

Kvarovi i načini zaštite trofaznih energetskih transformatora

Kovačević, Toni

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:200:008166>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**

Repository / Repozitorij:

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



**FSVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Stručni studij, elektroenergetika

**KVAROVI I NAČINI ZAŠTITE TROFAZNIH
ENERGETSKIH TRANSFORMATORA**

Završni rad

Toni Kovačević

Osijek, 2024.

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

Ime i prezime pristupnika:	Toni Kovačević
Studij, smjer:	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer
Mat. br. pristupnika, god.	A4677, 27.07.2021.
JMBAG:	0165088808
Mentor:	dr. sc. Željko Špoljarić
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	dr. sc. Krešimir Miklošević
Član Povjerenstva 1:	dr. sc. Željko Špoljarić
Član Povjerenstva 2:	Zorislav Kraus, dipl. ing. el.
Naslov završnog rada:	%naziv_rada%
Znanstvena grana završnog rada:	Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rada:	
Datum ocjene pismenog dijela završnog rada od strane mentora:	05.09.2024.
Ocjena pismenog dijela završnog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane završnog rada:	13.09.2024.
Ocjena usmenog dijela završnog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena završnog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio stručni prijediplomski studij:	13.09.2024.

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

Osijek, 13.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Toni Kovačević
Studij:	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	A4677, 27.07.2021.
Turnitin podudaranje [%]:	10

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Kvarovi i načini zaštite trofaznih energetskih transformatora**

izrađen pod vodstvom mentora dr. sc. Željko Špoljarić

i sumentora

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

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

Potpis pristupnika:

Sadržaj

1. UVOD	1
2. OSNOVNO O TROFAZNYM ENERGETSKIM TRANSFORMATORIMA.....	3
2.1. Jednofazni transformator	3
2.1.1. Amperov kružni zakon (zakon protjecanja)	5
2.1.2. Faraday – Lenzov zakon (zakon elektromagnetske indukcije).....	5
2.2. Tri jednofazna transformatora ili jedan trofazni transformator	6
2.3. Izvedbe primarnog i sekundarnog namota trofaznog energetskog transformatora	7
2.4. Fazni i linijski napon.....	9
3. KVAROVI TROFAZNYH ENERGETSKIH TRANSFORMATORA	10
3.1. Dielektrički kvarovi	10
3.1.1. Ispitivanje izolacijskog otpora transformatora	11
3.1.2. Proboji između faza.....	13
3.1.3. Spoj među zavojima iste faze	13
3.1.4. Kratko spojeni krug u jezgri.....	15
3.2. Električki kvarovi	15
3.3. Elektrodinamički kvarovi	16
3.4. Termički kvarovi.....	17
3.5. Mehanički kvarovi	21
3.5.1. Curenje transformatorskog ulja	22
4. ZAŠTITA TROFAZNYH ENERGETSKIH TRANSFRORMATORA.....	25
4.1. Zaštita od vanjskih prenapona	26
4.1.1. Odvodnici prenapona	26
4.1.2. Zaštitna iskrišta	28
4.2. Zaštita od struja kratkog spoja i preopterećenja.....	29
4.2.1. Prekidači	29
4.2.2. Osigurači.....	32
4.2.3. Nadstrujni relej	32
4.2.4. Kontaktni termometar	33
4.2.5. Termoslika	34
4.3. Zaštita od kvarova u transformatoru	35
4.3.1. Buchholzova zaštita	35
4.3.2. Diferencijalan zaštita.....	38
4.3.3. Ostali oblici zaštite od kvara u transformatoru	40

5. ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA	42
SAŽETAK	45
ABSTRACT.....	45
ŽIVOTOPIS	46

1. UVOD

Električna energija neizostavan je dio suvremenog života te igra ključnu ulogu u gotovo svim aspektima društva, od industrijske proizvodnje, preko kućanskih aktivnosti do provođenja slobodnog vremena. Porastom potražnje električne energije, pouzdan i učinkovit elektroenergetski sustav postao je ključan faktor naše svakodnevice.

Upravo zbog toga, trofazni elektroenergetski transformatori, koje prolazimo u ovakvom sustavu, zaslužuju da se o njima vodi posebna briga kako bi ih se zaštitilo, odnosno kako bi se prevenirali njihovi kvarovi. Energetski transformatori, statički su električni uređaji koji prenose energiju s jednog nivoa napona na mrežu različitog ili istog nivoa napona [1]. Transformatore generalno možemo pronaći u raznim područjima, od elektronike pa sve do elektroenergetike te su oni izvedeni na različite načine.

Konkretno trofazni energetski transformator specifičan je tip transformatora namijenjen radu u trofaznim sustavima za prijenos i distribuciju električne energije. Trofazna električna mreža sastoji se od visokonaponskih vodova i kabela, energetskih transformatora i druge opreme [2]. Prijenos se vrši na visokim naponskim razinama upravo zbog smanjenja gubitaka, odnosno radi veće učinkovitosti samog elektroenergetskog sustava. Upravo u slučaju podizanja naponske razine prije prijenosa te spuštanja naponske razine kod potrošača elektroenergetski transformatori igraju ključnu ulogu.

U slučaju kvara, odnosno ispadanja transformatora iz pogona, velik broj trošila ostaje bez električne energije. Ponovno puštanje transformatora u pogon može trajati satima pa čak i danima što je dug vremenski period koji sa sobom nosi velike financijske troškove, bilo aktivne (odnosi se na konkretan popravak ili zamjenu transformatora ili nekog drugog elementa mreže koji je stradao) ili pasivne (financijski gubici u postrojenjima, industrijama i sl. uzrokovani nedostatkom električne energije za njihov normalan rad).

Frekvencija je veličina koja ostaje nepromijenjena dok su proizvodnja i potrošnja u balansu, ispadanjem velikog broja trošila, dolazi do velike proizvodnje i male potrošnje što izaziva disbalans i promjenu vrijednosti frekvencije sustava [3]. Pored svih ovih potencijalnih opasnosti, u slučaju kvara energetskih transformatora također može doći do požara, eksplozija, izlivanja

transformatorskog ulja, emisija štetnih plinova i slično [4]. Na sve ove potencijalne kvarove možemo utjecati te ih svesti na minimum.

Tema ovog završnog rada upravo i je usmjeravanje pažnje na različite vrste kvarova energetskih transformatora. Kada smo upoznati s problemima, u ovom slučaju s kvarovima energetskog transformatora, učinkovitije ih možemo prevenirati korištenjem prikladnih oblika zaštite ovisno o preduvjetima situacije. Ako je kvar već nastao, brže i efikasnije se može sanirati postavimo li dobru dijagnozu. Upravo zbog toga, nakon uvoda, u ovom završnom radu detaljnije će biti opisani mogući kvarovi koje možemo podijeliti na dielektričke, električke, elektrodinamičke, termičke i mehaničke. Prije samih kvarova, detaljnije će biti opisani osnovni principi rada trofaznih energetskih transformatora. Nakon detaljnije analize svakog od navedenih kvarova, na red dolazi sama zaštita. Detaljnije će biti opisani zadaci zaštite, podjela zaštite u 3 osnovne skupine koje su: zaštita od vanjskih prenapona, zaštite od struja kratkog spoja i preopterećenja te zaštite od kvarova u transformatoru. U slučaju zaštite od kvarova u transformatoru, najprisutniji su Buchholzov relej pa će baš zato biti detaljnije analiziran.

2. OSNOVNO O TROFAZNYM ENERGETSKIM TRANSFORMATORIMA

Trofazni energetska transformatori su transformatori kompleksnije izvedbe, zato bi se ponajprije bilo dobro upoznati s jednofaznim transformatorima i tako postupno doći do principa rada trofaznih energetskih transformatora.

2.1. Jednofazni transformator

Transformator je električni uređaj koji služi za prijenos i distribuciju električne energije putem magnetske indukcije. Osnovni dijelovi transformatora su:

- a) jezgra,
- b) primarni namot,
- c) sekundarni namot,
- d) sonstrukcijski dio,
- e) izolacijski dio.

Od ovih dijelova transformatora, pod aktivne dijelove smatramo jezgru te primarni i sekundarni namot zato što oni direktno sudjeluju u transformaciji.

Jezgra se slaže od limova koji moraju biti međusobno izolirani (izolacija se nanosi samo na jednu stranu lima te se samo izoliranje provodi prije mehaničke obrade) [1]. Razlog zašto se ne koristi samo blok nekakvog feromagnetskog materijala, već lamelirani limovi jest taj što se na ovaj način smanjuje struja koja teče jezgrom (govorimo o realnom transformatoru, u stvarnosti ne možemo postići da je ona nula, ali ju možemo minimalizirati) te kako bi se smanjila temperatura zagrijavanja. Kada se ne bi koristili lamelirani limovi, jezgra bi postizala puno više temperature za vrijeme rada [5].

Primarni namot jest zavojnica koja je povezana s izvorom napajanja. Kada izmjenična struja teče kroz primar, stvara se promjenjivo magnetsko polje u jezgri transformatora koje inducira napon u sekundarnom namotu.

Sekundarni namot s druge strane je povezan s trošilom (potrošačem), U njemu se inducira napon zahvaljujući promjenjivom magnetskom polju iz primarnog namota. Inducirani napon može biti niži ili viši od ulaznog napona, ovisno o omjeru zavoja između primarnog i sekundarnog namota po jednadžbi (2-1) [1]:

$$U_1 : U_2 = N_1 : N_2 \quad [2-1]$$

Gdje su:

U_1 – inducirani napon primara,

U_2 – inducirani napon sekundara,

N_1 – broj zavoja primara,

N_2 – broj zavoja sekundara.

Prividna snaga ostaje nepromijenjena zato što se smanjenjem napona povećava struja, njihov umnožak ostaje isti, kao što je prikazano u jednadžbi (2-2) [1]:

$$S_1 = S_2 \quad [2-2]$$

$$U_1 * I_1 = U_2 * I_2$$

Gdje su:

S_1 – prividna snaga primara,

S_2 – prividna snaga sekundara,

I_1 – struja primara,

I_2 – struja sekundara.

Kada se radi o transformatorima postoje dva fizikalna zakona koja pobliže opisuju njihov princip rada, a to su Amperov kružni zakon (zakon protjecanja) te Faraday – Lenzov zakon (zakon elektromagnetske indukcije).

2.1.1. Amperov kružni zakon (zakon protjecanja)

Amperov kružni zakon povezuje jakost magnetskog polja i električnu struju prema jednadžbi (2-3). Određuje da je linijski integral jakosti magnetskog polja H po bilo kojoj zatvorenoj krivulji jednak ukupnoj struji koja teče kroz površinu omeđenu krivuljom [6]:

$$\oint_{c_s} H \cdot dl = \int_s J \cdot n dS = \theta \quad [2-3]$$

Gdje su:

H – jakost magnetskog polja [A/m],

dl – infinitezimalni dio zatvorene krivulje [m],

J – gustoća provodnih struja u vodičima [A/m²],

ndS – jedinični vektor okomit na infinitezimalni dio površine [m²],

θ – strujno protjecanje [A] [7].

2.1.2. Faraday – Lenzov zakon (zakon elektromagnetske indukcije)

Faradayev zakon i Lenzovo pravilo zajedno opisuju kako se inducira napon u vodiču kad se mijenja magnetski tok kroz njega te u kojem će smjeru teći inducirana struja.

Faradayev zakon govori da je napon induciran u vodiču proporcionalan brzini promjene magnetskog toka koji prolazi kroz vodič, a prikazan je na jednadžbi (2-4) [8]:

$$e(t) = - \frac{d(\phi)(t)}{dt} \quad [2-4]$$

Gdje su:

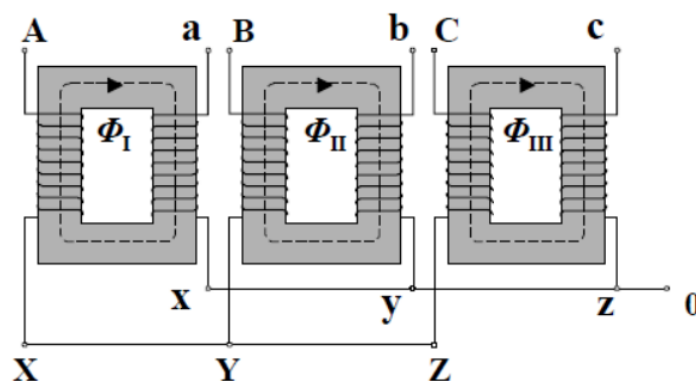
e - inducirana elektromotorna sila [V],

$d(\phi)(t)$ – derivacija magnetskog toka po vremenu [Wb/s].

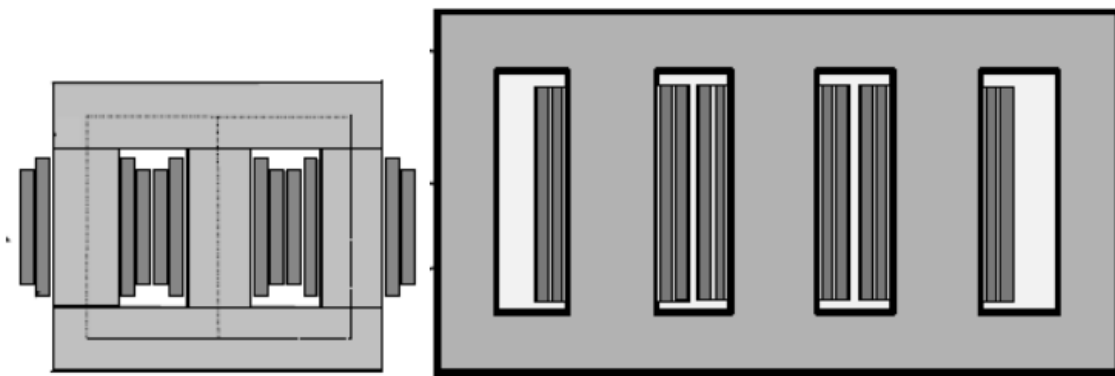
2.2. Tri jednofazna transformatora ili jedan trofazni transformator

Tri jednofazna transformatora su u stanju obavljati gotovo iste zadatke kao i jedan trofazni transformator, ali postoje razlike. Mana trofaznog jezgrastog transformatora u odnosu na tri jednofazna je ta što ima nesimetričan magnetski krug, ali unatoč toj manji prednosti ima puno više [9]. Prikaz tri jednofazna transformatora nalazi se na slici 2.1., dok su prikazi trofaznog trostupnog jezgrastog transformatora, kao i prikaz ogrnutog transformatora prikazani na slici 2.2. Trofazni jezgrasti transformator treba ukupno manje željeza (cca 15 % manje) nego za tri jednofazna transformatora. Tu govorimo o uštedi aktivnog materijala koji direktno smanjuje cijenu. U slučaju tri jednofazna transformatora potrebno je više provodnih izolatora što takvu izvedbu čini cca 20 % skupljom [1].

Upravo zbog tih razloga, u prijenosu i distribuciji mnogo su zastupljeniji trofazni energetske transformatori.



Slika 2.1. Prikaz tri jednofazna transformatora u trofaznom spoju [10]



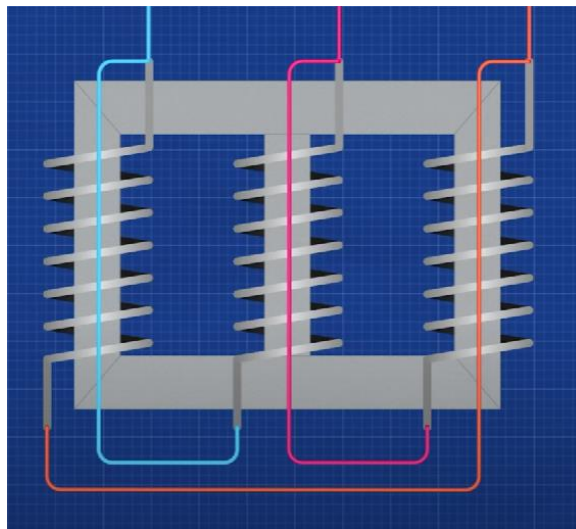
Slika 2.2. Prikaz trofaznog trostupnog jezgrastog i ogrnutog tipa transformatora [10]

2.3. Izvedbe primarnog i sekundarnog namota trofaznog energetskog transformatora

Kada govorimo o načinu izvedbe transformatora s obzirom na izvedbu primara i sekundara, razlikujemo nekoliko načina. Transformator se izvodi na način koji nam je u određenom trenutku i okruženju potreban. Način izvedbe namota se nalazi na natpisnoj pločici transformatora.

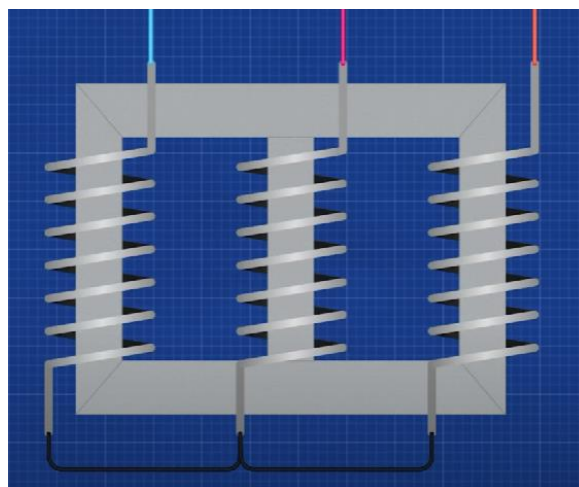
Primar može biti izveden na 2 načina a to su spoj Δ (delta) kao što vidimo na slici 2.3. te spoj Y (zvijezda) koji je prikazan na slici 2.4..

Spoj Δ (delta) primara:



Slika 2.3. Delta spoj primara [5]

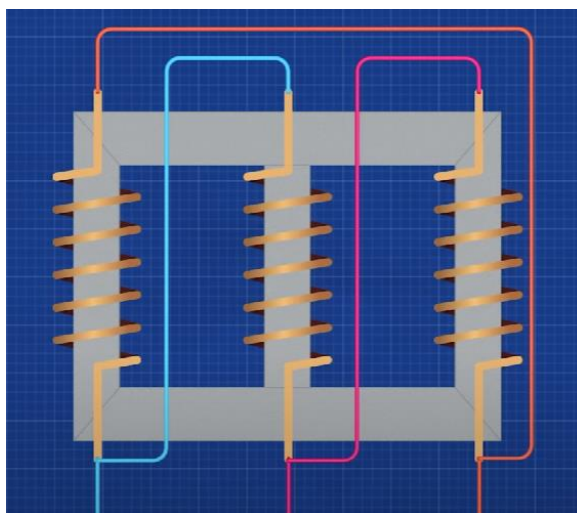
Spoj Y (zvijezda) primara:



Slika 2.4. Zvijezda spoj primara [5]

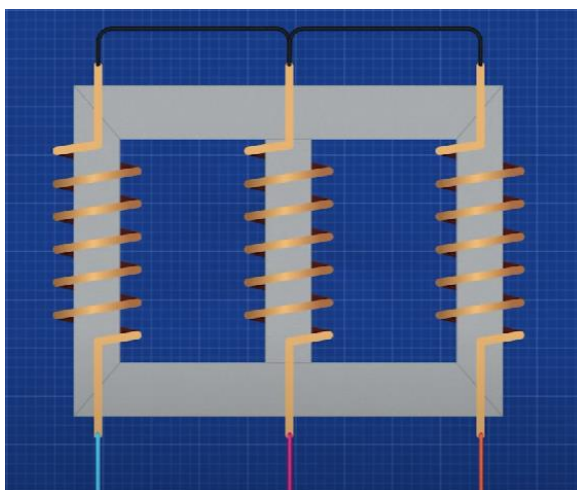
Isto tako i sekundarni namot, na slici 2.5. delta spoj te na slici 2.6. zvijezda spoj.

Spoj Δ (delta) sekundara:



Slika 2.5. Delta spoj sekundara [5]

Spoj Y (zvijezda) sekundara:



Slika 2.6. Zvijezda spoj sekundara [5]

Kada je sekundar transformatora u spoju Y (zvijezda) s N vodičem iz zvjezdišta, tada se napajati mogu i trofazna i jednofazna trošila. Jednofazna su povezana preko jedne od faza i N vodiča, a trofazna su povezana putem 3 faze. O tome i ovisi kako se izvodi sekundar, ovisno o onome što nam treba sa strane potrošača. Spoj Δ (delta) sekundara pogodan je isključivo za trofazne

potrošače, zato se on najčešće koristi kada nam je potreban prijenos većih snaga kao npr. u industrijskim postrojenjima, pogonima i slično [5].

2.4. Fazni i linijski napon

U trofaznim električnim sustavima razlikujemo fazni i linijski napon. Fazni napon je napon između bilo koje faze i N vodiča (neutralne točke). Fazni napon je niži od linijskog za $\sqrt{3}$ i koristi se za napajanje manjih trošila kao što su jednofazni kućanski uređaji.

Linijski napon je napon između dviju faza. U trofaznom sustavu linijski je napon veći od faznog za $\sqrt{3}$ kao što vidimo u jednadžbi (2-5). Najčešće se koristi za napajanje trofaznih uređaja u industrijskim postrojenjima gdje su potrebne veće snage.

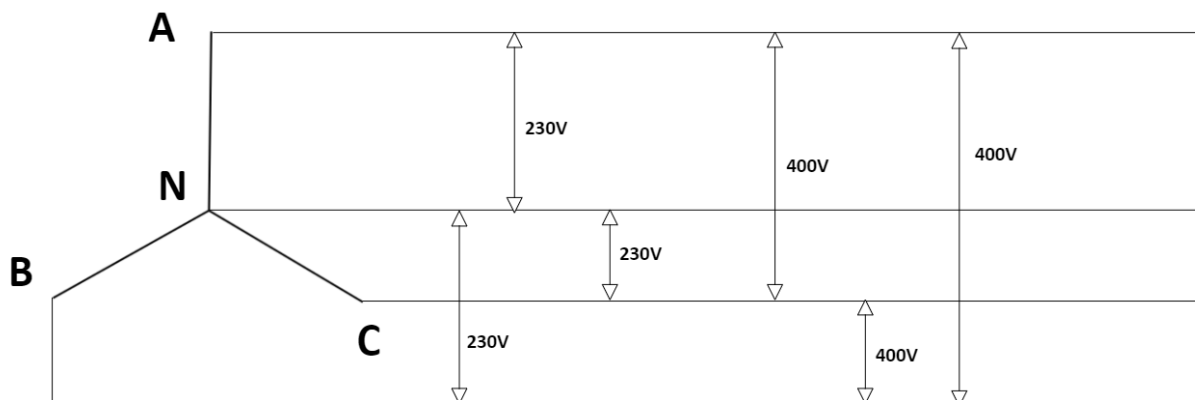
$$U_l = \sqrt{3} \cdot U_f \quad [2-5]$$

Gdje su:

U_l – linijski napon,

U_f – fazni napon.

U Hrvatskoj, napon mreže iznosi 230/400V, što znači 230V faznog napona, odnosno 400V linijskog, a upravo ti naponi prikazani su na shematskom prikazu faznog i linijskog napona na slici 2.7.



Slika 2.7. Prikaz faznog i linijskog napona

3. KVAROVI TROFAZNIH ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Kao što je ranije napomenuto, trofazni energetske transformatori ključni su elementi elektroenergetskog sustava. Upravo zbog toga, njihova pouzdanost i dugovječnost od vitalne su važnosti za stabilnost čitavog sustava. Unatoč napretku tehnologije i sve boljim i boljim tehničkim izvedbama trofaznih energetske transformatora i dalje su podložni različitim vrstama kvarova koji mogu značajno utjecati na njihovu funkcionalnost, sigurnost te troškove održavanja i popravaka. U ovom poglavlju detaljnije su razrađeni najčešći oblici kvarova koji se javljaju u trofaznim energetske transformatorima, kao što su analizirani njihovi uzroci, a i posljedice koje dolaze nakon njih.

Pet osnovnih i najčešćih oblika kvarova su:

- a) dielektrički kvarovi (proboji izolacije),
- b) električki kvarovi (loši kontakti na priključcima ili regulacijskoj preklopki),
- c) elektrodinamički (sile kratkog spoja),
- d) termički (pregrijavanje, lokalna pregrijavanja, termičko starenje izolacije),
- e) mehanički (vibracije, curenje, pogrešno djelovanje regulacijske preklopke) [1].

3.1. Dielektrički kvarovi

Među najtežim kvarovima koji se mogu dogoditi na trofaznim energetske transformatorima upravo su dielektrički kvarovi, odnosno proboji izolacije koji se mogu dogoditi na različitim mjestima u transformatoru:

- a) proboji namota prema tijelu (masi) transformatora,
- b) proboj između visokonaponskog i niskonaponskog namota,
- c) proboj između faza,
- d) spoj među zavojima iste faze,
- e) kratko spojeni krug u jezgri [1].

Ne postoji samo jedan oblik proboja, treba ih razlikovati te stoga razlikujemo proboj od prenapona i proboj od udarnih valova većih snaga [1].

Proboj od prenapona najčešće nema dovoljno snage da razvije i podrži električni luk. On odmah nestane, a probijeno mjesto se odmah zalije uljem i ostane dovoljno čvrsto za pogonski napon i rad dok ljudi odgovorni za održavanje konkretnog transformatora ne reaguju i poprave novonastali kvar. Na slici 3.1. nalazi se transformator na čiji kvar nije pravovremeno odreagirano te se vide njegove fatalne posljedice.

Kod proboja od udarnih valova veće snage ili pogonskih prenapona električni luk se odmah razvija i zbog prevelikih temperatura topi bakar.



Slika 3.1. Posljedice kasnog reagiranja na kvar kratko spojenog kruga u jezgri

3.1.1. Ispitivanje izolacijskog otpora transformatora

Ispitivanje izolacijskog otpora transformatora najčešće se vrši neposredno nakon instalacije novog energetskog transformatora ili kada se sumnja na kvar transformatora.

Postoji više različitih načina kojima se može utvrditi kvaliteta i kakvoća same izolacije, iako se metode pomalo razlikuju, većina ih se bazira na sličnom principu. Ova metoda ispitivanja izolacijskog otpora se komercijalno naziva i Megger test (po firmi Megger koja proizvodi uređaje

za ispitivanje(Sl.3.2.)), a bazira se na tome da se pomoću uređaja na koji su spojene pipalice ispitujemo izolaciju između:

- a) primarnog namota i sekundarnog namota,
- b) primarnog namota i feromagnetske jezgre,
- c) sekundarnog namota i feromagnetske jezgre,
- d) primarnog/sekundarnog namota i metalnog kućišta transformatora,
- e) primarnog/sekundarnog namota i voda za uzemljenje [11].



Slika 3.2. Fotografija Megger uređaja [12]

Pipalice uređaja postavljaju se na način da se vrh jedne postavi npr. na priključak primarnog namota, a druga na priključak sekundarnog namota. Nakon toga namjestimo mjerno područje na samom uređaju te pokrenemo test pritiskom na tipku „test“. Nakon pokretanja testiranja, uređaj očitava vrijednost otpora između ova dva elementa trofaznog energetskog transformatora [11].

Prihvatljive vrijednosti otpora izolacije za transformatore variraju ovisno o nazivnom naponu transformatora i ovisno o različitim normama u različitim dijelovima svijeta, ali opće pravilo je da otpor izolacije treba biti najmanje 100 puta veći od radnog napona transformatora.

Npr. ukoliko je na namotu radni napon 10kV, njegova izolacija bi minimalno trebala biti 1 M Ω .

Gore navedeni postupak se ponavlja za sve gore navedene kombinacije koje je potrebno ispitati, ako se sve ispostavi zadovoljavajuće, izolacija transformatora je u dobrom stanju i transformator može biti pušten u pogon [11].

3.1.2. Proboji između faza

Do proboja između faza u trofaznom sustavu može doći zbog više faktora, a najčešći su:

- a) Izolacijski kvarovi – Ovo je ujedno i najčešći uzrok proboja između faza. Izolacijski materijali s vremenom gube svoja izolacijska svojstva zbog topline, starenja, vlage ili nekog drugog mehaničkog oštećenja. Gubitkom svoje kvalitete u jednom trenutku može doći do proboja.
- b) Prenapon – Najčešći uzrok prenapona su atmosferska pražnjenja, odnosno gromovi zbog kojih se naponska vrijednost može popeti na vrijednost koja premašuje dielektričnu čvrstoću dielektrika (izolatora). Prenapon opet može dovesti do lokalnih puknuća izolacije što uzrokuje sam proboj.
- c) Pregrijavanje – Dugotrajnim preopterećenjem ili lošim sustavom hlađenja postižu se temperature veće od predviđenih za radnu okolinu. Ovo također uzrokuje oštećenje izolacije koje uzrokuje proboj među fazama.

Od ostalih potencijalnih razloga proboja među fazama pojavljuju se još mehanički vanjski utjecaji (npr. vibracije). Također u slučaju taloženja prljavštine, prašine, vlage ili ulja može doći do stvaranja puta za električno pražnjenje među fazama [13].

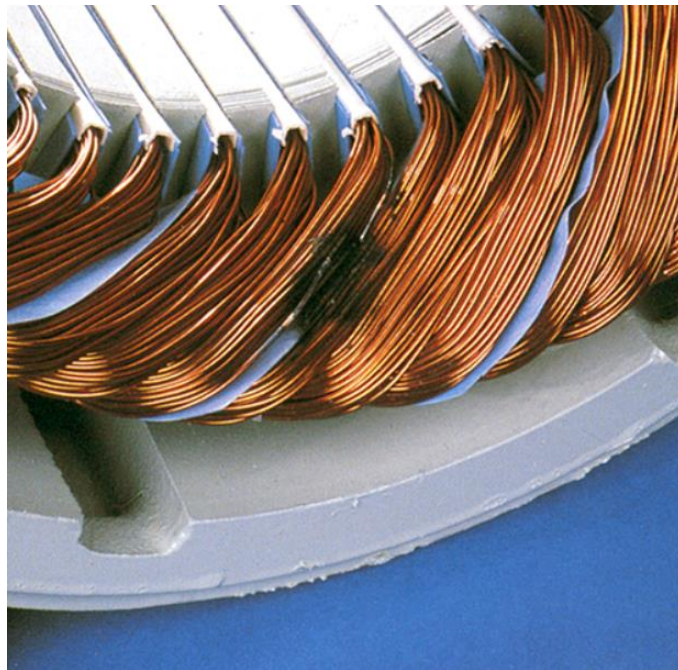
3.1.3. Spoj među zavojima iste faze

Proboj između zavoja na istom namotu trofaznog transformatora je ozbiljan kvar koji može značajno smanjiti pouzdanost i vijek trajanja transformatora. Do ovog kvara dolazi u slučaju

proboja izolacije između 2 ili više susjednih zavoja (Sl.3.3.). Ovaj kvar najčešće rezultira lokalnim kratkim spojem, pregrijavanjem, deformacijom namota te samim kvarom transformatora.

A uzroci nastanka su slični kao i u slučaju proboja između faza, odnosno starenjem izolacije koja gubi svoja dielektrična svojstva lakše dolazi do proboja između zavoja na istom namotu.

Osim toga razlog mogu biti različita električka, termička te mehanička opterećenja i oštećenja koja opet rezultiraju oštećenjem same izolacije [13].



Slika 3.3. Prikaz proboja zavoja međusobno [14]

Ova pojava se razlikuje s obzirom radili se o malom ili velikom transformatoru.

U slučaju manjih transformatora, ne razvija se električni luk jer je napon među zavojima malen.

Dolazi do zagrijavanja kratko spojenih zavoja čija je posljedica izgaranje izolacije, kratki spoj između zavoja te sve veće zagrijavanje vodiča uslijed struje kratkog spoja. Kvar se širi polako i može trajati do nekoliko minuta, a najlakši način za prepoznati ga je izgoren namot bez topljenja bakra.

U slučaju većih transformatora razvija se električni luk jer je napon među zavojima dovoljno velik. Bakar se topi, a kvar se širi velikom brzinom. Za ovaj kvar u slučaju velikih transformatora karakteristično je da izolacija izgori samo na mjestu gdje je nastao spoj među zavojima, a bakar se istopi [1].

3.1.4. Kratko spojeni krug u jezgri

Kratko spojeni krug u jezgri najčešće stvaraju loše izolirani vijci i tlačne ploče kojima je stegnuta jezgra. U većini slučajeva dolazi do topljenja željeza što za sobom vuče oštećenje jezgre. Ovaj kvar biva vrlo problematičan zato što oštećenu jezgru treba popraviti, a popravak je skup [1].

3.2. Električki kvarovi

Kada se radi o električkim kvarovima kod trofaznih energetskih transformatora, najčešće se radi o loše povezanim kontaktima na priključcima. Loše povezani kontakti mogu dovesti do pregrijavanja, povećanja otpora te većih gubitaka energije što se sve može smatrati kvarom na transformatoru.

Uzrok ovog kvara najčešće je starenje materijala, konkretno bakra i aluminijska, koji su sklони oksidaciji i korodiranju što uvelike utječe na kvalitetu kontakta na priključnicama. Osim starenja materijala, loše izvedeni spojevi također su razlog lošeg kontakta, a to konkretno mogu biti nepravilno zatezanje konektora, slabo zatezanje vijaka i slično [15].

Dobrim održavanjem preveniraju se ovakvi kvarovi koji se mogu na vrijeme prepoznati. Prevencijom smanjujemo i aktivne i pasivne troškove održavanja samog transformatora. Pod aktivne troškove smatraju se konkretno plaćanje dijelova i popravka transformatora dok su pasivni troškovi svi financijski gubici uzrokovani manjkom električne energije poradi kvara na transformatoru te isključenja iz pogona.

Preopterećenje na duže vrijeme može uzrokovati pregrijavanje koje može utjecati na kvalitetu spoja priključnica.

Ovakvi kvarovi mogu se prevenirati osim redovitim održavanjem i raznim drugim aktivnostima kao što su termografska analiza, odnosno korištenje termografske kamere za otkrivanje toplinskih povećanja na priključnicama i njezinim spojevima. Korištenjem priključnica veće kvalitete smanjuje se šansa za koroziju i oksidaciju materijala [16].

3.3. Elektrodinamički kvarovi

Kratki spojevi mogu se pojaviti u elektroenergetskom sustavu, a kada se to dogodi na sekundarnoj strani transformatora (na strani potrošača) struja kvara prolazi i kroz sam transformator. Elementi ključni za kontinuiran i efikasan rad elektroenergetskog sustava kao što su trofazni energetske transformatori moraju biti sposobni izdržati takve struje kvara [17].

Struja kvara puno je veća od nazivne struje transformatora. U najgorem slučaju, struja može biti visoka kao da je napon sustava primijenjen na priključnice primarnog namota, dok su priključnice sekundarnog namota kratko spojene. U tom slučaju jedino ograničenje biva impedancija transformatora.

Tako velike struje kao što su struje kratkog spoja u transformatoru uzrokuju mehanička i toplinska naprezanja.

Sile uzrokovane strujom kratkog spoja djeluju na vodiče unutar transformatora. Te sile ovise o vršnoj vrijednosti struje (najveće vrijednosti struje tijekom tog ciklusa), koja je obično najviša u prvim trenucima nakon nastanka kvara. Iako se vršne vrijednosti smanjuju protjecanjem vremena, proizvođač je dužan osigurati da takve sile ne oštete transformator.

O ovisnosti sile o struji najbolje nam govori formula za Lorentzovu silu koja glasi [17]:

$$F = l \cdot I \cdot B \cdot \sin(\theta) \quad [3-1]$$

Gdje su:

F – sila (Lorentzova) [N],

I – struja (u slučaju kratkog spoja, uvrštavamo nju) [A],

l – duljina vodiča u magnetskom polju [m],

B – gustoća magnetskog toka [T],

θ – kut između smjera struje i smjera magnetskog polja.

U prijašnjoj formuli vidimo kako je iznos sile proporcionalan iznosu struje.

Toplinsko opterećenje uzrokovano je visokom strujom koja teče te zagrijava transformator. Količina struje, kao i samo trajanje kvara doprinose zagrijavanju transformatora. Proizvođač je dužan osigurati kvalitetne komponente transformatora koje su otporne na ovakva zagrijavanja transformatora [17].

Veličina struje kvara ovisi o impedanciji transformatora, a konkretna ovisnost se nalazi u tablici 3.1.. Impedancija u postocima predstavlja omjer impedancije transformatora prema njegovoj nazivnoj snazi i naponu. Ta veličina je zapravo proporcionalna mjera naponskog pada na primaru kada je sekundar opterećen nazivnom strujom, a mjerena kao postotak od nazivnog napona

Tablica 3.1. Ovisnost struje kvara o impedanciji transformatora [17]

Impedancija transformatora	Povećanje struje kvara u odnosu na nazivnu
4 % Z	25 xI _n
5 % Z	20 xI _n
6 % Z	16,7 xI _n
7 % Z	14,3 xI _n
8 % Z	12,5 xI _n

Ako se transformator koristi pri naponu većem od nazivnog, kvar bi mogao uzrokovati veće struje od one za koju je transformator dizajniran što povećava i sile i zagrijavanje u transformatoru.

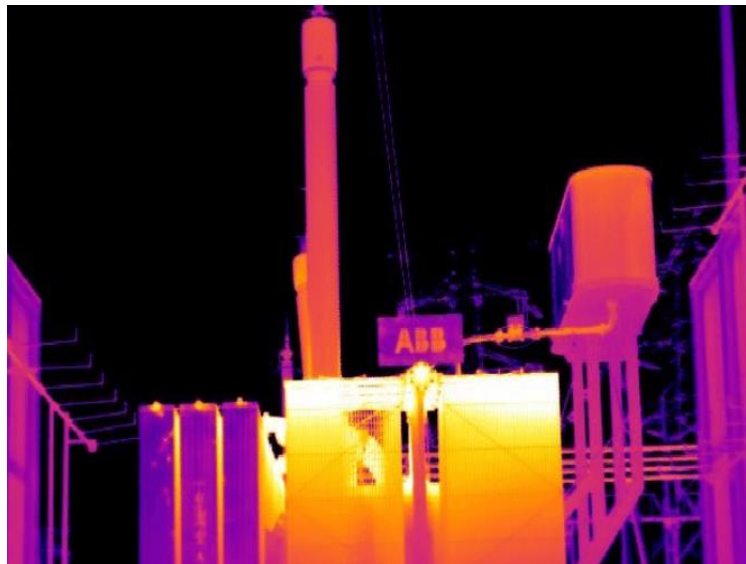
3.4. Termički kvarovi

Izolacija transformatora obično može izdržati temperature do 220°C. Standardi dopuštaju da pokrov kućišta transformatora može imati temperaturu do 65°C iznad temperature okoline. Do pregrijavanja dolazi onda kada temperature premašuju dozvoljene temperature izolacijskog sustava ili kućišta energetskog transformatora [18].

Izgorje, potamnjenja ili oštećena izolacija je očit simptom da u slučaju tog transformatora dolazi do pregrijavanja. Osim toga, može se na prvu prepoznati i po mirisu paljevine.

Postoji više uzroka koji mogu biti odgovorni za pregrijavanje trofaznog energetskog transformatora te ih se mora uzeti u obzir i provjeriti dok se ne nađe konkretan kvar:

- a) Provjera ukupnog opterećenja da ne premašuje nazivnu snagu energetskog transformatora
- Ukoliko se ispostavi da je to uzrok, potrebno je smanjiti iznos opterećenja na transformator ili zamijeniti trenutni transformator većim. U nekim slučajevima moguće je dodati dodatne ventilatore ili neki drugi sustav hlađenja koji bi pospješio odvod topline. Slika 3.4. prikazuje kako to transformator izgleda kada se pregrije, a metoda utvrđivanja pregrijavanja u ovom slučaju jest termoslika.



Slika 3.4. Primjer pregrijavanja transformatora korištenjem termoslike [36]

- b) Provjera premašuje li temperatura okoline nazivnu vrijednost transformatora
- Promjenom lokacije transformatora u područje niže temperature okoline može pokazati da li je razlog pregrijavanja upravo to. Postoji slučajeva u kojima ovakva procedura nije logistički i financijski smisljena. Ukoliko je razlog upravo prevelika temperatura okoline, potrebno je zamijeniti transformator drugim transformatorom koji je otporniji na temperaturne poraste.

c) Provjera ispravnosti priključnica na namotima

- Ukoliko kontakti na priključnicama namota nisu dobro i čvrsto povezani, može doći do pregrijavanja transformatora. Ukoliko je ovaj slučaj problem, priključnice je potrebno adekvatno spojiti ili zamijeniti po potrebi ukoliko je došlo do oštećenja uslijed zagrijavanja.

d) Provjera jesu li ventilacijski otvori kućišta transformatora blokirani. Transformatori koji su kupljeni kao jezgra i zavojnica te smješteni u kućište koje nije isporučeno od strane proizvođača zahtijevaju da su kućišta pravilno dimenzionirana i prilagođena potrebama hlađenja energetskog transformatora za vrijeme rada u pogonskom stanju

- Ukoliko se radi o blokiranim otvorima na kućištu te otvore je potrebno detaljno očistiti kako bi zrak mogao cirkulirati nesmetano (Sl.3.5). Ako pregrijavanje ne prestane, razlog je najvjerojatnije neadekvatno projektirano i dizajnirano kućište koje ne može pružiti dovoljnu količinu protoka zraka energetskom transformatoru. U tom slučaju najbolje je transformator premjestiti u kućište s boljom ventilacijom. Kod projektiranja i montaže transformatora najbolje bi bilo uzeti u obzir da se montira što dalje od zidova, opreme ili nečeg drugog što može ometati protok zraka. Nije preporučljivo ugrađivati ventilator u ovom slučaju zato što loše postavljeni ventilatori mogu dodatno otežati i ometati protok zraka što rezultira oštećenjem trofaznog energetskog transformatora.



Slika 3.5. Primjer kućišta trafostanice [19]

e) Provjera ulaznog napona

- Ovisno o opterećenju i vrsti transformatora, kontinuirani prenaponi i podnaponi od 5 – 10 % mogu uzrokovati pregrijavanje

f) Provjera struje u praznom hodu

- Ako je struja u energetskom transformatoru visoka, bez priključenog opterećenja potrebno je pregledati namote i jezgru. U većini slučajeva nije moguće pregledavanje izolacije između jezgre i namota bez vraćanja na tvorničko testiranje i rastavljanje. Ako postoji kratki spoj između jezgre i zavojnica, jedinica će morati biti zamijenjena ili popravljena.

g) Provjera faktora snage

- Nizak faktor snage može uzrokovati pretjeranu struju i veće ukupno opterećenje.

h) Provjerite uravnoteženost opterećenja za vrijeme rada transformatora

- Opterećenja bi trebala biti uravnotežena unutar 20% odstupanja. Niti jedno pojedinačno opterećenje ne bi smjelo prelaziti specifično opterećenje za svaku fazu ($1/3$ ukupnog nazivnog napona trofazne jedinice)

i) Provjerite iskrivljenost izlaznog napona

- Visoko iskrivljen izlazni napon može biti znak kvara među zavojnicama i transformator je u opasnosti od trenutnog otkazivanja. Transformator treba isključiti i provjeriti pomoću već spomenutog Megger uređaja. Oštećena zavojnica ili čitav transformator potencijalno je potrebno zamijeniti, ovisno o situaciji.

3.5. Mehanički kvarovi

Energetski transformator izložen je raznim mehaničkim naprezanjima. Najčešći oblici kvara mehaničke prirode po pitanju trofaznih energetskih transformatora su kvarovi uzrokovani vibracijama, curenje (transformatorskog ulja) te kvarovi uzrokovani pogrešnim djelovanjem regulacijskih preklopki.

Vibracije u trofaznim energetskim transformatorima mogu uzrokovati različite mehaničke kvarove poput labavijih kontakata između zavojnica i priključnica te mogu uzrokovati i pomicanje jezgre. Sve to može utjecati na oštećenje izolacije te pregrijavanje transformatora.

Ovi kvarovi često mogu nastati i zbog magnetostrikcije, odnosno zbog djelovanja elektromagnetskih sila unutar transformatora. Jedan od dodatnih faktora koji mehanički mogu oštetiti energetski transformator su prirodne katastrofe poput potresa i tuča. Direktnim mehaničkim djelovanjem na transformator, vibracije mogu uzrokovati dodatne kvarove.

3.5.1. Curenje transformatorskog ulja

Transformatorsko ulje je specijalizirano ulje koje se koristi u energetskim transformatorima i sličnim uređajima. Transformatorsko ulje ima ključnu ulogu u osiguravanju ispravnog rada transformatora.

Njegove dvije glavne funkcije su izolacija i hlađenje transformatora. Kada je riječ o izolaciji, transformatorsko ulje služi kao električna izolacija između različitih dijelova transformatora te na taj način sprječava električna pražnjenja te osigurava siguran rad. Kada na transformatorsko ulje gledamo iz perspektive hlađenja, ono pomaže u prijenosu topline koja nastaje za vrijeme rada transformatora. S obzirom da rad transformatora ispušta toplinu, ulje pomaže u njezinom odvodu te održavanju prikladne radne temperature za određeni transformator [20].

U današnje vrijeme, kao transformatorska ulja, najčešće se koriste mineralna ulja dobivena rafiniranjem sirove nafte, ali postoje i druge vrste:

- a) Mineralna ulja – mineralna ulja su, kao što je već rečeno, najčešće korišten tip transformatorskih ulja.
- b) Sintetičko ulje – koristi se u posebnim uvjetima kao npr. za transformatore koje rade na ekstremnim temperaturama zato što mogu imati poboljšane karakteristike u odnosu na mineralna ulja.
- c) Esterna ulja – ova ulja mogu biti prirodna ili sintetičkka, a često se koriste zbog svojih ekološki prihvatljivih osovina. Ona su biorazgradiva i manje štetna za okoliš u slučaju curenja.

Transformatorsko ulje mora posjedovati određene karakteristike kako bi bilo prikladno za svrhe za koje je namijenjeno:

- a) Visoka dielektrična čvrstoća važno je svojstvo koje ulju omogućava da izdrži visoke napone bez električnog pražnjenja.

- b) Niska viskoznost omogućuje ulju da se lako kreće kroz transformator što poboljšava odvod topline i učinkovitost hlađenja.
- c) Otpornost na oksidaciju je karakteristika kvalitetnih transformatorskih ulja koja utječe na produljivanje njegove trajnosti i na manju potrebu za češćim izmjenjivanjem
- d) Niska toksičnost ulja je karakteristika poželjna kako bi se minimalizirao negativan utjecaj na okoliš, pogotovo u slučaju curenja.

Curenje transformatorskog ulja može uzrokovati brojne probleme, kako za opremu, tako i za okoliš.

Jedan od glavnih uzroka curenja su mehanička oštećenja (Sl.3.6.). Na primjer, udarci, nesreće ili nepažljivo rukovanje mogu oštetiti transformator i dovesti do curenja ulja. Također, kvarovi na brtvama često su krivci. Brtve se s vremenom mogu stanjiti ili popucati, što može uzrokovati curenje. Korozija je još jedan problem, posebno u slučajevima kada su metalni dijelovi izloženi vlažnim ili kemijski agresivnim uvjetima. Prekomjerno zagrijavanje transformatora također može izazvati ekspanziju ulja i dovesti do curenja.

Posljedice curenja transformatorskog ulja su raznolike. Iz perspektive ekologije, curenje ulja može kontaminirati tlo i vodu, što može imati štetne posljedice po život biljaka i životinja nastanjenih u blizini. Također, transformatorsko ulje je zapaljivo, što povećava rizik od požara. Ako se razina ulja smanji, hlađenje transformatora može postati manje učinkovito, što može dovesti do pregrijavanja i smanjenja radne učinkovitosti. Uz to, kontaminacija drugih dijelova opreme može uzrokovati dodatne kvarove.

Da bi se spriječili problemi s curenjem, važno je redovito nadgledati stanje ulja. Vizualne inspekcije i sustavi za praćenje mogu pomoći u ranom otkrivanju curenja. Redovito održavanje, uključujući zamjenu starih brtvila i popravak oštećenih dijelova, ključno je za prevenciju. Nakon što dođe do curenja, važno je brzo sanirati područje i poduzeti mjere za čišćenje i zaštitu okoliša.



Slika 3.6. Curenje transformatorskog ulja [37]

4. ZAŠTITA TROFAZNIH ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Adekvatan način zaštite trofaznih energetskih transformatora ključno je za osiguranje pouzdanog i dugotrajnog rada elektroenergetskog sustava. Transformatori su vitalan element elektroenergetske mreže jer omogućavaju prijenos električne energije na velike udaljenosti uz minimalne gubitke.

Transformatori su, kao i ostali elementi mreže, izloženi različitim vrstama kvarova koji su već do sada navedeni i detaljnije analizirani. Sprječavanjem ozbiljnijih oštećenja smanjuje se rizik od havarija, financijskih gubitaka te se osigurava kontinuirano napajanje priključenih potrošača.

Ovo poglavlje razmatra osnovne metode i uređaje za zaštitu trofaznih energetskih transformatora kao i njihove uloge, način rada i slično.

Zadaci zaštite:

- Štiti transformator od vanjskih smetnji, prenapona, struja kratkog spoja te preopterećenja,
- Štiti mrežu od kvarova u samom transformatoru,
- Prati rad transformatora sa zadaćom da se na vrijeme signalizira pojava kvara te spriječi njegovo proširenje i šteta [1].

Postoje različite metode i oblici zaštite koje se prakticiraju:

- 1) Zaštita od vanjskih prenapona (odvodnici prenapona, zaštitna iskrišta),
- 2) Zaštita od struja kratkog spoja i preopterećenja (prekidači, osigurači, nadstrujni releji, kontaktni termometar, termoslika),
- 3) Zaštita od kvarova u transformatoru (Buchholzov relej, diferencijalna zaštita, odušnik, zaštita mjerenjem napona kotla prema zemlji, zaštitni relej regulacijske preklopke).

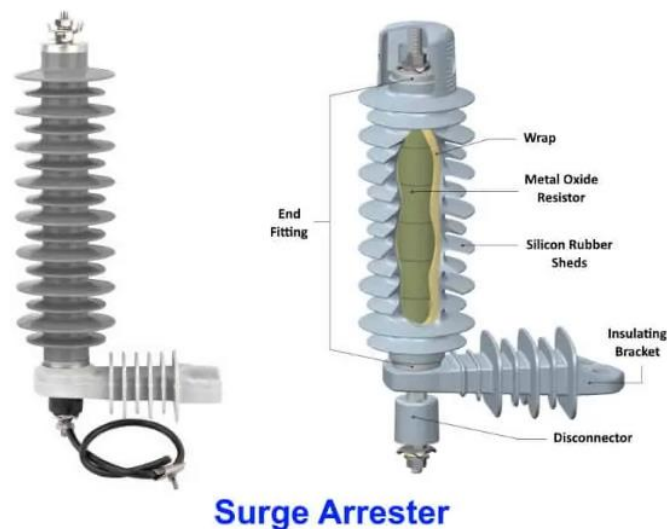
4.1. Zaštita od vanjskih prenapona

U ovom poglavlju analizirane su metode za zaštitu trofaznih energetskih transformatora od vanjskih prenapona koji mogu negativno utjecati na rad i životni vijek transformatora. Naglasak je stavljen na uzroke vanjskih prenapona kao i na primjeni odgovarajućih mjera zaštite kako bi elektroenergetski sustav nesmetano bio u pogonu.

4.1.1. Odvodnici prenapona

Odvodnici prenapona (Sl.4.1.) su zaštitni uređaji koji ograničavaju prolazne prenaponske valove u sustavu, uzrokovane privremenim strujnim udarima. Odvodnici su obično povezani s dalekovodom s jedne strane, a s druge strane su uzemljeni [21].

Odvodnici prenapona u distribucijskim sustavima najčešće se koriste za zaštitu samog distribucijskog sustava kao i njegove opreme u koju spadaju i trofazni energetski transformatori kao i automatski prekidači, baterije kondenzatora i slično. Slika 4.2. prikazuje odvodnike prenapona u elektroenergetskom postrojenju upravo u svrhu, već navedene, zaštite distribucijskog sustava.



Slika 4.1. Odvodnik prenapona i njegovi dijelovi [21]



Slika 4.2. Odvodnici prenapona na trofaznom energetsom transformatoru [21]

Kada u elektroenergetskom sustavu dođe do pojave koja generira val prenapona, odvodnik (nelinearni otpor), aktivira se i omogućuje prolazak tog vala kroz svoje ventile, ispuštajući ga u zemlju te na taj način sprječava oštećenje samog elektroenergetskog transformatora.

Odvodnici s metalnim oksidom (cinkovim oksidom) djeluju prema gore navedenom principu koristeći ventile od cinkovog oksida velike snage koji odvede prenapon u zemlju.

Odvodnici se koriste za zaštitu opreme i mreže te su dizajnirani na način da ograničavaju prolazak prenaponskih valova uzrokovanih privremenim izbijanjem struja (Sl.4.3.) [21].



Slika 4.3. Odvodnici prenapona [22]

4.1.2. Zaštitna iskrišta

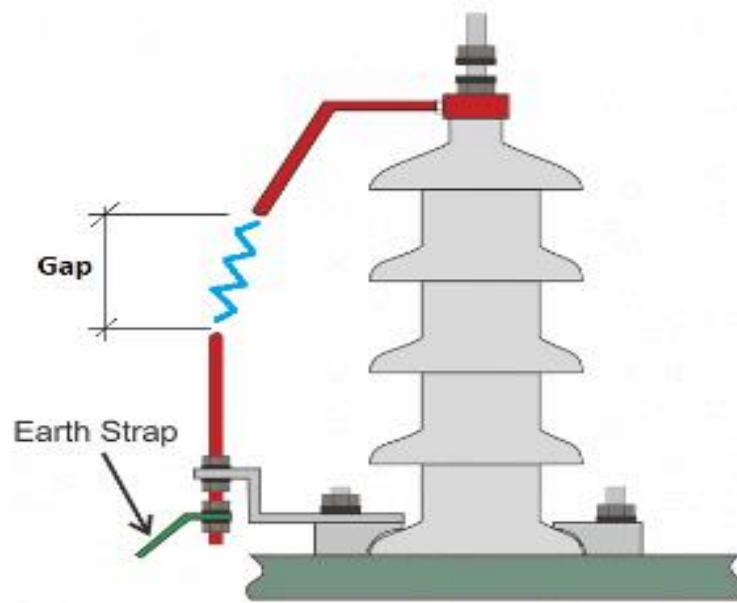
Zaštitna iskrišta su uređaji koji se koriste u elektroenergetskim sustavima za zaštitu električne opreme, kao i samih trofaznih energetske transformatora, od prenapona.

Sastoje se od dvije elektrode koje su postavljene blizu jedna druge s određenim razmakom (Sl.4.4.), obično unutar izoliranog kućišta. Kada prenapon dođe do kritične razine, iskrište omogućuje stvaranje električnog luka između elektroda, što stvara kratki spoj i usmjerava višak energije (napona) prema zemlji.

Zaštitna iskrišta često se koriste zajedno s odvodnicima prenapona kako bi osigurala dodatnu razinu zaštite elektroenergetskog sustava kao i njegovih komponenata.

Zaštitno iskrište je ključna komponenta u elektroenergetskom sustavu kada se radi o atmosferskom pražnjenju (udaru munje). Namjena iskrišta temelji se na jednostavnom, ali učinkovitom principu koji teži izjednačiti potencijale ili električki odvojiti metalne elemente koji ne bi smjeli biti u električnom kontaktu u normalnom pogonskom radu. Iskrište, kao što je već rečeno, omogućuje protok električne struje kroz sebe te na taj način stvara put najmanjeg otpora za pražnjenje munje. Ovaj proces je ključan za sigurnosno preusmjeravanje električne energije prema zemlji sprječavajući oštećenja na mreži i njezinim komponentama [23].

Pravilno održavanje i nadzor ovog elementa neophodni su za osiguranje stalne učinkovitosti sustava zaštite od atmosferskih pražnjenja i smanjenje rizika povezanih s već navedenim grmljavinskim olujama [23].



Slika 4.4. Pojednostavljeni prikaz zaštitnog iskrišta [24]

4.2. Zaštita od struja kratkog spoja i preopterećenja

4.2.1. Prekidači

Prekidači su elementi elektroenergetskog postrojenja koji služe za otvaranje i zatvaranje normalnih pogonskih struja, a služe i kao zaštita od struje kratkog spoja jer je njihova karakteristika kratkotrajno vođenje, uklapanje te isklapanje struje kratkog spoja. Izuzetno je važan pravilan rad prekidača u svim pogonskim uvjetima, a naročito prilikom nastanka kratkog spoja. Prilikom isklapanja i uklapanja pojavljuje se električni luk između kontakata prekidača pa zbog toga svaki prekidač ima medij u kojem gasi taj luk [25].

a) Prekidači u vakuumu

Prekidači u vakuumu (Sl.4.5.) koriste vakuum za gašenje električnog luka koji nastaje pri prekidu kratkog spoja. Kada dođe do kratkog spoja, kontaktne ploče se povlače u vakuumsku komoru gdje luk prekida. Ovi prekidači su vrlo učinkoviti u brzom prekidanju

struja kratkog spoja. Minimaliziraju oštećenja sustava kao i trofaznih energetske transformatora u njima.



Slika 4.5. Prekidač u vakuumu [33]

b) Prekidač s plinskom izolacijom

Ovi prekidači koriste plin SF₆ (sumporni heksafluorid) kao dielektrički medij za izolaciju i prekidanje električnog luka. SF₆ plin pruža iznimno visoku razinu izolacije i omogućava brzu reakciju na kratke spojeve, a njegov izgled nalazi se na slici 4.6..



Slika 4.6. Prekidač s plinskom izolacijom (SF₆ plin) [34]

Osim ova dva osnovna tipa prekidača, postoje i posebni tipovi među kojima su:

Prekidači s naponskim ograničenjem koji se koriste za zaštitu od prenapona koji mogu nastati zbog udara munja te ograničavaju prenapon kako bi zaštitili opremu.

Osim njih, poznajemo i prekidače sa selektivnim isključenjem koji omogućuju isključenja pojedinih dijelova sustava dok ostatak sustava ostaje operativan. Prekidači sa selektivnim isključenjem potpomažu upravljanje mrežom i minimaliziraju prekide u opskrbi električnom energijom.

Transformatori su posebno osjetljivi na kratke spojeve zbog velikih struja koje mogu proći kroz njih. Zaštita od kratkoga spoja obično uključuje korištenje različitih vrsta prekidača i osigurača. U trofaznim transformatorima često se koriste različite vrste prekidača kako bi se brzo reagiralo na kratke spojeve i spriječilo oštećenje transformatora i povezane opreme (Sl.4.7.).

Svi navedeni prekidači su dizajnirani za brzo otkrivanje i prekidanje struja kratkoga spoja kako bi se spriječila daljnja šteta na sustavu i opremi. Pored zaštite od kratkoga spoja, prekidači također štite sustav od prekomjernih struja koje mogu uzrokovati pregrijavanje i oštećenje opreme.



Slika 4.7. Prekidač kao element trofaznog postrojenja [26]

4.2.2. Osigurači

Osigurači igraju bitnu ulogu u zaštiti elektroenergetskih sustava i trofaznih energetske transformatora od struja kratkog spoja. Oni su dizajnirani da automatski prekidaju električni krug kada struja premaši određenu granicu pa samim time sprječavaju oštećenje opreme i smanjuju rizik od požara ili drugih ozbiljnih problema.

Kada dođe do kratkoga spoja, osigurač se pregrijava zbog velike struje koja prođe kroz njega, što uzrokuje njegovu aktivaciju i prekidanje kruga. Na taj način osigurač štiti transformator i druge komponente elektroenergetskog sustava od štetnih posljedica kratkoga spoja, kao što su pregrijavanje i potencijalna oštećenja.

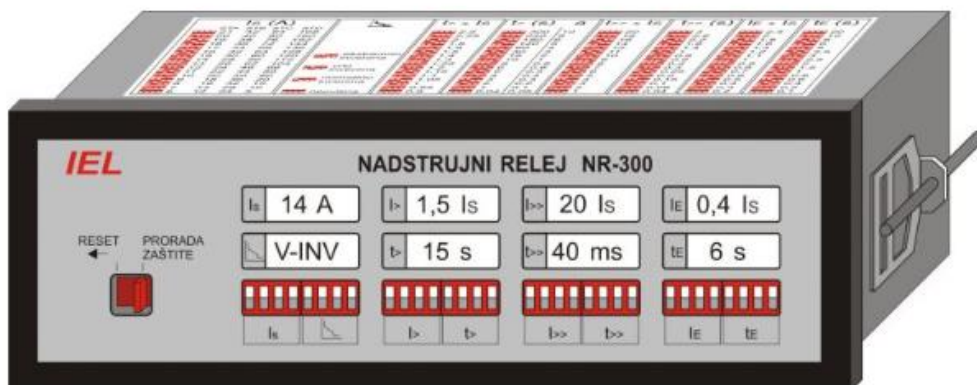
Osigurači (Sl.4.8.) su često korišteni zajedno s drugim zaštitnim uređajima, kao što su releji i prekidači, kako bi se osigurala sveobuhvatna zaštita elektroenergetskog sustava. Uz svoju sposobnost da brzo reagiraju na kratke spojeve, osigurači pomažu u održavanju pouzdanosti i sigurnosti elektroenergetskih mreža i opreme.



Slika 4.8. Osigurač nazivnog napona 12kV [35]

4.2.3. Nadstrujni relej

Nadstrujni relej je uređaj koji štiti elektroenergetske sustave od preopterećenja i kratkog spoja. Njegova funkcija je da detektira kada struja premaši unaprijed postavljene granice, što ukazuje na potencijalni problem poput kratkog spoja ili preopterećenja. Kada relej otkrije da struja prelazi tu granicu, aktivira prekidač ili osigurač kako bi prekinuo električni krug i spriječio oštećenje sustava kao i trofaznih energetske transformatora u njemu, a nadstrujni relej nalazi se na slici 4.9. [27].



Slika 4.9. Nadstrujni relej [27]

4.2.4. Kontaktni termometar

Kontaktni termometar je uređaj koji mjeri temperaturu putem direktnog kontakta s površinom ili komponentom čije toplinske uvjete promatramo. U trofaznim energetskim transformatorima, u svrhu zaštite i očuvanja, koristi se kontaktni termometar koji prati temperaturu dijelova koji se lako zagriju u slučaju kvarnih stanja kao što su primarni namot, sekundarni namot te jezgra.

Kontaktni termometar (Sl.4.10.) temperaturu mjeri putem senzora, poput termoelementa ili otpora koji je u neposrednom kontaktu s elementom čiju temperaturu mjerimo. Ovaj uređaj pomaže u praćenju radne temperature transformatora, omogućuje pravovremenu reakciju u slučaju kvara te sprječava potencijalna oštećenja transformatora kao i ostatka elektroenergetskog sustava.



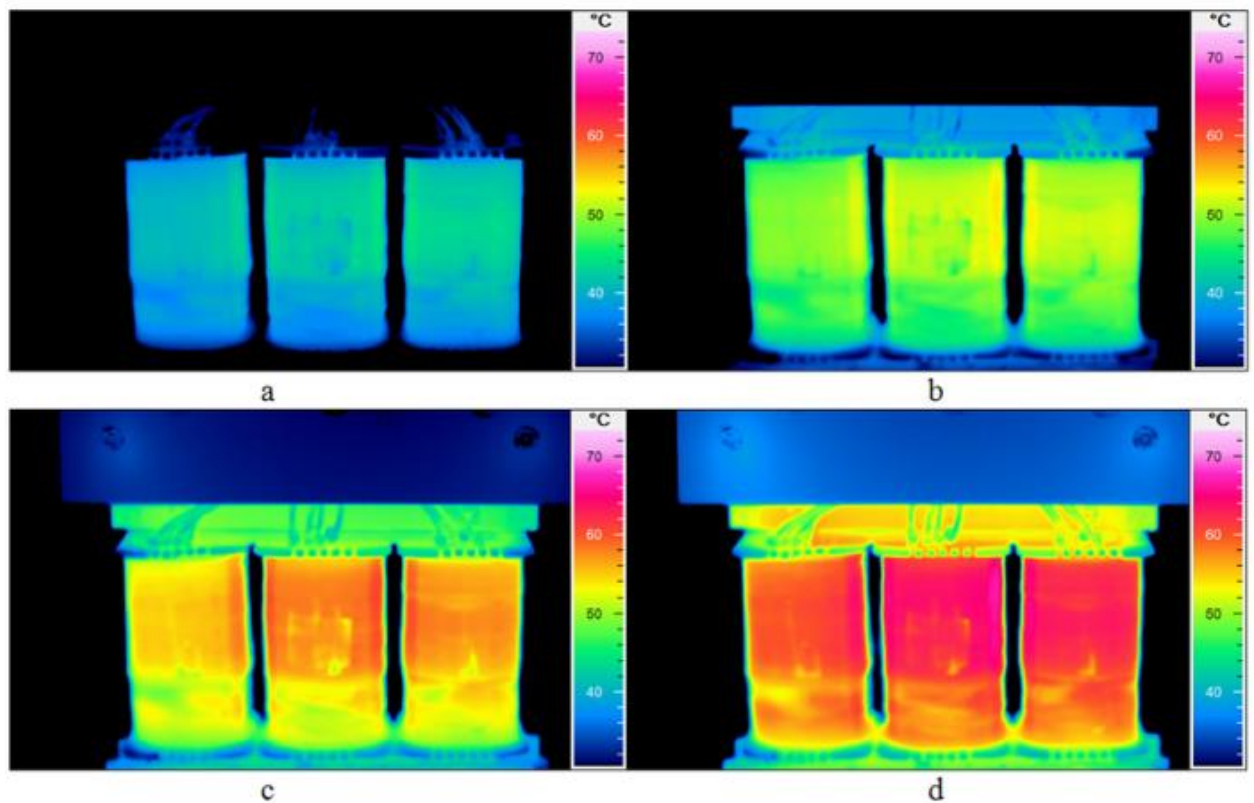
Slika 4.10. Kontaktni termometar [28]

4.2.5. Termoslika

Termoslika je uređaj koji se koristi za mjerenje i nadzor temperature u elektroenergetskim sustavima i transformatorima. Sastoji se od temperature osjetljivog materijala (često metalnog) koji se koristi za detekciju i mjerenje temperature na određenoj lokaciji. Termoslika je obično montirana na površinu ili u blizini komponente čiju temperaturu treba pratiti.

Kako temperatura raste, materijal u termoslici se širi ili mijenja svoj električni otpor. Ova promjena se koristi za izračunavanje temperature i često se prikazuje na mjernom uređaju ili se koristi za aktiviranje alarma ili kontrole ako temperatura prijeđe određeni prag.

Slika 4.11. prikazuje termalne slike transformatora nakon 30, 60, 90 te 120 minuta u pogonu na 87% nazivnog napona.



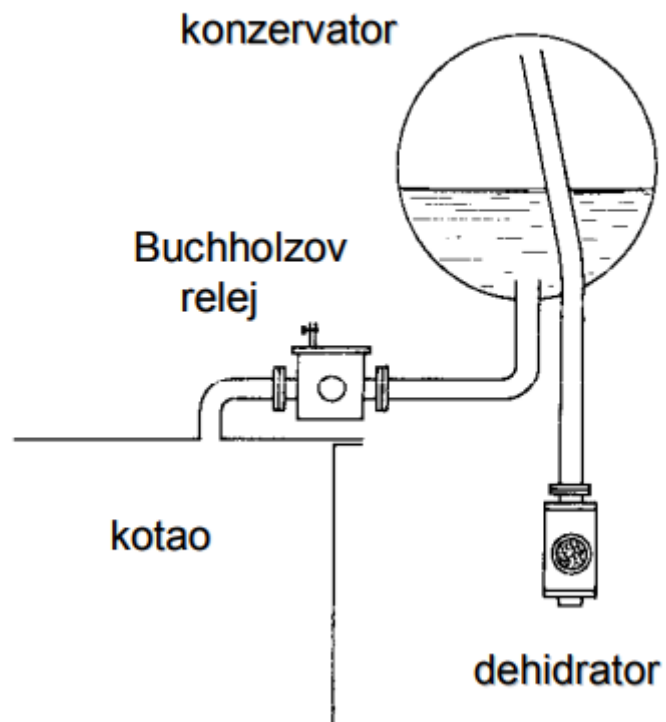
Slika 4.11. Primjer termoslike trofaznog energetskog transformatora [29]

Slika 4.11. prikazuje termosliku transformatora nakon: a) 30 minuta, b) 60 minuta, c) 90 minuta i d) 120 minuta pod opterećenjem 87% od nazivnog.

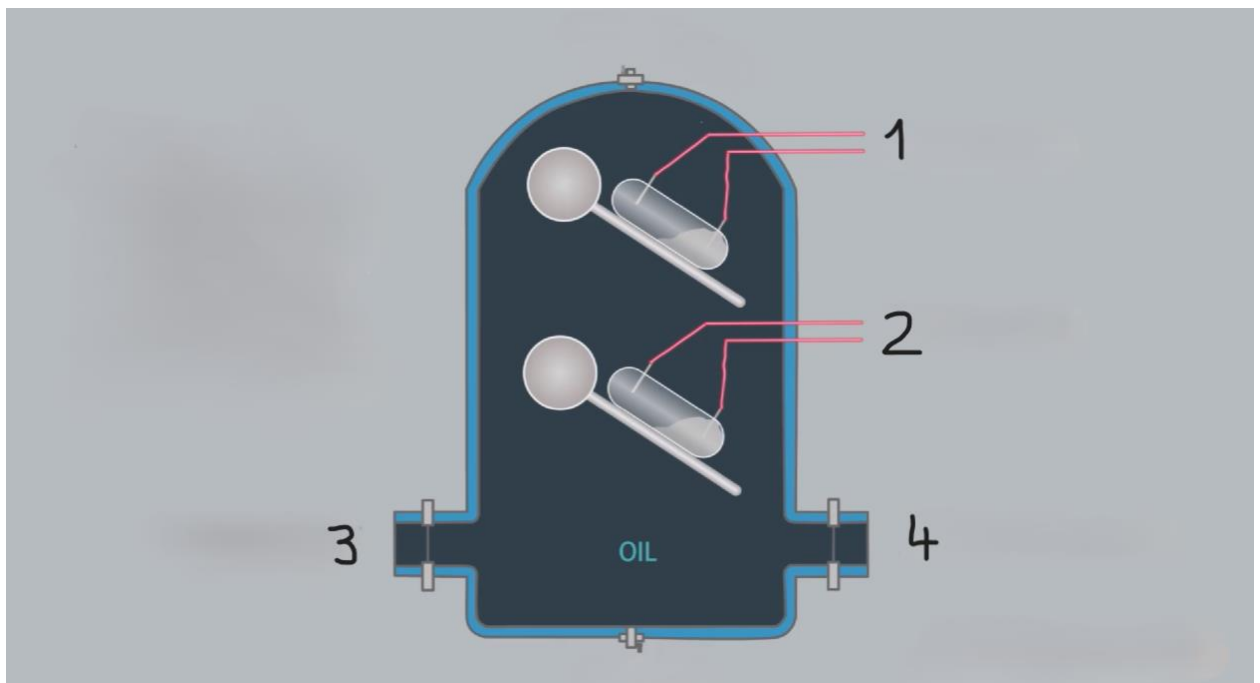
4.3. Zaštita od kvarova u transformatoru

4.3.1. Buchholzova zaštita

Buchholzov relej najrašireniji je uređaj za dojavu kvara unutar trofaznog energetskog transformatora. On reagira na sakupljanje plina, nedostatak ulja te intenzivno strujanje plinova i ulja prema kondenzatoru. Ugrađuje se u uljnu cijev između kotla i konzervatora a sastoji se od kućišta i dva živina plovka (Sl.4.12.) [1].



Slika 4.12. Priključak Buchholzovog releja [1]



Slika 4.13. Shematski prikaz Buchholzovog releja [30]

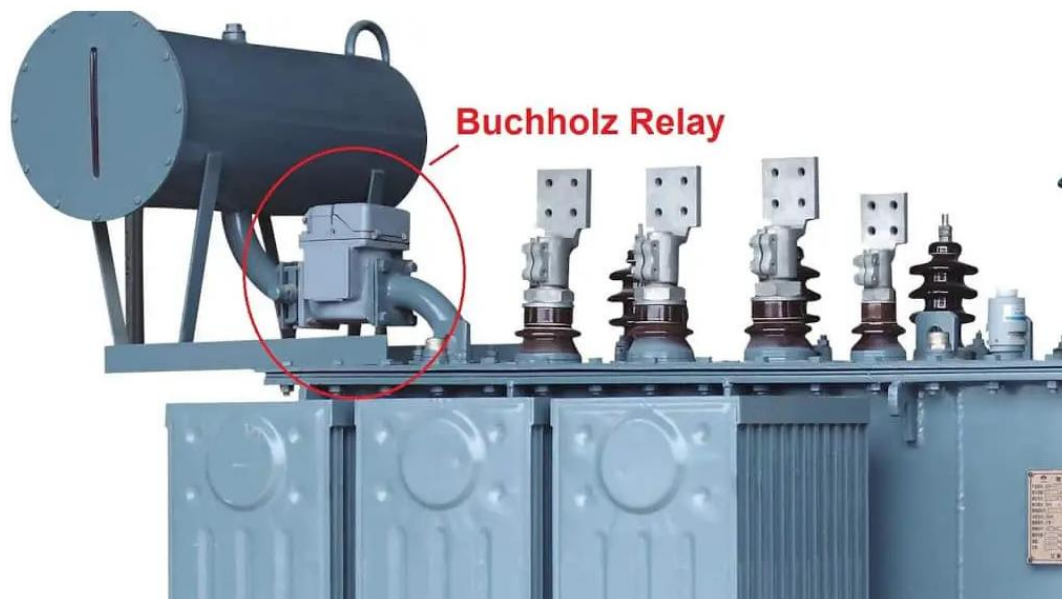
Na prijašnjoj fotografiji (Sl.4.13.), oznake predstavljaju sljedeće:

- 1 – gornji plovak (plovak 1)
- 2 – donji plovak (plovak 2)
- 3 – Dovod ulja **IZ** glavnog spremnika transformatora
- 4 – Odvod ulja **U** konzervator

U slučaju manjeg kvara u trofaznom energetskom transformatoru razvija se toplina na mjestu kvara. Pojavom topline dolazi do razvijanja plina čiji mjehurići dolaze do Buchholzovog releja i sakupljaju se na njegovom najvišem mjestu (imaju manju gustoću od ulja pa se plin nakuplja gore). Nivo ulja u samom releju opada zato što se gornji dio releja puni plinom što uzrokuje spuštanje plovka 1 čime se zatvara signalni krug za dojavu kvara. Signaliziranje je najčešće akustično i daje na znanje da se u transformatoru pojavio kvar.

U slučaju težih kvarova u transformatoru dolazi do bržeg zagrijavanja, a tako i do bržeg nastajanja plina. U tom slučaju, u Buchholzovom releju dolazi do naglog nestajanja ulje, odnosno do naglog punjenja releja plinom koji toliko ispuni relej da reagira plovak 2 koji svojim spuštanjem zatvara kontakt kojim se iskapča sklopka i transformator prestaje biti u pogonskom stanju.

Točna pozicija ugradnje Buchholzovog releja, kada se radi o trofaznom energetskom transformatoru prikazana je na slici 4.14..

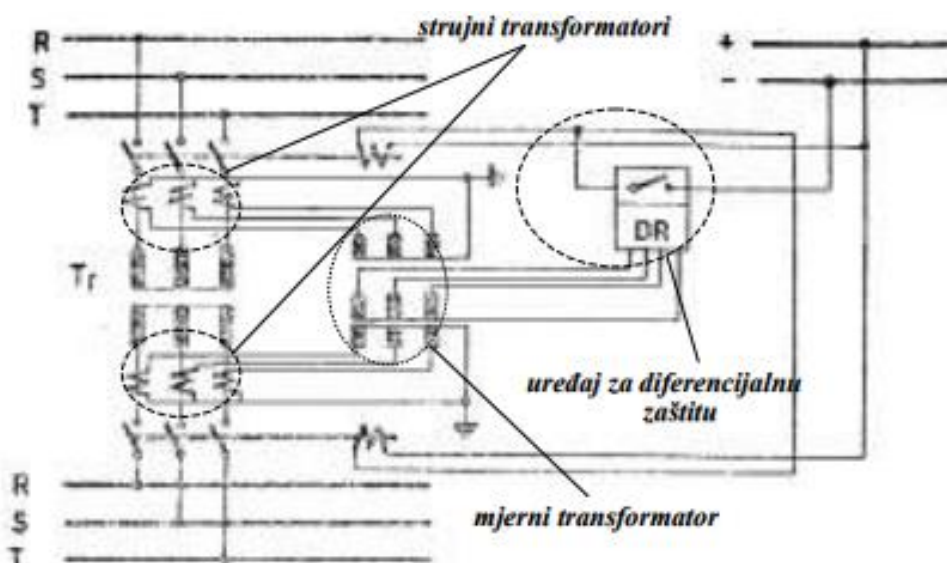


Slika 4.14. Buchholzov relej na trofaznom energetskom transformatoru [31]

4.3.2. Diferencijalna zaštita

Diferencijalna zaštita se koristi kod velikih trofaznih energetskih transformatora, najčešće uz Buchholzov relej kako bi zaštita mogla što brže reagirati u slučaju velikih kvarova (Sl.4.15.).

Uređaj za diferencijalnu zaštitu priključuje se na strujne transformatore preko jednog mjernog transformatora s tri namota. Zasniva se na djelovanju razlike struja iste faze na primarnoj i sekundarnoj strani [1]. Primjer uređaja za diferencijalnu zaštitu nalazi se na slici 4.16..



Slika 4.15. Diferencijalna zaštita transformatora [1]



Slika 4.16. PSA15 diferencijalni relej [32]

U normalnom pogonu (bez kvara), sekundarne struje kroz strujne transformatore su približno jednake te kroz diferencijalni relej ne teče nikakva struja.

U slučaju kvara, simetrija biva poremećena (npr. u slučaju kratkog spoja među fazama) te se u namotu mjernog transformatora inducira napon koji djeluje na relej. Nakon toga se zatvori istosmjerni strujni krug koji djeluje na iskapčanje sklopke na primarnoj i sekundarnoj strani.

Diferencijalni relej se ne kalibrira previše osjetljivo kako ne bi reagirao na manja odstupanja. Ta mala odstupanja nisu opasna po transformator. Diferencijalni relej najčešće djeluje onda kada je nesimetrija $>30\%$ nominalnog iznosa struje [1].

4.3.3. Ostali oblici zaštite od kvara u transformatoru

Ostali oblici zaštite od kvarova unutar transformatora su:

- a) Odušnik - Odušnik na trofaznom energetskom transformatoru služi za ispuštanje plinova koji se stvaraju u slučaju pregrijavanja ili unutrašnjih kvarova, čime se smanjuje pritisak unutar transformatora i sprečava moguće eksplozije.
- b) Zaštita mjerenjem napona kotla prema zemlji - Zaštita mjerenjem napona kotla prema zemlji omogućava detekciju izolacijskih kvarova unutar transformatora, čime se pravovremeno identificiraju opasne situacije poput proboja napona na uzemljeni dio.
- c) Zaštitni relej regulacijske preklopke - Zaštitni relej regulacijske preklopke osigurava pravilno prebacivanje naponskih stupnjeva na transformatoru, te reagira u slučaju nepravilnog rada ili kvara preklopnog uređaja kako bi se spriječilo oštećenje transformatora.

5. ZAKLJUČAK

Trofazni energetska transformatori su vrlo vitalne komponente elektroenergetskog sustava, koji omogućuju prijenos i distribuciju električne energije na velikim udaljenostima. Kroz ovaj završni rad, analizirani su različiti kvarovi koji mogu nastati na trofaznim transformatorima, kao i metode zaštite koje se primjenjuju kako bi se osigurao njihov pouzdan rad. Razumijevanje najčešćih kvarova, poput proboja izolacije, kvarova na namotima, pregrijavanja i pojave unutarnjih lukova, ključno je za održavanje visoke razine sigurnosti i učinkovitosti u radu transformatora. Ti kvarovi često nastaju zbog kombinacije faktora kao što su starenje materijala, prenaponi, mehanički stres i termička degradacija.

Zaštita trofaznih transformatora temelji se na primjeni različitih tehnoloških rješenja, poput diferencijalne zaštite, relejnih zaštita (najčešće Buchholzov relej) i mjerenja temperatura. Diferencijalna zaštita se pokazala kao jedan od najpouzdanijih metoda za otkrivanje unutarnjih kvarova, jer detektira razliku struja na ulazu i izlazu transformatora, čime omogućuje brzo isključivanje transformatora u slučaju kvara.

Kako bi se povećala pouzdanost i smanjili rizici kvarova, potrebno je kontinuirano ulagati u modernizaciju sustava zaštite i primjenu naprednih tehnologija praćenja stanja transformatora. Redovito održavanje, uključujući testiranje i nadzor, igra ključnu ulogu u prevenciji kvarova. Kroz unapređenje metoda dijagnostike i zaštite, moguće je produžiti životni vijek transformatora, smanjiti operativne troškove i osigurati stabilnu opskrbu električnom energijom.

Zaključno, kako se energetska sustavi suočavaju s novim izazovima, poput integracije obnovljivih izvora energije i povećane potrošnje, značaj pravilne zaštite i prevencije kvarova na trofaznim energetskim transformatorima postaje sve veći. Stoga je neophodno kontinuirano razvijati i unapređivati metode zaštite kako bi se osigurala sigurnost, učinkovitost i pouzdanost elektroenergetskog sustava u cjelini.

LITERATURA

- [1] Milica Pužar, Ivan Mandić, Transformatori i rotacijski električni strojevi, Predavanja, Osijek, 2007.god
- [2] Marko Delimar, Prijenos i razdjela električne energije, 2. izdanje, svibanj 2017.god
- [3] Materijali s predavanja iz kolegija Elektrane i elektroenergetski sustavi, predavanje: Električne sheme i pogon elektrana u EES, FERIT, Osijek 2023.god
- [4] Žarko, D.; Ćučić, B.: „Transformatori u teoriji i praksi“, Graphis, Zagreb, 2020.
- [5] Three Phase Transformer Basic Calculations, © The Engineering Mindset TM 2024 ALL RIGHTS RESERVED. No part of this work may be reproduced without the written permission of the publisher.
- [6] Amperov kružni zakon, web stranica Tehnički leksikon: Amperov kružni zakon, posjećeno dana 11.8.2024., URL: <https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/ampereov-kruzni-zakon>
- [7] Grbavec, Hrvoje, Energetski transformatori, završni rad, Rijeka, 2023. (pristupljeno 11.8.2024.)
- [8] Faradayev zakon, web stranica Tehnički leksikon: Faradayev zakon elektromagnetske indukcije, posjećeno dana 12.8.2024., URL: <https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/faradayev-zakon-elektromagnetske-indukcije>
- [9] Web stranica Electrical Technology, posjećeno dana 12.8.2024., URL: <https://www.electricaltechnology.org/2022/04/difference-between-single-phase-three-phase-transformer.html>
- [10] Orišak, Tomislav, Utjecaj spojeva namota i načina uzemljenja pri nesimetričnom opterećenju trofaznog transformatora, završni rad, Osijek, 2023.
- [11] “A Stitch In Time” The Complete Guide to Electrical Insulation Testing, Copyright 2006.
- [12] Megger uređaj, web stranica Megger, posjećeno dana 12.8.2024., URL: <https://www.megger.com/en/products/s1-568-s1-1068-and-s1-1568-insulation-resistance-testers>
- [13] Wire and Cable Insulation and Jacketing: CHAPTER 2 LIFE-CYCLE INVENTORY, pristupljeno 13.8.2024.

- [14] Namoti transformatora, web stranica EASA (The Electro-Mechanical Authority), pristupljeno 14.8.2024., URL: <https://easa.com/resources/failures-in-three-phase-stator-windings>
- [15] B. B. Gupta - Electrical Power Systems, January 2023.
- [16] S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde - Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics
- [17] Krakti spoj, web stranica Hammond, pristupljeno 15.8.2024. URL: <https://americas.hammondpowersolutions.com/resources/faq/general/transformer-short-circuit-considerations>
- [18] Pregrijavanje transformatora, web stranica Hammond, pristupljeno 15.8.2024. URL: <https://americas.hammondpowersolutions.com/resources/faq/troubleshooting-guide/transformer-is-overheating>
- [19] Kućište transformatora, web stranica DELING Tuzla, pristupljeno 15.8.2024. URL: <https://deling.biz/kompaktne-trafostanice/>
- [20] Curenje transformatorskog ulja, web stranica Maddox, pristupljeno 15.8.2024. URL: <https://www.maddox.com/resources/articles/transformer-oil-leaks>
- [21] Odvodnici prenapona, web stranica Prolec, pristupljeno 15.8.2024. URL: <https://www.prolec.energy/components/low-voltage-components/surge-arresters/>
- [22] Odvodnici prenapona, web stranica saVRee, pristupljeno 17.8.2024. URL: <https://www.savree.com/en/encyclopedia/surge-arrester>
- [23] Zaštitno iskrište, web stranica Aiditec systems, pristupljeno 17.8.2024. URL: <https://aiditecsystems.com/en/how-does-a-spark-gap-works/>
- [24] Zaštitno iskrište, web stranica Datsan, pristupljeno 17.8.2024. URL: <https://www.datsan.com.tr/en/corporate/downloads/technical-library-transformer/107-arcing-horn-gap-distance.html>
- [25] Ostrihon, Filip, Prekidači u elektroenergetskom postrojenju, završni rad, Osijek, 2021.
- [26] Prekidač, web stranica S&C, pristupljeno 19.8.2024. URL: <https://www.sandc.com/en/products--services/products/series-2000-circuit-switcher/>

- [27] Nadstrujni relej, web stranica IEL, pristupljeno 19.8.2024. URL:
<https://www.iel.hr/grupe-proizvoda/zastita/zastita-transformatora/nadstrujni-relej-nr-300/>
- [28] Kontaktni termometar, web stranica Radošević transformatori, pristupljeno 21.8.2024.
URL: https://www.radosevic.hr/kontaktني_termometar.html
- [29] Termoslika, web stranica ResearchGate, pristupljeno 21.8.2024. URL:
https://www.researchgate.net/figure/Thermal-images-of-the-transformer-after-a-30-minutes-b-60-minutes-c-90-minutes-and_fig5_298082988
- [30] Buchholzov relej , web stranica substationsystem.org, pristupljeno 22.8.2024. URL:
<http://www.substationssystem.org/>
- [31] Buchholzov relej, web stranica EEEB, pristupljeno 22.8.2024. URL: <https://eeeb-egy.com/buchholz-relay/>
- [32] Diferencijalni relej, web stranica Tecquipment, pristupljeno 24.8.2024. URL:
<https://www.tecquipment.com/fr/differential-protection-relay>
- [33] Prekidač u vakuumu, web stranica ABB pristupljeno 24.8.2024. URL:
<https://electrification.us.abb.com/products/circuit-breakers/advac-38-vacuum-circuit-breaker>
- [34] SF6 prekidač, web stranica Power Cable Corporation, pristupljeno 24.8.2024. URL:
<https://www.indogermanpower.com/medium-voltage-switchgears.html>
- [35] Visokonaponski osigurač, web stranica ETI pristupljeno 24.8.2024. URL:
<https://www.etielektroelement.cz/media-center/eti-blog/high-voltage-hv-fuses-in-particular-applications>
- [36] Pregrijavanje transformatora, web stranica Research gate, pristupljeno 24.8.2024. URL:
https://www.researchgate.net/figure/Infrared-thermal-image-of-a-power-transformer-in-the-substation_fig1_338598205
- [37] Curenje ulja, web stranica Transformer maintenance pristupljeno 24.8.2024. URL:
http://transformermaintenance.com/wp-content/uploads/0_0_0_0_286_214_csupload_39591357_large.jpg

SAŽETAK

Kvarovi i zaštita trofaznih energetske transformatora

Ovaj rad obrađuje temu sustava za besprekidno napajanje potrošača. Na početku rada opisani su problemi i zahtjevi koji se postavljaju pred ovakve sustave, te su opisani osnovni tipovi ovakvih sustava koji će nam pomoći u rješavanju ovih problema i koji će odgovoriti na zahtjeve koji se postavljaju pred njih. Nakon toga su obrađeni statički sustavi za besprekidna napajanja, odnosno elektronički sustavi besprekidnih napajanja, njihovi glavni dijelovi, topološke strukture i načini rada. Zatim su objašnjeni i ukratko su opisane funkcije i načini rada dizel-električnih agregata koji upotpunjuju funkciju elektroničkih sustava za besprekidno napajanje. Također su opisani i kombinirani sustavi koji se sastoje od te dvije vrste besprekidnih napajanja, te razlozi zašto se oni koriste. Za kraj su ostavljene osnove projektiranja i održavanja sustava za besprekidna napajanja potrošača, te norme koje se tiču ovih sustava.

Ključne riječi: transformator, energetski transformator, kvar, zaštita, izolacija, proboj, elektroenergetski sustav, pregrijavanje, pogon;

ABSTRACT

Failures and Protection of Three-Phase Power Transformers

This paper addresses the topic of uninterrupted power supply systems for consumers. It begins by describing the problems and requirements that such systems must meet and provides an overview of the basic types of these systems, which can help solve these problems and meet the necessary requirements. The paper then discusses static systems for uninterrupted power supply, specifically electronic uninterrupted power supply systems, their main components, topological structures, and operating methods. It also explains the functions and modes of operation of diesel-electric generators, which complement the function of electronic uninterrupted power systems. Combined systems, consisting of both types of uninterrupted power supplies, are described, along with the reasons for their use. Finally, the basics of designing and maintaining uninterrupted power supply systems for consumers, as well as the standards related to these systems, are presented.

Keywords: transformer, power transformer, failure, protection, insulation, breakdown, power system, overheating, operation.

ŽIVOTOPIS

Toni Kovačević rođen je 19.2.2003. u Đakovu. Tamo živi i odrasta te pohađa Osnovnu školu Josipa Antuna Čolnića u Đakovu. Nakon osnovne škole upisuje opći gimnazijski smjer na Gimnaziji Antuna Gustava Matoša, također u Đakovu. Polaganjem državne mature završava svoje srednjoškolsko obrazovanje te upisuje smjer elektroenergetike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija koji spada pod Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Do sada je radno iskustvo skupljao u dvije grane vezane za struku. Krenuo je sa radom u tvrtki koja se bavila elektronikom, gdje je radio nekoliko mjeseci kao student, a nakon toga pronalazi posao u nešto konkretnijoj struci, odnosno u firmi koja se bavi montažom te održavanjem fotonaponskih elektrana gdje radi i dalje za vrijeme pisanja ovog završnog rada.