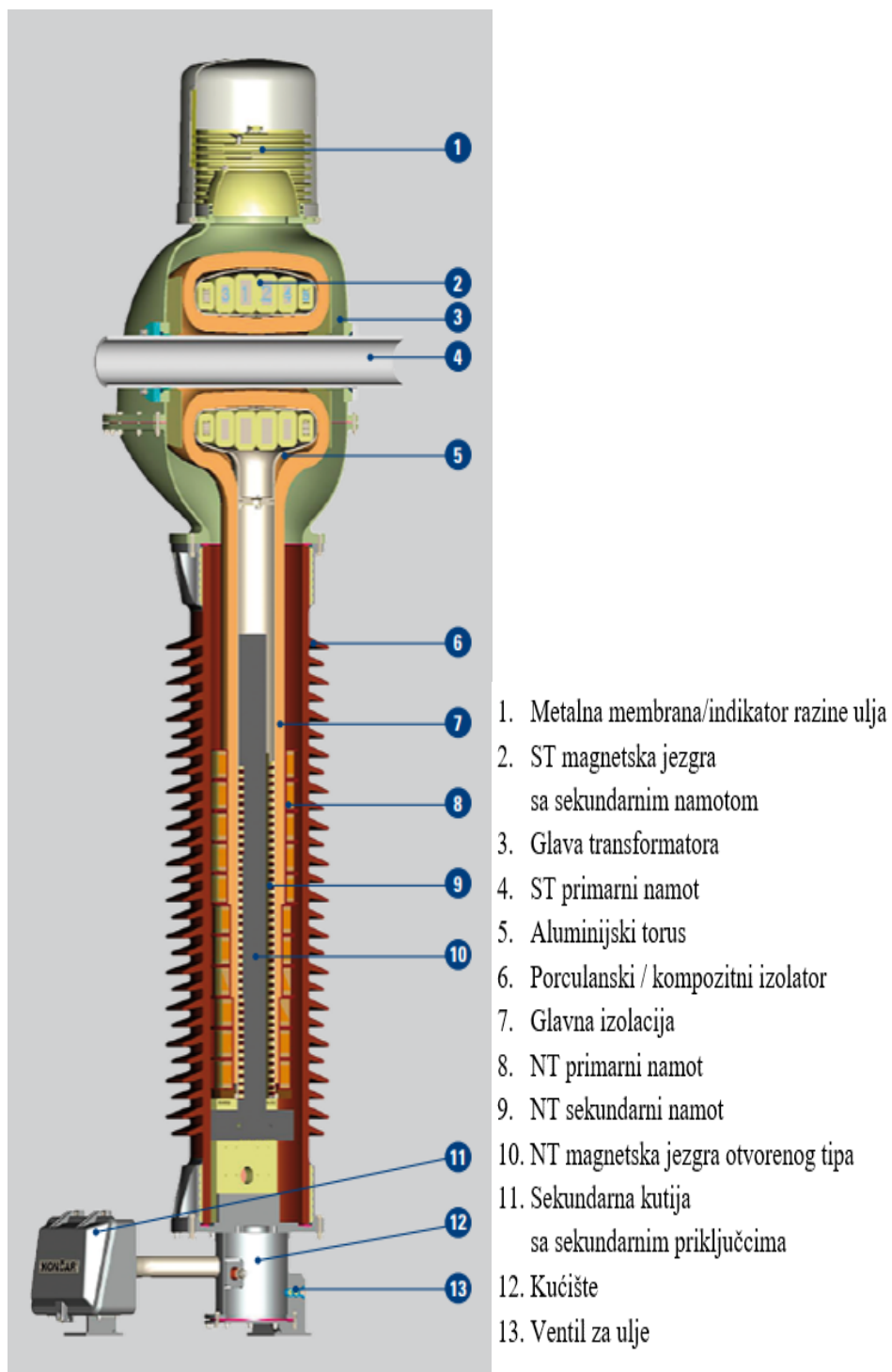
2.3.5. Kombinirani mjerni transformatori

Kombinirani mjerni transformator može se vidjeti na slici 2.22.



Slika 2.22.: Kombinirani mjerni transformator tvornice Končar

Presjek kombiniranog mjernog transformatora prikazan je na slici 2.23.



Slika 2.23.: Presjek kombiniranog mjernog transformatora [20]

Kombinirani transformatori posjeduju brojne prednosti u usporedbi s ostalim transformatorima. Prije svega, zauzimaju poprilično malo mjesta, naročito ako se u unutrašnjost potporne cijevi koja nosi aktivni dio strujnog mjernog transformatora dobro smjeste otvorena magnetska jezgra i sekundarni namot naponskog transformatora. Također, kod naponskih mjernih transformatora nije potrebno kućište, budući da se primarni namot raspoređuje prema visini potpornog izolatora, što dodatno pojednostavljuje razdjeljivanje potencijala po visini transformatora. Isto tako, smještaj jezgre i namota naponskog transformatora u unutrašnjost naponskog transformatora dovodi do ravnomjerne raspodjele težine transformatora, čime se poboljšava njegova mehanička stabilnost. Jezgre strujnih i naponskih transformatora koje imaju sekundarne namote smještaju se u unutrašnjost uzemljenih, skroz zatvorenih ekrana, čime se minimalizira mogućnost prijenosa prenapona visoke frekvencije u sekundarne krugove, što je ustvari i izrazito povoljno. Što se tiče tehnologije izrade i montaže, ima mnogo sličnosti s izradom i montažom strujnih transformatora, čime je omogućena razmjerno jednostavna proizvodnja za najviše napone, npr. za $U_m = 420$ kV.

[1]

Natpisna pločica kombiniranog mjernog transformatora u tvornici Končar prikazana je na slici 2.24.



Slika 2.24.: Natpisna pločica kombiniranog mjernog transformatora tvornica Končar.

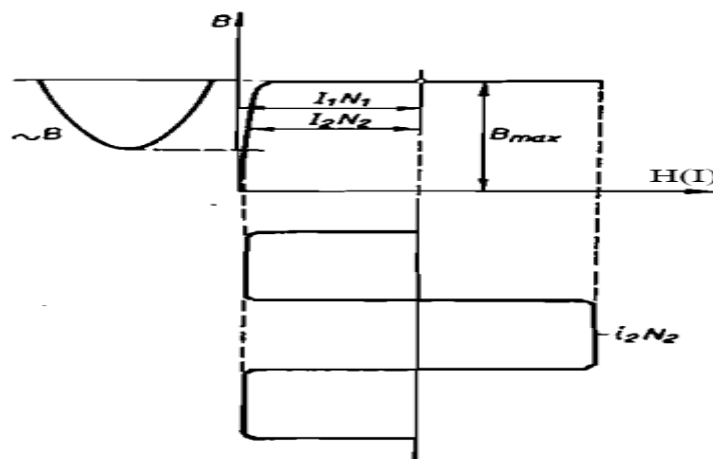
2.3.6. Strujni transformatori za istosmjernu struju

Pri mjerenju istosmjerne struje velikih vrijednosti uobičajeno je korištenje metode magnetskih transduktora. Radi se ovodu unutar kojeg prolazi mjerena istosmjerna struja i koji protiče dvama prstenastim jezgrama izgrađenim magnetskim materijalom i pravokutne krivulje magnetiziranja. Takve su jezgre prstenastog oblika i s namotanim sekundarnim namotom oko sebe, ampermetar je priključen u seriju s namotom, kao i s konstantnim izmjeničnim naponom. [1]

Namoti obiju jezgri spojeni su u seriji. Ako se koriste dobri magnetski materijali, amper zavoji sekundarnog namota skoro su isti kao i amper zavoji primarnog namota, a izraz za to glasi:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2-21)$$

Magnetska indukcija jezgre i sekundarna struja (istosmjernog strujnog transformatora) prikazane su na slici 2.25.

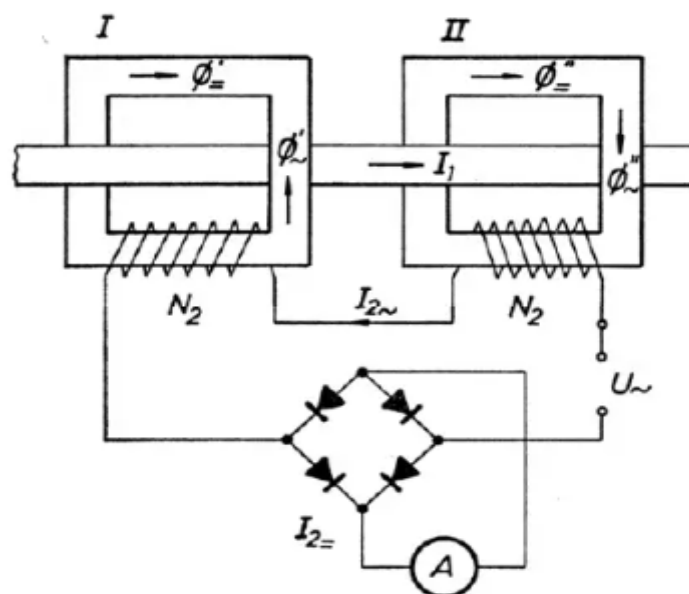


Slika 2.25.: Magnetska indukcija jezgre i sekundarna struja (istosmjernog strujnog transformatora) [1]

Moguće je izmjeriti sekundarnu struju korištenjem instrumenta koji ima rotirajući svitak i suhi ispravljač u Graetzovom spoju. Spominjući ovu metodu mjerenja, valja naglasiti kako su granice pogrešaka između 0,2 i 1 %. Također, ono ne zahtjeva stabilizatore budući da izmjenični napon ne stvara tolike smetnje. Mjerenje struje koristeći ovu metodu u rasponu je između 100 i 100 000 A. Moguće je da sekundarni teret bude poprilične veličine, čak i do 100 W.

Kod strujnih mjernih transformatora koji se koriste pri mjerenju velikih istosmjernih struja, upotrebljavaju se gotovo ista rješenja koja su namijenjena kod izmjenične struje strujnih mjernih transformatora. Zbog velikih se gubitaka pri mjerenju vrlo visokih istosmjernih struja ne koristi uobičajeni način mjerenja pomoću shunta i instrumenata sa zakretnim svitkom. U današnje se vrijeme nekim drugim metodama mogu mjeriti velike struje, a jedan od principa jest utemeljeno mjerenje pomoću magnetskih transdukatora.

Shematski prikaz strujnog transformatora istosmjerne struje prikazano je na slici 2.26.

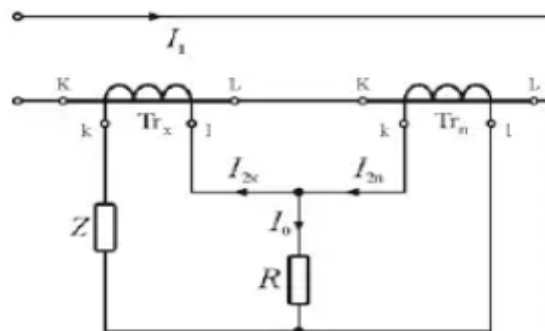


Slika 2.26.: Shematski prikaz strujnog transformatora istosmjerne struje [15]

Vod kroz koji teče mjerena struja I_1 prolazi kroz ranije spomenute dvije magnetske jezgre izrađene od dobrih magnetskih materijala, a njihove su krivulje magnetiziranja gotovo pravokutne. Oko jezgri su namotani sekundarni namoti i serijski priključeni na izmjenični napon U konstantne vrijednosti. Tok Φ_{\sim} izazvan je zajedničkom strujom I_2 s obaju sekundara i u jednoj se jezgri protivi toku $\Phi =$ struje I_1 , dok se u drugoj podudara s tim tokom. Jezgre su predmagnetizirane primarnom strujom I_1 do indukcije zasićenja. Napon U , koji je izmjeničan, uzrokuje u sekundarnim namotima izmjeničnu indukciju B_{\sim} , dok poluperiode naizmjenično jednu jezgru izvlače iz zasićenja, a drugu jezgru tjeraju u zasićenje. Za idealnu pravokutnu karakteristiku jezgri vrijedi jednakost amperzavoja. [15]

2.3.7. Mjerenje pogrešaka mjernih transformatora

Pogreške na transformatoru moraju biti potvrđene odgovarajućim mjernim metodama, odnosno onom koja osigurava da je točnost tog mjerenja barem red veličine pouzdanija i bolja od točnosti mjerenja pogrešaka mjernog transformatora. Uspoređivanje primarnih i sekundarnih, kako struja, tako i napona, izravnim mjerenjem ampermetrima i voltmetrima nije prikladno zato što mjerni sustavi takvih instrumenata ne mogu obuhvatiti veće vrijednosti primarnih veličina, niti se kod spomenutih instrumenata može garantirati dovoljna točnost mjerenja pri izmjeničnoj struji. Također, ne može se odrediti ni fazna pogreška. Kako bi sve to bilo izvedivo, treba se koristiti posebnim metodama, što se radi pomoću vrlo preciznih otpornika, kondenzatora i sl., a kod drugih metoda koristi se za usporedbu transformatora koji se ispituje s vrlo preciznim mjernim transformatorom. Jedna od diferencijalnih metoda za mjerenje pogrešaka strujnih transformatora koja se često koristi jest Hohleova metoda koja je prikazana na slici 2.27.

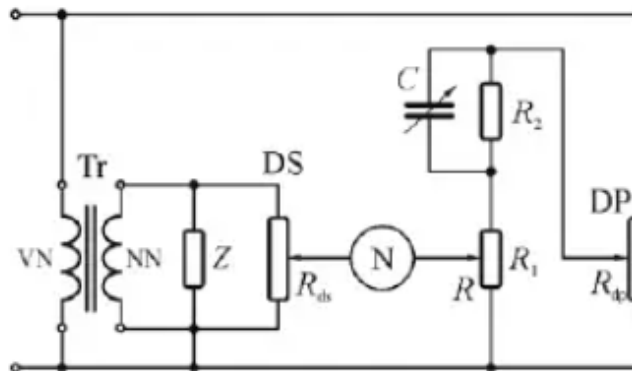


Slika 2.27.: Hohleova diferencijalna metoda za određivanje pogrešaka strujnog transformatora [17]

Spomenutom metodom pogreška se utvrđuje usporedbom ispitivanog transformatora sa standardnim referentnim-transformatorom s istim nazivnom prijenosnim omjerom. [1]

Pogreške naponskih mjernih transformatora

Za mjerenje fazne pogreške naponskih mjernih transformatora korištena je kompenzacijska metoda po Scheringu i Albertiju prikazana na slici 2.28.



Slika 2.28.: Kompenzacijska metoda po Scheringu i Albertiju. [17]

Korištenjem razdjelnika napona R_{ds} i R_{dp} ostvaruje se smanjenje primarnog i sekundarnog napona na odgovarajuće vrijednosti. Naponi razdjelnika dovode se do kompenzatora kako bi se postigao mali fazni pomak te se, potom, podešavanjem otpornika R i kondenzatora C pokušava izjednačiti vektor napona s jedne i druge strane nul-indikatora. Kod ovakvih se metoda najveći problem javlja zbog pregrijavanja. Za mjerenje je korišten transformator koji ima $\frac{U_1}{U_2} = \frac{100}{10}$. Razred točnosti mu je 1,0. Pogreška naponskog mjernog transformatora računa se prema izrazu:

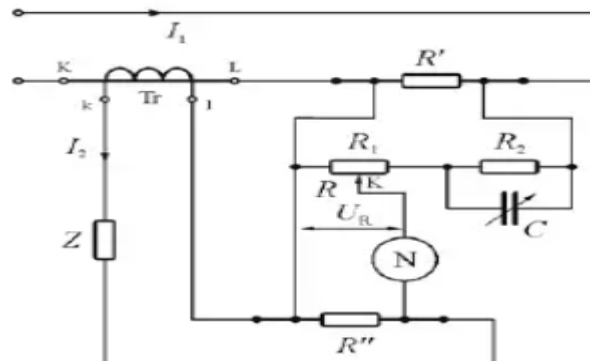
$$p_u = \frac{k_n U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\% \quad (2-23)$$

A za mjerenje fazne pogreške koristi se formula: $\delta \approx tg\delta = \frac{\omega R_2^2 c}{R_1 + R_2}$ (2-24)

Pogreške strujnih mjernih transformatora

Mjerenja pogrešaka strujnih transformatora također se rade Schering-Alberti metodom. Primarna struja I_1 teče kroz primarni namot ispitivanog transformatora T_r i precizni otpornik R' , a sekundarna struja I_2 teče kroz opterećenje Z i otpornik R'' . Otpore R' i R'' valja izabrati na način da zadovoljavaju da pad napona $I_1 R'$ bude veće vrijednosti od pada napona $I_2 R''$. U paraleli je otpor R' s granom koja je paralelna kombinacija otpora R_2 i podesivog kapaciteta C. Kapacitet C je zanemariv, budući da isti malo fazno zakrene struju I, ali neznatno utječe na njezinu veličinu.

Korištenje Sheringove i Albertijeve kompenzacijske metode kako bi se odredile pogreške strujnih mjernih transformatora prikazano je na slici 2.29.



Slika 2.29.: Kompenzacijska metoda po Sheringu i Albertiju – strujni mjerni transformatori [17]

Točnost određivanja strujne pogreške prvenstveno određena je točnošću mjernih otpora R' i R'' . Kod nazivne vrijednosti sekundarne struje od 1 A i 5 A, otpor R'' mjeri se u desecima do stotinama milijuna kako bi se uspostavio dovoljan pad napona na njemu za rad kompenzatora. Za mjerenje je korišten transformator koji ima $\frac{I_1}{I_2} = \frac{10}{2,5}$. Razred točnosti mu je 1,0. Pogreška strujnog mjernog transformatora računa se prema već spomenutom izrazu:

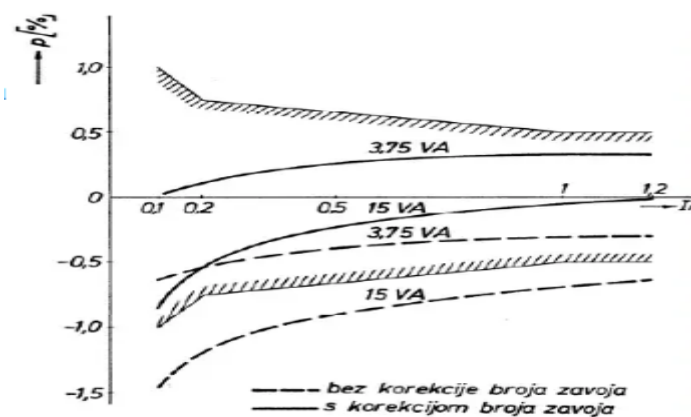
$$p_i = \frac{K_n I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100\% \quad (2-25)$$

Za mjerenje fazne pogreške koristi se ista formula kao i kod naponskih mjernih transformatora. [17]

2.3.8. Mjere za smanjenje pogrešaka strujnih transformatora

Odabire se broj zavoja transformatora da se ostvari jednakost umnožaka primarne struje i broja zavoja primarnog namota sa sekundarnom strujom te broja zavoja sekundarnog namota.

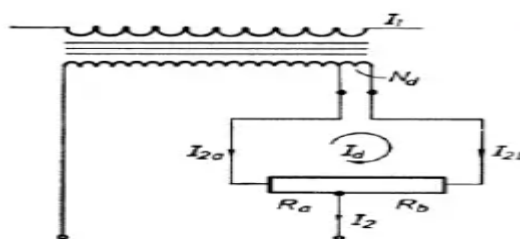
Krivulje strujnih pogrešaka ovisno o struji pri različitim opterećenjima s prisutnom korekcijom i bez korekcije mogu se vidjeti na slici 2.30. [1]



Slika 2.30.: Krivulje strujnih pogrešaka ovisno o struji pri različitim opterećenjima s prisutnom korekcijom i bez korekcije [1]

Sekundarna struja I_2 manje je vrijednosti u odnosu na primarnu struju I_1 , a primarna struja I_1 opada zbog struje magnetiziranja, čime se dobije negativna strujna pogreška. Kod manjih se struja stvara potreba za manjim induciranim naponom U_p , tj. u slučaju manje magnetske indukcije prisutne u jezgri, manjoj indukciji uredno odgovara manji faktor μ_g .

Korekcija strujne pogreške pomoću potenciometra prikazana je na slici 2.31.



Slika 2.31.: Korekcija strujne pogreške pomoću potenciometra [16]

Pogreške strujnih mjernih transformatora mogu se pokušati smanjiti na različite načine. Korekcijom potenciometra struja tereta I_2 raspodjeljuje se jednom i drugom stranom potenciometra, zbog čega premoštenim dijelom namota teče samo dio spomenute struje tereta koji može biti udovoljen micanjem kliznika, čime se postiže pristojna regulacija. [16]

3. NEKONVENCIONALNI MJERNI TRANSFORMATORI

Dosad spomenuti mjerni transformatori konvencionalni su mjerni transformatori, i to naponski i strujni, te posjeduju feromagnetsku jezgru. Što se nekonvencionalnih transformatora tiče, oni ne posjeduju feromagnetsku jezgru zato što je tehnologija uznapredovala. Isti imaju i brojne prednosti; njihova je točnost pri mjerenju iznimno velika, zauzimaju mnogo manje prostora, mnogo su manje mase, povoljniji su te ih nije komplicirano ugraditi. Transformatori rade i prilagodbu mjerne veličine prikladne za mjerenje. U međuvremenu je pronađeno privremeno rješenje – nova vrsta transformatora i to bez feromagnetske jezgre.

Ugrađeni se elektronički sklopovi integriraju unutar transformatora, čime se dolazi do odgovarajućeg integracije s digitalnim mjernim uređajima, što doprinosi ostvarenju puno većeg broja mogućnosti u pogledu broja i vrsta funkcija.

Vrlo je važno za nekonvencionalne mjerne pretvarače da elektronički sklopovi imaju mogućnost ugradnje u mjerni pretvarač, čime se dolazi do odlične povezanosti s digitalnim mjernim uređajima koji su zaslužni za obavljanje širokog niza funkcija. Za ostvarenje prijenosa informacija kod nekonvencionalnih mjernih transformatora, važno je koristiti se fiber-optičkim kabelom cilindralnog oblika koji se sastoji od optičkog vlakna koje je zaslužno za provođenje svjetlosti uz apsolutnu refleksiju, bez ikakvih rasipanja i gubitaka svjetlosti. Optičkoj komunikaciji pripisuje se prijenos puno većeg broja podataka u usporedbi s radio i telefonskom komunikacijom. Električna se energija ne širi kroz spomenuto optičko vlakno. Nekonvencionalni transformatori imaju vrlo visoke performanse glede kontrole i zaštite – testirani su i dokazano je da su vrlo učinkoviti pri nepovoljnim uvjetima, imajući u obzir temperaturu, mehaničke vibracije i elektromagnetske smetnje. Detektiranu se struju mjerenja dobiva Faradayevim efektom, dok je za ikakva mjerenja napona važan Pockelsov efekt. Nekonvencionalni transformatori uklapaju nove vrste tehnologije, izrazito originalne, u čitavi elektroenergetski sustav. Prva značajka, NCIT, uvedena je zamjenom CIT-a koja se odvija pomoću Rogowskijevog svitka koji vrši ulogu senzora izmjenične struje. Taj je razvoj optičke digitalne inteligencije u NCIT-ovima doveo do jedne vrste revolucije, što se tiče zaštite električne energije. Strujni optički transformatori nemaju ulja, nisu plinski izolirani, ne sadrže ni heksafluorid (SF₆) ni sumpor, a unutrašnja im je izolacija od čistog zraka. Faradayev je efekt uzrok rotaciji polarizacije, linearno proporcionalnoj komponenti magnetskog polja u smjeru širenja. Pockelsov efekt linearna je elektro-optička vrsta učinka. Za promjenu indeksa loma treba naglasiti da je razmjerna s promjenom električnog polja. Može se pohvaliti brojnim prednostima,

među kojima prednjači sigurnost jer optički izlaz nije rizičan u odnosu na konvencionalne transformatore s potencijalno opasnim naponom. Također, kod njih nema optičkih ograničenja magnetiziranja struje, čime je njihova točnost prisutna skroz do nulte struje. Optički su strujni transformatori bez zahtjeva za uljnom ili SF6 izolacijom, zbog čega su izrazito niskog rizika za okoliš. Imaju malu veličinu i težinu. Optički mjerni transformatori smanjuju potrebnu mehaničku potporu i fleksibilni su u montaži. Što se troškova ovih u usporedbi s konvencionalnim transformatorima tiče, optički imaju mogućnost pružanja značajno smanjenih troškova kroz smanjene komponente instalacije, održavanja i odlaganja, dok konvencionalni imaju rasutog bakra. [6]

4.1. Naponski optički mjerni pretvarači

Takvi pretvarači zbog svih svojih prednosti postaju prava atrakcija na svjetskom tržištu – cjenovno su povoljniji, manje su mase i potreban im je manji prostor. ALSTOM-transformator visok je 7,3 m i mase od 230 kg, a njime je moguće mjeriti napone do 800 kV. Radom takvog pretvarača linearno polarizirana svjetlost prelazi do eliptičko polarizirane svjetlosti, unutar dvolomnih kristala na koje djeluje električki pol, a uslijed fazne razlike razlikuju se dva polarizirana vala međusobno fazno pomaknuta, a međusobno su okomitih polarizacijskih ravnina. U području fizike opisani su Pockelsovovim efektom, dok postoje i Pockelsove ćelije. Središnji simetrični kristali neće se koristiti. U svrhu osjetilnih ćelija koriste se: „bizmut-germanij oksid (BG0), bizmut-silicij oksid (BSO9), litij-stroncij-aluminij-heksafluorid (LiSAF), litij-kalcij-aluminij-heksafluorida (LiCAF)“. [6] Spomenuti kristali imaju male dimenzije, svega nekoliko centimetara kubnih.

4.2. Strujni optički mjerni pretvarači

Oni funkcioniraju konceptom zakreta kuta polarizacije svjetlosti dok polarizirana svjetlost prolazi magnetskim poljem, i to okomito u usporedbi sa smjerom širenja svjetlosti. Faradayev efekt magnetsko je optički učinak; putujućoj su svjetlosti krajnja stanica kristali te se pomoću svjetlosnog kabela usmjerava kroz polarizator, nakon čega biva odvedena pomoću svjetlosnog kabela kroz analizator do svog cilja, a to je elektronički uređaj s mjerenjem promjene intenziteta,

što uzrokuje zakret polarizacijske osi nakon prolaska analizatora. Rad magnetskog polja vodiča uzrokuje stvaranje titranja polarizirane svjetlosti ravnine. Formula za izlazni intenzitet glasi:

$$I_{iz} = I_{ul} \cdot \cos^2 (\theta - \alpha) \quad (4-1)$$

pri čemu je:

I_{iz} – intenzitet svjetlosti nakon prolaska kroz analizator;

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

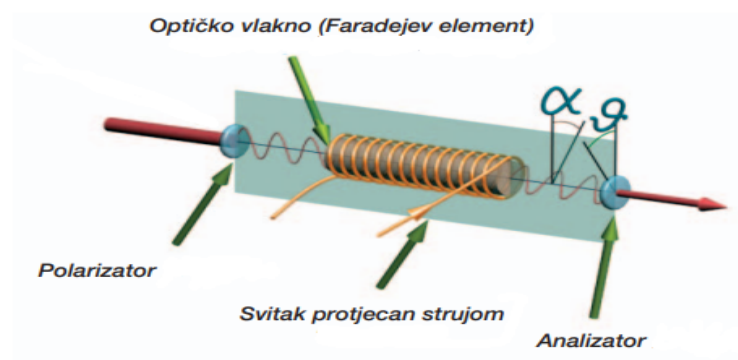
α – kut zakreta.

$$\alpha = C \cdot I \cdot H$$

(4-2)

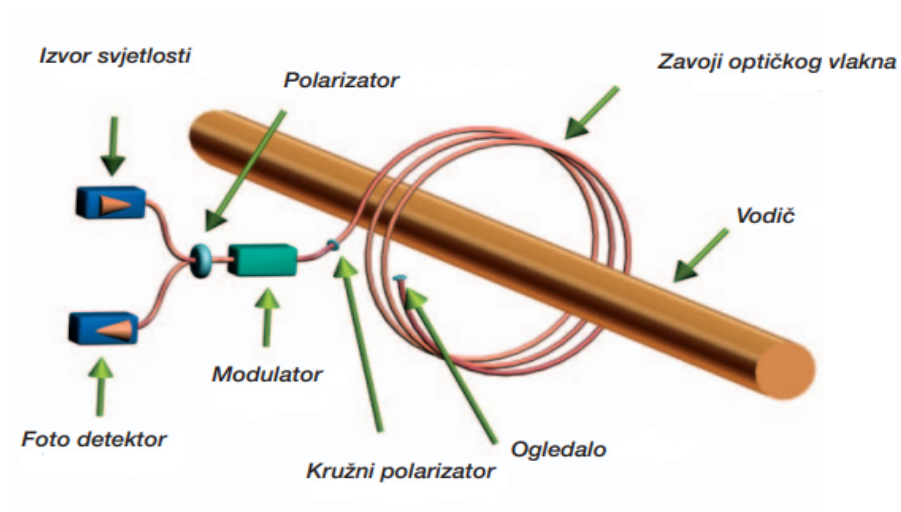
pri čemu C označava konstantu francuskog fizičara Emilea Verdet, optičke vrste materijala kojim putuje svjetlost, I svjetlosnu duljinu svjetlosne zrake zahvaćenu homogenim poljem, a H je oznaka magnetskog područja proizvedenog svitkom kroz koji teče mjerna struja.

Faradayev efekt prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1.: Faradayev efekt [6]

Sustav za mjerenje struja prikazuje slika 4.2.



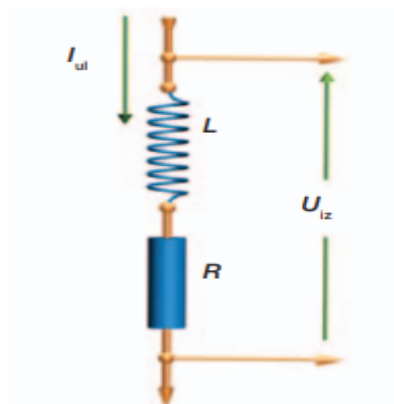
Slika 4.2.: Sistem za mjerenje struja [6]

Na slici je prikaz kristalnog prstena koji daje mogućnost apsolutne refleksije svjetlosti, a navedene su sve svjetlosti koje okružuje vodič čiju se struju mjeri.

4.3. Mjerenje struje padom napona na otporniku (shuntu)

Takvo je mjerenje struje izrazito precizno. Naime, uslijed nezamjetne reaktancije na otporniku dolazi se do mogućnosti najjednostavnijeg mjerenja struje. Nesavršenosti nastaju uslijed toplinskog opterećenja I^2R (radi se o tzv. Joulesovim gubicima), a sve je to razlog nemogućnosti mjerenja prevelike struje. Ono ima i jednu manu – induktivitet koji je uzrok smetnjama u vrijednosti od nekoliko nH; uzrok je i faznom pomaku, zbog čega postoji mogućnost nastajanja velike mjerne pogreške prilikom malih faktora snage.

Kako se pomoću pada napona na otporniku (shuntu) mjeri struja prikazano je na slici 4.3.



Slika 4.3.: Mjerenje struje pomoću pada napona na otporniku (shuntu) [6]

Ovakvo mjerenje struje u odnosu na mjerne transformatore koji imaju feromagnetsku jezgru ima brojne prednosti:

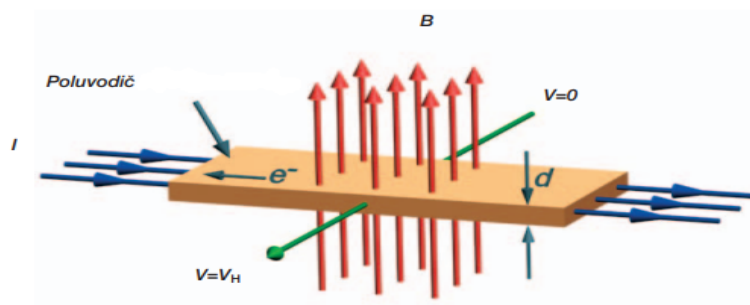
- malih je dimenzija (mase);
- niske cijene;
- bez zasićenja;
- lakoća izvedbe;
- velika linearnost.

4.4. Hall sonde

Što se tiče Hall sonde, vrlo je važno spomenuti Lorentzovo pravilo koje kaže da, ukoliko struja I prolazi vodljivom pločom debljine d koja je unutar magnetskog polja B , utoliko magnetsko polje ima učinak na nositelje naboja unutar ploče. Vodič kroz koji prolazi električna struja zaslužan je za stvaranje minijaturnih mjernih osjetnikika magnetskog polja.

Formula glasi: $F_u = -q \cdot V_d \cdot B$ (4-3)

Primjer jedne Hall sonde prikazan je na slici 4.4.



Slika 4.4.: Hall sonda – primjer [6]

S jedne strane ploče skuplja se naboj, a magnetska sila (radi se o tzv. Lorentzovoj sili) djeluje na naboj okomito u usporedbi sa smjerom struje i magnetskog polja. Na svakom rubu ploče nalazi se mjerljivi napon (tzv. Hallov napon). Formula za to je:

$$V_H = \frac{(I \cdot B)}{(N \cdot F_D)} \quad (4-4)$$

pri čemu je:

I – električna jakost struje koja prolazi kroz ploču;

B – jakost magnetskog područja;

i – gustoća nositelja naboja;

F_D – iznos elementarnog naboja;

d – debljina pločice.

Njihova je svrha mjerenje istosmjerne struje u vrijednosti do 100 kA, pri čemu pogreška iznosi $\pm 10^{-3}$, budući da je razmjernan magnetskom polju. Moraju se koristiti dodatni elektronički sklopovi kako bi se izmjerile izmjenične struje. Takvi sklopovi služe za pretvaranje signala u digitalni oblik. Materijali iridij i iridij-arsen poluvodički su elementi kojima se izvode Hallove

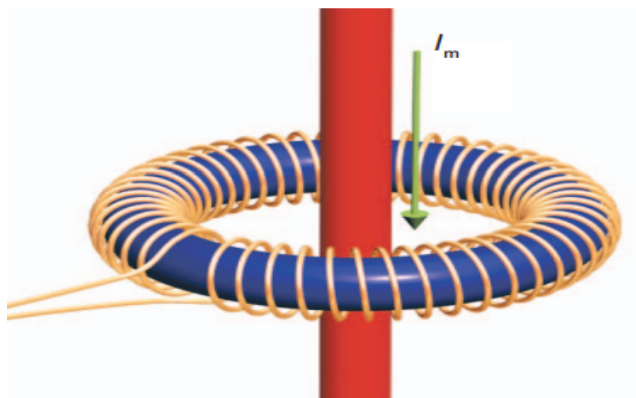
sonde čija je dimenzija svega nekoliko kubičnih milimetara. Osim Hallovog osjetnika, integrira se i analogno digitalni pretvarač, temperaturni i histerezni kompenzator i za linearizacijska sklopovlja u svrhu što vjernije slike mjerenja struje.

I tu su prisutne brojne prednosti:

- lakoća izvedbe;
- poprilično male dimenzije i masa;
- nižih cijena;
- jednostavnost ugradnje;
- susjedne faze ne utječu na mjerenje.

4.5. di/dt pretvarači

Pretvarači di/dt torusnog su oblika i često su nazivani „zračnim svicima“ ili mjera magnetskog napona. Oni mjerenu struju pretvaraju u naponski signal spreman za daljnju obradu, čime se dobije svitak bez feromagnetske jezgre, a naziva ga se Rogovskijevim svitkom. Upravo zbog tog svitka, može biti korišten u sklopu digitalnog svijeta kod brojila koja su svoje mjesto našli u brojnim kućanstvima i industriji. Što se svitka tiče, s konstrukcijske strane gledano, jednostavan je, nema veliku cijenu, širokog je raspona mjerenja struje različitih frekvencija, a može služiti i mjerenju vrlo velikih struja. Pri namatanju svitka na kruto tijelo ne smije se dogoditi savijanje svitka budući da će time zavoj odstupiti od idealnog položaja. Rogovski svitak prikazan je na slici 4.5.



Slika 4.5.: Rogovski svitak [6]

Formula za izračun indukcije napona uslijed promjene magnetskoga toka u zavoju jest:

$$e = -N \cdot \frac{d_{\phi}(t)}{d_t} \quad (4-5)$$

pri čemu je:

e – ukupni inducirani napon za cijeli svitak;

N – ukupan broj namota koji sadrži svitak;

$d_{\phi} t$ – promjena toka unutar namota;

d_t – promjena vremena.

Spomenuti d_{ϕ}/d_t pretvarači mogu se pohvaliti brojnim prednostima:

- jednostavne su izvedbe;
- niskih su cijena;
- laki za ugraditi;
- jako malih dimenzija i mase;
- niske su potrošnje svitka;
- niskog temperaturnog pomaka.

4. Pravilnik o mjeriteljskim i tehničkim zahtjevima mjernih transformatora

Ovim Pravilnikom se propisuju mjeriteljski i tehnički zahtjevi za strujne mjerne transformatore razreda točnosti 0.1, 0.2, 0.5, 0.2 S i 0.5 S (strujni transformatori) i naponske mjerne transformatore razreda točnosti 0.1, 0.2, 0.5 (naponski transformatori), upotrebljavaju se u izmjeničnoj mreži $f = 50$ Hz, za spajanje s brojilima u mjerne grupe za mjerenje električne energije.

1) Postoje odobreni tipovi mjerila:

- skupina: kapacitivni naponski mjerni transformator;
- tvorničke oznake: AGU;
- vlasnik: „KONČAR – MJERNI TRANSFORMATORI“;
- ime mjesta i države proizvodnje mjerila: Zagreb, Hrvatska;
- službena oznaka tipa mjerila: HR t-4-1005.

Prikaz jednog takvog mjernog transformatora može se vidjeti na slici 3.1.



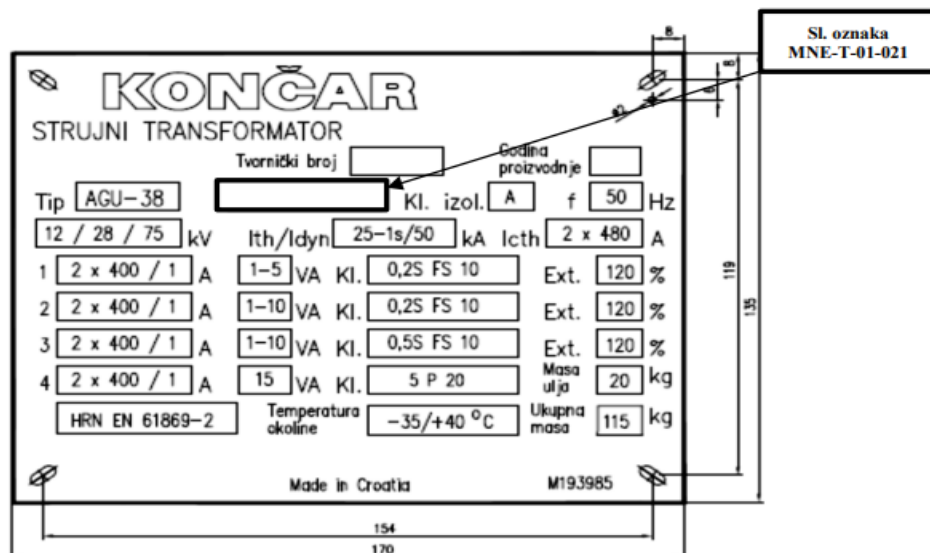
Slika 3.1.: Mjerni transformator AGU-38 [\[21\]](#)

Zakonito mjerilo ili zakonsko mjerilo

Članak 20. Zakonito mjerilo ili zakonsko mjerilo upotrebljava se najprije za mjerenja usluga i robe, zaštitu zdravlja ljudi i životinja, prirodnih resursa, imovine i okoliša te kod zaštite na radu i zaštite od nesreća. Isto tako upotrebljava se i kod provjere pretpakovine i boca kao spremnika. Gore navedena mjerila obavezno moraju biti provjerena te podliježu nadzoru mjeriteljske inspekcije.

Vežano uz uporabu zakonitih mjerila ista moraju odgovarati tehničkim i mjeriteljskim zahtjevima, biti ispitana te označena propisanim oznakama. Ukoliko se određeno mjerilo više ne koristi mora biti jasno naznačeno da je izvan funkcije te ih se mora ukloniti iz prostorije u kojoj se koriste ispravna mjerila. Točnost mjerila je jako bitna te pravne i fizičke osobe u obavljanju djelatnosti moraju koristiti zakonita mjerila. Značajke zakonitih mjerila koje se koriste za pojedina mjerenja te sam postupak označavanja mjerila koja se više ne rabe propisuje ravnatelj Zavoda pravilnikom. [27]

Na slici 3.2. vidljiva je natpisna pločica strujnih mjernih transformatora tipa AGU-38



Slika 3.2.: Natpisna pločica strujnih mjernih transformatora tipa AGU-38 [21]

Tipsko odobrenje provodi se na dva načina: međunarodnom preporukom za naponske mjerne transformatore - IEC 60044-2/97 i propisima o mjeriteljskim uvjetima mjernih transformatora. [5]

2) Podaci o mjeriteljstvu:

- postoji mogućnost ovjeravanja mjerila navedenog ranije (odobrenje tipa mjerila);
- valjanost tipnog odobrenja iznosi 10 godina;
- mjernim transformatorima utvrđena prikladnost za upotrebu, što je prihvaćeno i Pravilnikom, tj. ispunjavaju mjeriteljske zahtjeve;
- ograničenja dopuštenih pogrešaka – ne smiju se prekoračiti pogreške navedene u člancima, odnosno dopuštena su određena odstupanja i iskazana u članku 14. od njih 16 u Pravilniku;
- natpisi i oznake valja postaviti s vanjske strane kako bi bili vidljivi i lako čitljivi – sve u skladu s Pravilnikom;
- ovjeravanje i žigosanje transformatora – kako bi se ispitao transformator, valja se koristiti Pravilnikom. Transformatori se ovjeravaju korištenjem žiga utisnutog kositrenom plombom i olovnom, čime se osigurava natpisna pločica koja se nalazi na dnu transformatora.

Visokonaponski ispitni transformator izmjenične frekvencije može se skraćeno nazvati ispitni transformator. On ima dobru električnu izolaciju te se upotrebljava za ispitivanje izolacije električnih materijala i električne opreme. Možemo ga koristiti i kao visokonaponsko napajanje male snage. Ispitni transformator je općenito rečeno transformator za povećanje. Taj ispitni transformator koristi visokofrekventni napon induciran na njegovoj sekundarnoj strani za provođenje ispitivanja izvedbe izolacije na različitim izolacijskim materijalima i električnim proizvodima. Nakon što je električna oprema isporučena, remontirana ili predana neophodno je provesti ispitivanje podnosivosti izmjeničnog napona. Na taj način se procjenjuje razina izolacije opreme koja podnosi prenaponski udar. Stoga je potrebno postaviti opremu koja može izdržati izmjenični napon.

Ispitni transformator je električna oprema koja se koristi u ispitivanju naponske otpornosti u popravcima transformatora te je time nezamjenjiva.

Ispitni transformator se upotrebljava za ispitivanje električnog napona otporne frekvencije električne energije, ispitivanje toplinske stabilnosti izolacijskog medija, mjerenje djelomičnog pražnjenja i slično.

Ispitni transformator nema radiator te ima visok radni napon ali kratko trajanje, kao i mali porast temperature.

Karakteristike AC visokonaponskog ispitnog transformatora su jednofaznost. Izlaz AC visokonaponskog ispitnog transformatora jest niska struja, visoki napon i mali kapacitet. Način rada ovih transformatora je isprekidan a izolacijska granica AC visokonaponskog ispitnog transformatora je mala. Izmjenični visokonaponski ispitni transformator mora biti sposoban izdržati višestruka pražnjenja. [\[28\]](#)

Ispitni laboratorij za mjerne transformatore prikazan je na slici 3.3.



Slika 3.3.: Ispitni laboratorij za mjerne transformatore tvornice Končar.

Ispitivanje klase točnosti, ima tri kata, ovisno o visini transformatora prikazuje slika 3.4.



Slika 3.4.: Ispitivanje klase točnosti, ima tri kata, ovisno o visini transformatora tvornice Končar.

5. KONČAR mjerni transformatori

Kao ilustracija navedenog u nastavku su prikazani primjeri:

5.1. Primjer : Posjeta tvornici „Končar – mjerni transformatori“

Temeljni su artikli tvornice mjerni transformatori koji imaju izolaciju papirom i uljem, a postoje i oni čija je izolacija od epoksidne smole. U maloj se ispitnoj stanici odvija provjera, odnosno međufazno se ispituje transformator. Ukoliko je sve dobro, dobiva pečat/potpis i dolazi do sljedeće razine. Zrak je vlažan, to jest ne radi se o potpuno suhom zraku, zbog čega transformator valja staviti u peć na sušenje, što je trajanja 7 – 20 dana. Kad transformator bude izvađen iz peći, najvažnije je da ga se što prije utopi, zatvori i pritegne, nakon čega odlazi na 24-satno vakumiranje uz provjeru da nigdje ne propušta, odnosno ne curi ulje, pri čemu se koriste mineralnim transformatorskim uljem, a po novome tu je i biorazgradivo ulje. Naponski mjerni transformatori, kao i oni kombinirani, otporni su na ferorezonanciju i rasprsnuće zahvaljujući dizajnu otvorene jezgre. Ukoliko dođe do kvara, isti ostaje lokaliziran u jednom dijelu primarnog namota i ne širi se cijelom jezgrom. Najveći kombinirani silikonsko-porculanski transformator na svijetu napravljen je od 550 kV. Otvorena jezgra napravila je da jedna izolacija bude dovoljna – nema potrebe za izolacijom posebno strujnoga te posebno naponskoga mjernog transformatora. U velikoj ispitnoj stanici nalazi se ispitni transformator, a ispituje se i klasa točnosti. Mjerni transformator može biti postavljen na tržište ako zadovoljava sve međunarodne preporuke IEC-a (Međunarodnog elektrotehničkog povjerenstva).

5.2. Nekonvencionalni mjerni transformatori tip TRENCH GROUP

Trench group svjetski je predvodnik u području elektrotehnike i dizajna specifičnih visokonaponskih električnih proizvoda koji služe korisnicima na više tržišta širom svijeta. Bavljenje intenzivnim istraživačko-razvojnim aktivnostima omogućuje Trenchu uvođenje novih proizvoda na tržište, poput instrumentalnih transformatora Clean Air, suhih izolacijskih spojeva i visokonaponskih reaktora koji imaju zračnu jezgru. Trench Group može zadovoljiti sve potrebe kupaca širom svijeta i moguće ih je instalirati u kakvim god uvjetima okoline, a tu su obuhvaćeni: strujni transformatori, naponski transformatori i kombinacije s uljnom, plinskom ili izolacijom od

čistog zraka, kao i posebni mjerni transformatori, npr. za HVDC. Što se Trench optičkih strujnih transformatora tiče, nisu sastavljeni od elektroničkih dijelova, a njihov izolacijski medij nisu ni ulje ni SF6. S obzirom na dugoročnu održivost i činjenicu da su bez okolišnih kompromisa, spomenuti Trench transformatori ispitani su i raspoloživi za upotrebu diljem svijeta. [\[26\]](#)

Trench optički strujni transformatori bazirani su na Faradayevom efektu. Na izlazu se nalazi optički signal s malom snagom se šalje u jedinicu za spajanje koja čini da se ispoštuju komunikacijski protokoli poput IEC 61850-9-2. Korištenjem nekonvencionalnih mjernih transformatora kupci mogu mjeriti široki raspon mrežnih signala, nešto što s konvencionalnim transformatorima inače nije uočljivo.

Neke od karakteristika takvih transformatora uključuju:

- raspon naponske razine iznosi 72 – 800 kV;
- pogodni za okoliš iz mnogo razloga;
- prisustvo galvanskog razdvajanja primarne i sekundarne strane;
- jedan svjetlovodni kabel koji mijenja bakrene kabele velikih presjeka;
- unutrašnja izolacija napravljena je od čistog zraka;
- ima izolaciju koja ne uključuje F-plin, a s najnižim zahtjevima koji se tiču obuke, transporta, ugradnje i rada;
- nemaju C-plin, a ne postoji ni rizik od C-razgradnje, tj. nema potrebe za reciklažom plina;
- nema problema s globalnim zagrijavanjem;
- ne oštećuju ozon.

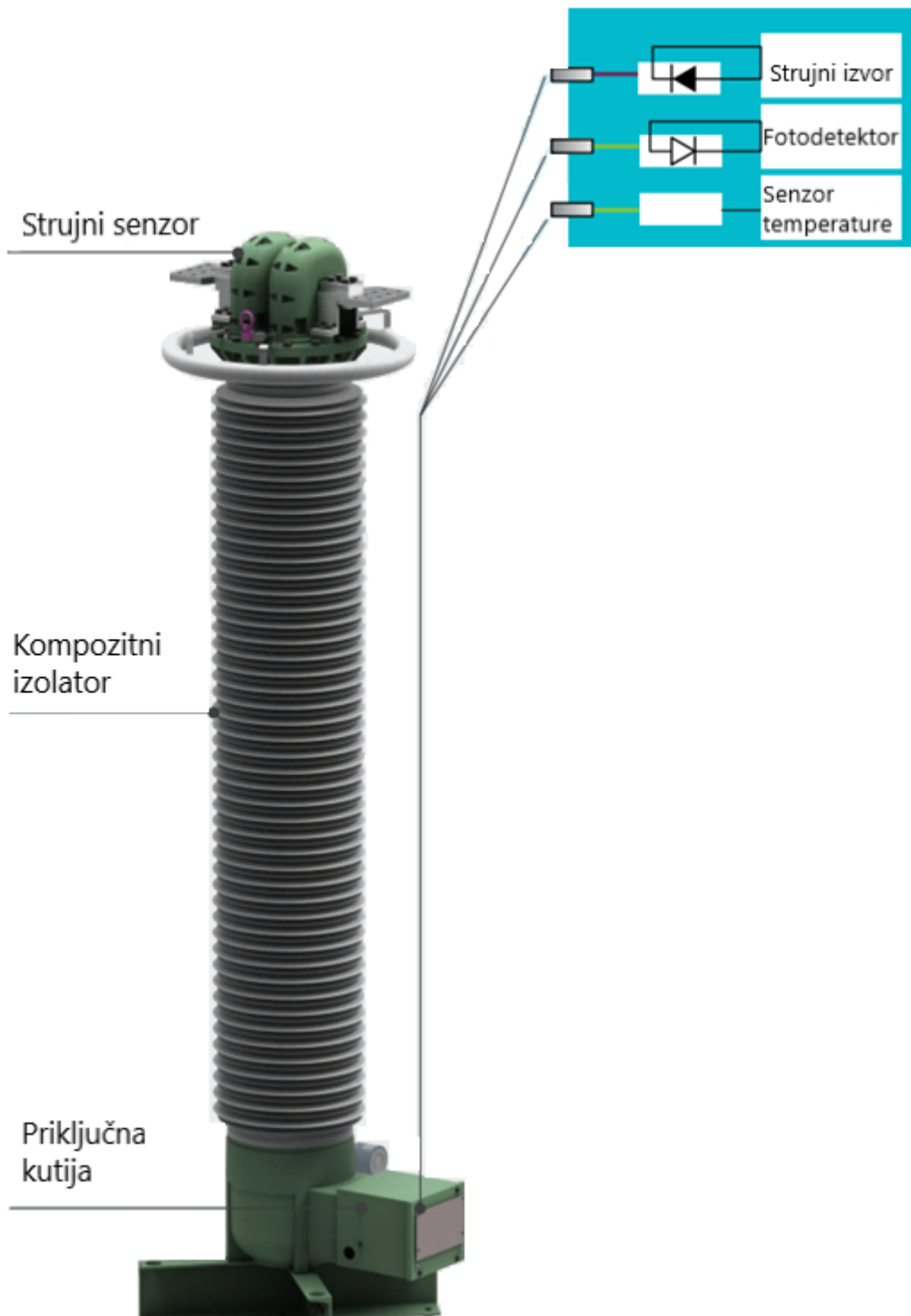
Što se tehničkih prednosti tiče, mogu raditi na niskim temperaturama primjene na -50 °C i nižim, nema potrebe za njihovim održavanjem, a uglavnom rade i po više od 30 godina. [\[7\]](#)

Optički strujni mjerni transformator Trench prikazan je na slici 5.1. [7]



Slika 5.1.: Optički strujni mjerni transformator Trench [7]

Optički strujni mjerni transformator prikazan je na slici 5.2.



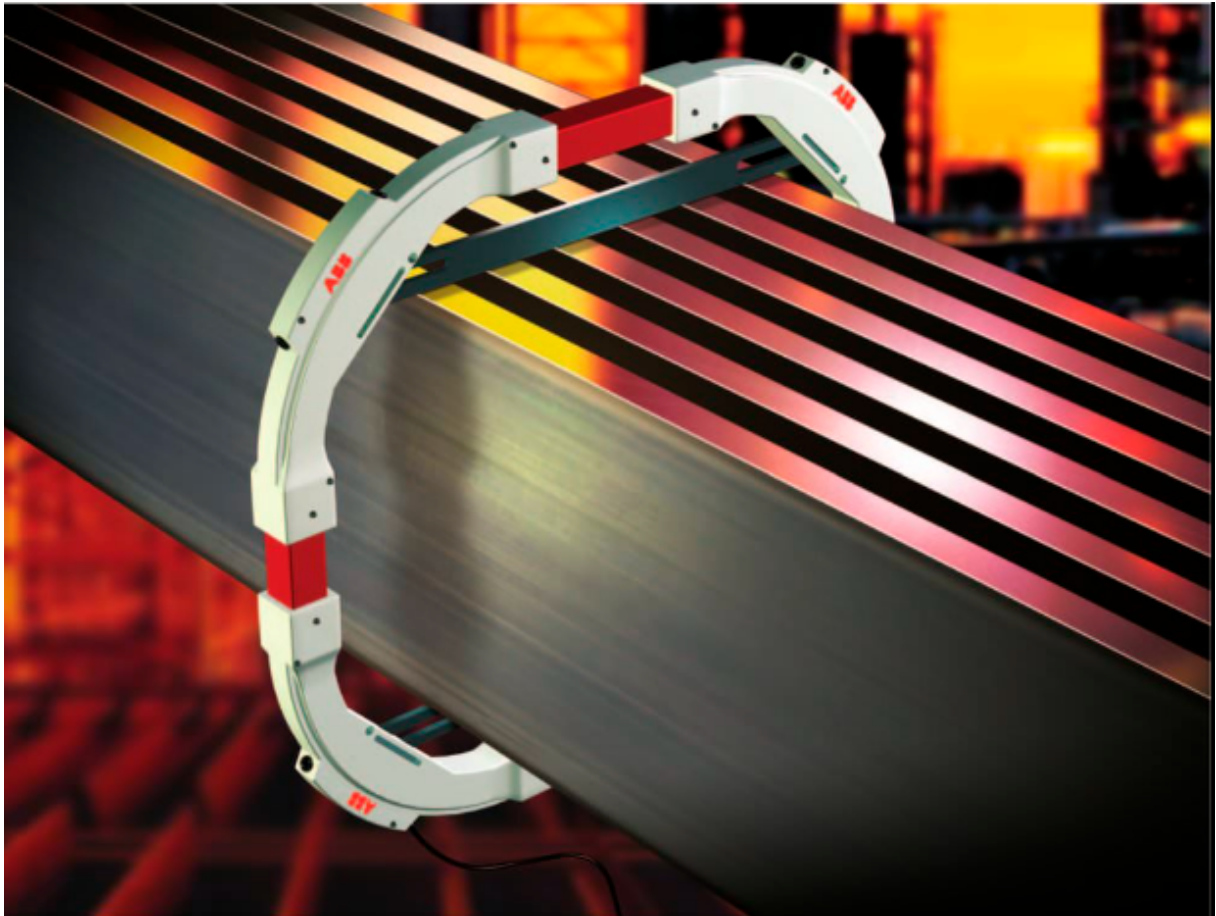
Slika 5.2.: Optički strujni mjerni transformator [8]

5.3. Nekonvencionalni mjerni transformatori tip ABB GROUP

5.3.1. Fiber-optički strujni senzor za visoki napon

Nov ABB-ov proizvod, fiber-optički strujni senzor (FOSS) razvijen je i prvi put korišten kod visokonaponskih podstanica. Pri njegovom postavljanju nije neophodno otvoriti sabirnice. Signal unutar magnetskog polja otporan je na ikakve struje, zbog čega je senzor moguće staviti bilo gdje na sabirnici ne mareći za moguće smetnje. Njegova instalacija uzme pola dana. [\[9\]](#)

Fiber optički strujni senzor za visoki napon prikazan je na slici 5.3.



Slika 5.3.: Fiber-optički strujni senzor za visoki napon [\[9\]](#)

Novi sustav fiber-optičkog strujnog senzora posjeduje mnoge prednosti u odnosu na tradicionalni sustav pretvornika struje Hallovog efekta.

Dalje navedena pitanja i odgovori uspoređuju fiber-optički strujni senzor i pretvornik struje Hallvog efekta:

Kolika je točnost sustava?

- Hallov efekt – iako poprilično precizan, moguća je pojava zasićenja pojačala;
- FOSS – vrijednosti točni mu je 0,1 % , od 1 do 120 % nazivne struje, sustav je otporan što se elektromagnetskih smetnji tiče, dok isto tako nema zahtjeva za magnetskim centriranjem, a temperaturni uvjeti okoline nemaju utjecaja na samu razinu točnosti.

Je li potrebno analizirati distribuciju magnetskog pola kao pomoć pri izboru i postavljanju glave senzora?

- Hallov efekt – da, zbog osjetljivosti tradicionalne glave pretvornika struje na asimetrična polja, odnosno ne bi li analiza dovela do ispravnog pozicioniranja glave, što bi izbjeglo pogreške, što dovodi do izbora većeg sustava za kojim inače nema potrebe.
- FOSS – ne jer je sistem otporan na elektromagnetske smetnje, a ne postoji ni zahtjev za magnetskim centriranjem, što pripomaže odabiru većeg sustava za kojim inače nema potrebe.

Kolike su mase?

- Hallov efekt – uzimajući u obzir veličinu, glava ima masu u vrijednosti do 1800 kg, dok vanjska elektronička ploča ima masu u vrijednosti do 320 kg i moguće je da bude dimenzija $1,4 \times 1,6$ m.
- FOSS – glava ima masu ispod 15 kg, a vanjska elektronička ploča 5 kg i moguće su dimenzije do $150 \times 100 \times 450$ mm.

Koristi li se sustav digitalnom obradom signala?

- Hallov efekt – ne.
- FOSS – da jer je tako osigurana dugoročna stabilnost i omogućeni su digitalna komunikacija i prikupljanje podataka; po potrebi, dostupni su i analogni izlazi.

Postoji li potreba za posebnom strukturom pri ugradnji?

- Hallov efekt – da, jer veličina i masa tradicionalnog sustava zahtijevaju namjensku strukturu;

- FOSS – ne, zbog male je mase i veličine omogućeno jednostavno pričvršćivanje oko sabirnice; po potrebi, moguć je prebačaj na drugo mjesto.

Koliko traje ugradnja?

- Hallov efekt – max. 2 tjedna za veliki sustav;
- FOSS – otprilike pola dana.

Je li potrebna kalibracija na licu mjesta?

- Hallov efekt – da;
- FOSS – ne, budući da je izrađena u proizvodnji i nema potrebe za njom za vrijeme života.

5.3.2. Magnetno-optički strujni transformator za zaštitu (MOST-Z)

Što se MOST-Z-a tiče, radi se o pasivnom optičkom pretvaraču struje koji se koristi svjetlošću ne bi li precizno mjerio struju u sustavima visokog napona. Pogodan je za vanjsku primjenu i trajne je nazivne struje u vrijednosti do 3150 A s faktorom ograničenja točnosti do 40 puta. U skladu je sa zaštitnom klasom točnosti 5TPE, prema standardu IEC 60044-8. Elektronička jedinica 2100-PI koristi se ABB-ovim patentiranim dvosmjernim pristupom ne bi li izlazni signal učinilo imunim na udarce i vibracije. Optički dizajn vjerno predstavlja struju kvara i bez zasićenja je, a ne posjeduje ni druge izvore izobličenja. MOST-Z sustav daje garanciju izlaznog napona od 200 mV pri korištenju sa zaštitnim relejima.

Magnetno-optički transformator za zaštitu prikazan je na slici 5.4.



Slika 5.4.: Magnetno-optički strujni transformator za zaštitu [23]

Među prednostima MOST-Z-a, ističu se sljedeće:

- ekološka sigurnost;
- iznimno visoka točnost, nema zasićenja, kao ni ikakvih drugačijih izvora izobličenja;
- poboljšane sigurnosti bez mehanizma za kvar ili otvorenog sekundara;
- znatno manje veličine i mase u usporedbi na ono s uljem i Sf6 izoliranom opremom;
- potpuna izoliranost mikroprocesora i releja od prenapona;
- bez ferorezonancije magnetske jezgre i granice zasićenja. [\[23\]](#)

6. KAKVA SU OČEKIVANJA OD NEKONVEKIONALNIH MJERNIH TRANSFORMATORA?

U konačnici, nekonvencionalni mjerni transformatori imaju svoje mjesto u električnim sustavima, ali se ne očekuje da će potpuno istisnuti konvencionalne transformatore. Ovisno o specifičnoj primjeni, uvjetima i zahtjevima, odabir između konvencionalnih i nekonvencionalnih transformatora će varirati.

Trenutno su najzastupljeniji konvencionalni mjerni transformatori za mjerenje napona i struja kod kojih su konstrukcija i način izvedbe dosegli najviši nivo što se može postići u datim okolnostima. Njihova brojna reprezentativnost očituje se u brojnim prednostima, kao i životni vijek od preko 35 do 40-ak godina.

Bez obzira na pojavu novih tehnologija, tvrtke koje se bave prijenosom električne energije nemaju namjeru mijenjati tradicionalni mjerni transformator sve dok on ispravno i zakonito obavlja svoj posao. Trenutačno su mnoge tvrtke zadovoljne trenutnim stanjem performansi tradicionalnih mjernih transformatora, zbog čega čak ni ne žele prijeći na nove tehnologije.

Cilj je proizvođača zadovoljiti kupce, potaknuti prodaju i proizvesti proizvode koje potrošači žele kupiti. Međutim, ukoliko proizvođač ponudi proizvod koji ima ekonomsku opravdanost procijenjenu primjenom analize trošak/koristi tijekom cijelog životnog vijeka sigurno je da će takav proizvod pronaći i svoje tržište.

Nekonvencionalni mjerni transformator primjer je jednog takvog proizvoda, koji ima određene prednosti u odnosu na konvencionalne mjerne transformatore: nižu cijenu, smanjene troškove i pojednostavljenu instalaciju, visoku točnost mjerenja, malu veličinu, unutarnju sigurnost, povećanu pouzdanost, a temeljna razlika između optičkog mjernog transformatora i konvencionalnog jest elektroničko sučelje ili međusklop potreban za njegovo obavljanje funkcije.

Sučelje je potrebno za funkciju očitavanja vrijednosti i predstavljanja očitane vrijednosti prema standardu. Kod novijih vrsta mjernih transformatora optička se vlakna koriste za prijenos signala i imaju široku primjenu, posebice u području elektrotehnike i komunikacijske tehnologije. Optička vlakna imaju niske gubitke i otporni su na elektromagnetske smetnje.

Optički signal koji emitira LED dioda pretvara se u dva linearno polarizirana signala u optoelektroničkom uređaju i šalje kroz optičko vlakno. Budući da se na ulazu u vlakno nalazi

polarizator, svjetlost koja prolazi kroz vlakno je polarizirana. Svjetlost ostaje unutar jezgre optičkog vlakna zbog apsolutne unutarnje refleksije, što uzrokuje da se optičko vlakno ponaša kao cilindrični dielektrični svjetlovod.

Nekonvencionalni se mjerni transformatori kod mjerenja struje i napona koriste pasivnim mjernim sustavima koji koriste Kerr, Hall, Pockels i Faraday efekte, zbog čega se, za razliku od konvencionalnih mjernih transformatora, učinak rezultata dobiva na mnogo jednostavniji i točniji način.

U nadolazećim godinama novi mjerni transformatori trebali bi naići na manje zatvoren pristup korisnika u energetske industriji. S obzirom na sve prednosti koje imaju, pretpostavlja se početak globalnog korištenja u inozemstvu i u našim EES elektranama. Trenutno koliko je poznato nisu još instalirane na našem području Hrvatske. [\[22\]](#)

7. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog završnog rada je obraditi, ali i napraviti usporedbu konvencionalnih i nekonvencionalnih visokonaponskih mjernih transformatora.

Ono što svi naponski mjerni transformatori moraju ispuniti jest transformirati izmjerene napone u skoro pa konstantnom omjeru i bez faznih pomaka u vrijednosti koje odgovaraju napajanju mjernih instrumenata, kao i opremi za zaštitu i regulaciju.

Strujni se transformatori koriste u svrhu mjerenja struje u strujnom krugu. Prevelika struja razlog je zašto nije dopušten izravni priključak mjernih instrumenata, čime se nastoji što vjernije, uz konstantan omjer i sa što manjim faznim pomakom, pretvoriti izmjerenu struju u izmjerenu vrijednost prikladnu za uobičajene metode mjerenja malih struja.

Konvencionalne izvedbe su jednostavne, dugog radnog vijeka i cijena im je prihvatljiva stoga imaju veliku potražnju na tržištu.

Nekonvencionalne izvedbe imaju kvalitetu, ali razvoj im je usporen sve dok su prisutne konvencionalne izvedbe.

Na točnost utječu pogreška instrumenata i fazna pogreška. Kod naponskog transformatora se javlja naponska pogreška, dok kod strujnog transformatora strujna pogreška. Ukupna pogreška se uzima kao zbroj navedenih pogrešaka.

Mjerni transformatori mogu služiti i za mjerenje i za zaštitu. Točnost i sigurnost su dvije glavne karakteristike strujnih i naponskih transformatora. Klasa točnosti mjernog transformatora određuje se prema iznosu njegove naponske i fazne pogreške, što je manja fazna i naponska pogreška to je bolja preciznost mjernog transformatora.

U okviru rada su predstavljeni i uspoređeni konvencionalni i nekonvencionalni mjerni transformatori te su prikazani njihovi principi rada, karakteristike i izvedbe i međusobno su uspoređeni te su navedene njihove prednosti, nedostaci i načini na koje se vrše mjerenja.

Unatoč brojnim smjenama generacija VN sustava i opreme mjerni transformatori se već jako dugo skoro ni malo mijenjali.

U nadolazećim godinama nekonvencionalni mjerni transformatori trebali bi naići na manje zatvoren pristup korisnika u energetske industriji. S obzirom na sve prednosti koje imaju, pretpostavlja se početak globalnog korištenja u inozemstvu i u našim EES elektranama. Trenutno koliko je poznato nisu još instalirane na našem području Hrvatske.

Tehnologija napreduje te je po mom osobnom mišljenju potrebno okrenuti se ka ekološki održivijim vrstama mjernih transformatora koje su financijski isplativije ali da je naglasak na točnosti i preciznosti.

U sklopu pisanja završnog rada na ovu temu posjetio sam tvornicu Končar u Zagrebu gdje sam imao priliku uživo vidjeti visokonaponske konvencionalne mjerne transformatore. U tvornici Končar naponski mjerni transformator i kombinirani otporni su na ferorezonanciju i rasprsnuće zahvaljujući dizajnu otvorene jezgre.

Trench i ABB group pružaju svijetlu budućnost razvoja nekonvencionalnih transformatora.

Brojne su dobre stvari nekonvencionalnih transformatora, među kojima se ističu sljedeće: sigurnost, bez ograničenja magnetiziranja struja, točnost, odlični za okoliš, male veličine i mase, fleksibilnost u montaži, donose izrazito manje troškove, jednostavnost održavanja, kompatibilnost, digitalizirano i omogućeno praćenje u stvarnom vremenu. Također, obrada i pohrana podataka su im brže i više, smanjuju vrijednosti struje u mili ampere, jezgra im nije od feritnih materijala zbog čega ne dolazi do pregrijavanja, jednostavna im je ugradnja i sl. Svjetlo vodi posjeduju brojne pozitivne strane u usporedbi s bakrenim vodičima: mala im je dimenzija i masa, ogromnog su kapaciteta prijenosa informacija, odličnih dielektričnih svojstava i otporni su na elektromagnetske smetnje. Iznimna rješenja za svjetlovodni optički strujni senzor prikazana su skupa uz Rogovskijev svitak i elektronički naponski transformator u originalnim rješenjima koja odlikuju značajnim operativnim performansama, ekološkim, sigurnosnim i inženjerskim koristima kod transformatora, a da pritom podržavaju sva naredna ulaganja u transformatore.

Nekonvencionalni mjerni transformatori mogu se pohvaliti poboljšanom kvalitetom i izvedbom koja pomaže nastavku rasta digitalnog mjerenja struje i napona, čime se zamjenjuje tradicionalna izgradnja transformatora globalno. Međunarodnom suradnjom, na tržištu su postojane unikatne kombinacije rješenja za mjerenje, kao i one koje služi zaštiti visokonaponskih transformatora.

LITERATURA

[1] Bego, V: Mjerenja u elektrotehnici, Školska knjiga, Zagreb, 1977. (263.-293.) Mjerni transformatori

[2] Rajko Misita, Električna Postrojenja Sarajevo, 1975. (58.-71.) Mjerni transformatori

[3] Pfiffner group – Kapacitivni naponski transformator, s Interneta

<https://www.pfiffner-group.com/products-solutions/details/capacitive-voltage-transformer-ecf>

[4] Ieeexplore Access (3. str.), s Interneta- Induktivni naponski transformator

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9580847>

[5] Dzm.hr. – tipno odobrenje – prilog(1.-3. str.), s Interneta

<https://dokumen.tips/documents/tipno-odobrenje-dzmhr-odobrenjat-mjerni-transformatori-prilog-tipnom-odobrenju.html?page=5>

[6] K. Bičanić, I. Kuzle., T. Tomiša: Nekonvencionalni mjerni pretvarači // *Energija*, 55 (2006), 3; 328-351 (Hrcak (str.1-24.) Fakultet elektrotehnike i računarstva (17.str.) Rogowski svitak.

<https://hrcak.srce.hr/file/7441>

[7] Trench – Group, Opis Optičkog strujnog mjernog transformatora, S interneta

<https://trench-group.com/products/optical-current-transformers/>

[8] Trench – Group, Slika Optički strujni mjernu transformatori (1. – 4. str.)

<https://trench-optical.com/wp-content/uploads/2021/07/optical-current-transformer.pdf>

[9] Abb – Group Focs(Fiber optički strujni senzor) senzor brošura (1. – 10 str.), s Interneta

<https://pdf.directindustry.com/pdf/abb-motors-drives-power-electronics/abb-focs-brochure/30286-180460.html>

[10] Končar – mjt.hr, Jednopolno i dvopolno izolirani naponski transformatori (1.-2.str.)

http://www.koncar-mjt.hr/docs/koncarmjtHR/documents/33/1_0/Original.pdf

[11] Scribd, napon koraka i dodira (1. str.)

<https://www.scribd.com/document/205999196/2-0-Napon-Koraka-i-Dodira>

[12] Sigurnosne udaljenosti zone rada pod naponom i zone približavanja (Kod Članka 11. iznad tablica 1. (36 kV - 380kV))

https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2010_10_116_3058.html

[13] Enciklopedija.hr- Članak - Napon koraka, s Interneta.

<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=69808>

[14] Wikipedija – Način rada, s Interneta

https://hr.wikipedia.org/wiki/Transformator#Na%C4%8Din_rada

[15] S Doc. dr. sc. Ivan Leniček, Scribd - Cjelina-3-Posebne-Vrste-Mjernih-Transformatora (1. - 7. str.)

<https://www.scribd.com/document/355656202/Cjelina-3-Posebne-Vrste-Mjernih-Transformatora>

[16] Doc. dr. sc. Ivan Leniček Scribd - Cjelina-1-Mjerni-transformatori (1.-33. str.), s Interneta

<https://www.scribd.com/document/559933973/Cjelina-1-Mjerni-transformatori>

[17] Doc. dr. sc. Ivan Leniček, Scribd,-Nastavni Materijal, Elektrotehnička mjerenja, Fer, Sveučilište u Zagrebu(1 – 73. str.), s Interneta

<https://www.scribd.com/doc/235907893/ELEMJE-Nastavni-materijal-Leniccek>

[18] Tehnicki.Izmk.hr, Tehnički leksikon (2007), Shematski prikaz transformatora, s Interneta

<https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/transformator>

[19]Končar- mjt.hr. Original, presjek strujnog transformatora (72.5 – 800 kV),(1. – 4. str. (3.str.))

http://www.koncar-mjt.hr/docs/koncarmjtHR/documents/35/1_0/Original.pdf

[20] Končar- mjt.hr. Original, presjek kombiniranog transformatora (72.5 – 550 kV),(3.str.))

http://www.koncar-mjt.hr/docs/koncarmjtHR/documents/53/1_0/Original.pdf

[21] Metrologija: Uvjerenje o odobrenju tipa mjerila,Transformator strujni mjerniAGU-38(2.str.)
Natpisna pločica(9. str.)

<https://metrologija.me/wp-content/uploads/OT/T-01/MNE-T-01-021.pdf>

[22] Nekonvencionalni-mjerni-transformatori,(1. – 58. str.) (58. str.Zaključci)

<https://pdfcoffee.com/ncit-nekonvencionalni-mjerni-transformatori-pdf-free.html>

[23] Grupa ABB katalog - Sustav optičkog strujnog transformatora – MOCT - P (1. – 6. str.)

<https://pdf.directindustry.com/pdf/abb-ag/moct-p-optical-current-transformer-system/70728-183811.html>

[24] Wikipedija – Transformator, Način rada, s Interneta

https://hr.wikipedia.org/wiki/Transformator#Na%C4%8Din_rada

[25] Tehnička enciklopedija - Mjerni transformatori (1. – 12. str.), s Interneta

https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/mjerni_transformatori.pdf

[26] Trench Group Opis, indeks,

<https://trench-group.com/index.php>

[27] Zakon-o-mjeriteljstvu

<https://www.zakon.hr/z/699/Zakon-o-mjeriteljstvu>

[28] Ispitni transformatori

<https://ba.transformer-tester.com/info/difference-between-test-transformer-and-ordina-77246042.html> Ispitni transformatori

[29] Končar_Priručnik

<https://pdfcoffee.com/tehnicki-prirucnik-koncar-pdf-pdf-free.html>

SAŽETAK

Ovaj rad bavi se konvencionalnim i nekonvencionalnim visokonaponskim strujnim i naponskim mjernim transformatorima, koji su uspoređeni sa stajališta upotrebe, što je i ilustrativno opimjereno. Mjerni su transformatori uređaji za mjerenje i zaštitu u visokonaponskim postrojenjima.

Obraditi i usporediti jedne i druge međusobno i dati pojedine zaključke.

Ključne riječi: Mjerni transformatori, konvencionalani mjerni transformatori, nekonvencionalni mjerni transformatori

ABSTRACT

This paper deals with conventional and non-conventional high-voltage current and voltage measuring transformers, which are compared from the point of view of use, which is also illustratively exemplified. Measuring transformers are devices for measurement and protection in high-voltage plants.

Process and compare each other and give individual conclusions .

Keywords: Measuring transformers, conventional measuring transformers, non-conventional measuring transformers

ŽIVOTOPIS

Autor ovog završnog rada, Matej Gajčević, rođen je 20. rujna 1994. godine u Vinkovcima u Republici Hrvatskoj. Nakon završene Osnovne škole Vladimira Nazora pohađao je Srednju tehničku školu Ruđera Boškovića u Vinkovcima, smjer Računalni tehničar u strojarstvu. Trenutno je student stručnog studija elektroenergetike na Fakultetu elektrotehnike u Osijeku.