

Mjerni transformatori za zaštitu

Lazar Ščekić
Univerzitet Crne Gore
Elektrotehnički fakultet

Ciljevi

- Razumijevanje nedostataka primarnih releja
- Upoznavanje sa principima rada mjernih transformatora
- Razumijevanje operativnih problema mjernih transformatora
- Upoznavanje sa pravilima izbora mjernih transformatora za zaštitu

Uvod

Nedostaci primarnih releja

- Izolacija mora biti dimenzionisana za očekivana naponska naprezanja
- Primarni releji moraju izdržati termička i mehanička naprezanja usljed velikih struja kratkih spojeva
- Održavanje zahtijeva odvajanje šticeenog objekta od izvora napajanja
- Složena standardizacija zbog velikog broja potencijalnih kombinacija primarnih veličina

1

Na samom početku razvoja relejne zaštite, zaštitni releji su se direktno priključivali na napon i struju šticeenog objekta, zbog čega su dobili naziv primarni releji. Primarne releje karakteriše nekoliko nedostataka:

- Izolacija primarnih releja mora biti dimenzionisana za očekivana naponska naprezanja kako u normalnom pogonu, tako i za vrijeme poremećaja,
- Primarni releji moraju izdržati termička i mehanička naprezanja usljed velikih struja kratkih spojeva,
- Održavanje primarnih releja zahtijeva odvajanje šticeenog objekta od izvora napajanja,
- Standardizacija primarnih releja je izuzetno složena zbog velikog broja potencijalnih kombinacija primarnih veličina.

Mjerni transformatori

- Strujni mjerni transformatori
- Naponski mjerni transformatori

Savremeni zaštitni releji se na primarne veličine šticeog objekta priključuju pomoću mjernih transformatora za zaštitu. U zavisnosti od mjerene veličine, razlikuju se:

- Strujni mjerni transformatori i
- Naponski mjerni transformatori.

Strujni mjerni transformatori

Definicija i vrste strujnih transformatora

- Mjerni transformator koji transformiše primarnu struju u sekundarnu struju proporcionalne vrijednosti
- Vrste strujnih transformatora:
 - Indukcioni strujni transformatori
 - Optički strujni transformatori
 - Strujni transformatori na bazi Holovog efekta
 - Kalem Rogowskog

3

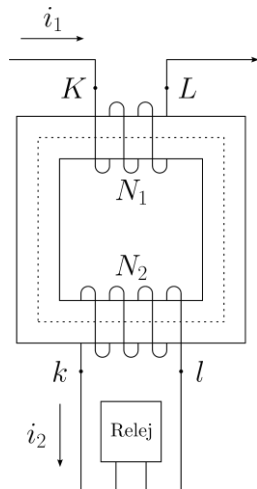
Strujni transformator je mjerni transformator koji transformiše primarnu struju u sekundarnu struju proporcionalne vrijednosti, prilagođenu za priključenje mjernih i zaštitnih uređaja.

Prema principu rada, razlikuju se nekolike vrste strujnih transformatora, uključujući:

- Indukcione strujne transformatore,
- Optičke strujne transformatore,
- Strujne transformatore na bazi Holovog efekta i
- Kalem Rogowskog.

Dominantnu primjenu našli su indukcioni strujni transformatori, koji uz transformaciju primarne struje obezbjeđuju i galvansko odvajanje primarnih i sekundarnih krugova.

Princip rada indukcionih strujnih transformatora



- Nazivni prenosni odnos strujnog transformatora:

$$m = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{N_2}{N_1}$$

gdje su I_{1n} i I_{2n} nazivne struje, a N_1 i N_2 broj navojaka primarnog i sekundarnog namotaja

Princip rada indukcionog strujnog transformatora je veoma jednostavan. Kroz primarni namotaj, koji najčešće predstavlja i sam visokonaponski provodnik, teče naizmjenična struja i_1 . Naizmjenična struja koja protiče kroz primarni namotaj stvara magnetni fluks unutar jezgra strujnog transformatora. Ovaj magnetni fluks obuhvata se sa sekundarnim namotajem i u njemu indukuje elektromotornu silu. Kada su njegovi krajevi zatvoreni mjernim ili zaštitnim instrumentom, indukovana elektromotorna sila generiše struju i_2 kroz sekundarni namotaj.

Kod idealnog strujnog transformatora, struje primarnog i sekundarnog namotaja povezane su nazivnim prenosnim odnosom:

$$m = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{N_2}{N_1}$$

gdje su I_{1n} i I_{2n} nazivne struje, a N_1 i N_2 predstavljaju broj navojaka primarnog i sekundarnog namotaja, respektivno. Po pravilu, sekundarni namotaj ima značajno veći broj navojaka od primarnog.

Izbor nazivnih struja strujnog transformatora

- Nazivna primarna struja određuje se na osnovu maksimalne trajne struje šticećenog objekta
- Standardne vrijednosti nazivne primarne struje, uz dekadne umnoške:

$I_{1n} [A]$	10	12,5	15	20	25	30	40	60	75
--------------	----	------	----	----	----	----	----	----	----

- Nazivna sekundarna struja određuje se na osnovu nazivne struje mjernih i zaštitnih uređaja
- Standardne vrijednosti nazivne sekundarne struje:

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

Nazivna primarna struja strujnog transformatora određuje se na osnovu maksimalne trajne struje šticećenog objekta. Na primjer, primarna struja strujnog transformatora u vodnom polju određuje se na osnovu nazivne struje šticećenog voda. Za nazivnu vrijednost primarne struje strujnog transformatora mogu se usvojiti standardizovane vrijednosti kao i njihovi dekadni umnoški. Prilikom izbora nazivne primarne struje, potrebno je uzeti u obzir činjenicu da se strujni transformatori mogu trajno opteretiti strujom koja je 20% veća od njihove nazivne struje.

Standardizovane vrijednosti nazivne sekundarne struje strujnih transformatora su 1 i 5 A, a izbor nazivne struje zavisi od mjernih i zaštitnih uređaja koji se koriste. U postrojenjima sa dugim krugovima sekundarnog ožicećenja, odnosno u postrojenjima u kojima postoji velika udaljenost između mjesta ugradnje strujnih transformatora i mjesta smještanja mjerne i zaštitne opreme, obično se za nazivnu sekundarnu struju usvaja 1 A. Na ovaj način se minimizuju potrošnja i padovi napona u sekundarnim krugovima, koji mogu negativno uticati na rad relejne zaštite.

Primjer 1. Izbor nazivnog prenosnog odnosa

- Odrediti prenosni odnos strujnog transformatora za vodno polje. Maksimalna trajna struja dalekovoda je 305 A. Nazivna struja digitalnog multifunkcionalnog releja je 5 A.
- Nazivna primarna struja određuje se iz uslova:

$$1,2I_{1n} \geq 305 \text{ A}$$

odnosno:

$$I_{1n} \geq 254,2 \text{ A}$$

gdje je prva veća vrijednost $I_{1n} = 300 \text{ A}$

- Nazivna sekundarna struja je $I_{2n} = 5 \text{ A}$
- Nazivni prenosni odnos:

$$m = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{300}{5} = 60$$

6

Primjer 1.

Odrediti prenosni odnos strujnog transformatora koji se postavlja u vodno polje. Maksimalna trajna struja dalekovoda je 305 A. Na sekundar transformatora je potrebno priključiti digitalni multifunkcionalni relej čija je naznačena struja 5 A.

Rješenje:

Uzimajući u obzir da se strujni transformatori mogu trajno opteretiti strujom koja je 20% veća od njihove nazivne struje, primarna nazivna struja se može odrediti iz uslova:

$$1,2I_{1n} \geq 305 \text{ A}$$

odakle slijedi:

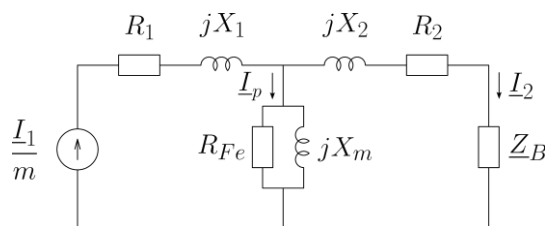
$$I_{1n} \geq 254,2 \text{ A}$$

Za nazivnu vrijednost primarne struje usvaja se prva veća standardizovana vrijednost, odnosno $I_{1n} = 300 \text{ A}$.

Nazivna sekundarna struja određena je nazivnom strujom zaštitnog releja koji je potrebno priključiti i iznosi $I_{2n} = 5 \text{ A}$, pa je nazivni prenosni odnos strujnog transformatora:

$$m = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{300}{5} = 60$$

Zamjenska šema realnog strujnog transformatora



- Veza između primarne i sekundarne struje:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{I}_1}{m} - \underline{I}_p$$

- Strujna greška:

$$\varepsilon[\%] = \frac{mI_2 - I_1}{I_1} 100$$

- Fazna greška:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$$

Ponašanje realnog transformatora se u određenoj mjeri razlikuje od ponašanja idealnog transformatora. Ovo je posljedica činjenice da, za razliku od idealnih transformatora, kod realnih transformatora postoje gubici u bakru, gubici usljed histerezisa i vrtložnih struja, dio magnetnog fluksa se rasipa, a za magnećenje magnetnog jezgra transformatora je potrebna određena struja. Svi od navedenih aspekata obuhvaćeni su zamjenskom šemom strujnog transformatora. Predstavljena zamjenska šema je svedena na sekundar.

Struja \underline{I}_1 predstavlja primarnu struju strujnog transformatora, koja istovremeno predstavlja i struju štićenog objekta. Impedanse primarnog i sekundarnog namotaja označene su sa $R_1 + jX_1$ i $R_2 + jX_2$, respektivno. Impedansa primarnog namotaja se može zanemariti, jer ne utiče na struju kontrolisanog strujnog izvora. Sa R_{Fe} je označena otpornost koja kvantifikuje gubitke u magnetnom jezgru transformatora, dok je sa X_m označena reaktansa magnećenja. Pobudna struja transformatora označena je sa \underline{I}_p i sastoji se od realne komponente koja odgovara gubicima usljed histerezisa i vrtložnih struja i struje magnećenja. Struja \underline{I}_2 predstavlja struju sekundara, dok impedansa \underline{Z}_B kvantifikuje potrošnju sekundarnih krugova ožičenja i svih mjernih ili zaštitnih

uređaja priključenih na sekundarni namotaj. Impedansa \underline{Z}_B naziva se bremenom (eng. *burden*) strujnog transformatora.

Na osnovu zamjenske šeme jasno je da primarna i sekundarna struja strujnog transformatora nijesu idealno proporcionalne. Konkretno, sekundarna struja data je relacijom:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{I}_1}{m} - \underline{I}_p$$

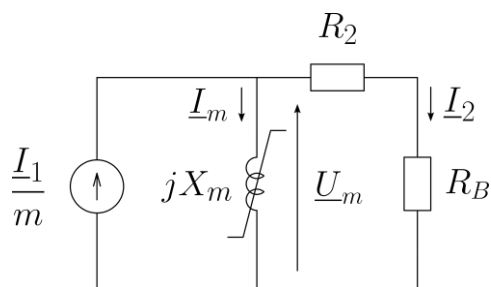
i razlikuje se od idealne struje sekundara za pobudnu struju \underline{I}_p . Drugim riječima, primarna i sekundarna struja nijesu idealno proporcionalne zbog postojanja gubitaka u magnetnom jezgru transformatora i struje magnećenja. Kao što se uočava, idealna i stvarna struja razlikuju se kako po modulu, tako i po faznom stavu.

Klase tačnosti strujnih transformatora za mjerenje

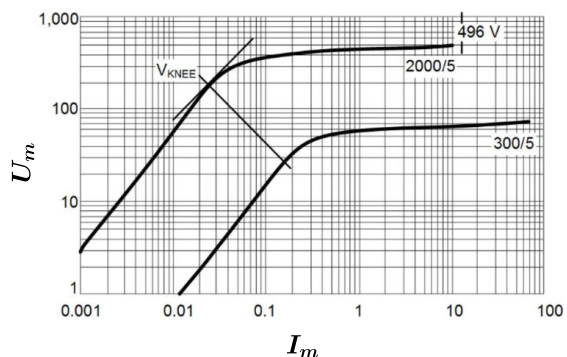
Klasa tačnosti	Strujna greška [%]				Fazna greška [min]			
	$0,05I_{1n}$	$0,2I_{1n}$	I_{1n}	$1,2I_{1n}$	$0,05I_{1n}$	$0,2I_{1n}$	I_{1n}	$1,2I_{1n}$
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30
1	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60

Na osnovu dozvoljenih vrijednosti strujne i fazne greške definisane su klase tačnosti strujnih transformatora prema IEC standardu 61869-2. Dozvoljene vrijednosti struje i fazne greške za različite klase tačnosti strujnih transformatora za mjerenje predstavljene su u tabeli. Kao što se uočava, dozvoljene vrijednosti strujne i fazne greške definišu se pri različitim nivoima primarne struje. Dozvoljene vrijednosti greške podrazumijevaju da je breme strujnog transformatora u opsegu od 25 do 100% nazivnog bremena, pri faktoru snage 0,8 induktivno. Uz navedene, u standardu su definisane i klase tačnosti 0,2 S i 0,5 S, kod kojih se dozvoljene vrijednosti struje i fazne greške definišu na opsegu od 1 do 120% nazivne struje, kao i klase tačnosti 3 i 5, kod kojih se definiše samo dozvoljena vrijednost strujne greške.

Zasićenje strujnog transformatora



$$U_m = (R_2 + R_B)I_2$$



Tačnost strujnih transformatora za mjerenje je garantovana pri primarnim strujama manjim od 120% nazivne struje. U slučaju kratkih spojeva, struje koje teku elementima elektroenergetskog sistema mogu biti višestruko veće od njihovih nazivnih vrijednosti. Ovako velike struje mogu dovesti do zasićenja magnetnog jezgra, čiji je uticaj na ponašanje strujnog transformatora potrebno detaljno izučiti za potrebe projektovanja sistema relejne zaštite.

Analiza uticaja zasićenja magnetnog jezgra na ponašanje strujnog transformatora će biti sprovedena polazeći od pojednostavljene zamjenske šeme prikazane na slici. U zamjenskoj šemi su zanemarene impedansa primarnog namotaja, otpornost grane magnećenja i reaktansa sekundarnog namotaja. Takođe, pretpostavljeno je da je breme transformatora čisto aktivnog karaktera. Kao što se uočava, efekat zasićenja magnetnog jezgra transformatora se uzima u obzir kroz nelinearnu reaktansu magnećenja.

Ponašanje reaktanse magnećenja opisuje karakteristika magnećenja strujnog transformatora koja opisuje zavisnost između efektivnih vrijednosti napona i struje magnećenja. Karakteristiku magnećenja određuje proizvođač strujnog transformatora fabričkim testiranjem i ista je sastavni dio tehničke

specifikacije strujnog transformatora. Karakteristika magnećenja je najčešće data u logaritamskoj skali, a njen tipičan izgled predstavljen je na slici. Kao što se uočava, za niske vrijednosti napona magnećenja, struja magnećenja je veoma niska. Takođe, za male vrijednosti napona magnećenja, karakteristika magnećenja je linearna. Za veće vrijednosti napona, karakteristika magnećenja ulazi u zasićenje, tako da male promjene napona magnećenja rezultiraju velikim promjenama struje magnećenja. Od praktičnog značaja je određivanje granice zasićenja, odnosno koljena karakteristike magnećenja. Prema IEC standardu 61869-2, granica zasićenja predstavlja tačku na karakteristici kod koje povećanje napona magnećenja za 10% rezultira povećanjem struje magnećenja za 50%.

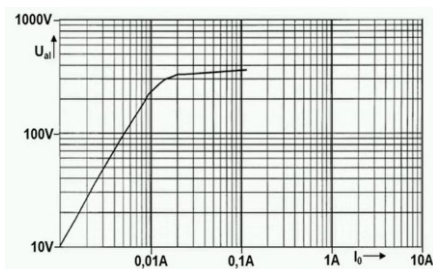
Posmatrajući pojednostavljenu zamjensku šemu strujnog transformatora, uočava se da je napon magnećenja dat izrazom:

$$U_m = (R_2 + R_B)I_2$$

odakle je jasno da napon magnećenja zavisi od bremena strujnog transformatora i sekundarne struje. Konkretno, povećanje bremena ili sekundarne struje rezultira povećanjem napona magnećenja, čime se radna tačka strujnog transformatora približava zoni zasićenja. Kako u zoni zasićenja struja magnećenja drastično raste, time se povećava i greška mjerenja strujnog transformatora. Iz tog razloga je prilikom izbora strujnog transformatora za zaštitu potrebno provjeriti da li postoji rizik od ulaska u zasićenje pri planiranim uslovima rada, kako s aspekta planiranog bremena, tako i s aspekta očekivanih struja kratkih spojeva.

Primjer 2. Provjera zasićenja strujnog transformatora

- Posmatra se strujni transformator parametara 1500/1 A, čije je breme 15Ω , a otpornost sekundarnog namotaja 3Ω .
- Da li posmatrani transformator ulazi u zasićenje kada kroz primarni namotaj protiče struja kratkog spoja efektivne vrijednosti 30 kA?



- Sekundarna struja u slučaju idealnog transformatora:

$$I_2 = \frac{I_1}{m} = \frac{30000}{1500} = 20 \text{ A}$$

- Napon magnećenja:

$$U_m = (15 + 3) \cdot 20 = 360 \text{ V}$$

- Struja magnećenja:

$$I_m \cong 0,05 \text{ A} \ll I_2$$

10

Primjer 2.

Posmatra se strujni transformator prenosnog odnosa 1500/1 A. Breme transformatora je 15Ω , dok je otpornost sekundarnog namotaja 3Ω . Transformator ima karakteristiku magnećenja prikazanu na slici. Da li posmatrani transformator ulazi u zasićenje kada kroz primarni namotaj protiče struja kratkog spoja efektivne vrijednosti 30 kA?

Rješenje:

Uzimajući u obzir prenosni odnos, sekundarna struja idealnog strujnog transformatora je:

$$I_2 = \frac{I_1}{m} = \frac{30000}{1500} = 20 \text{ A}$$

Napon magnećenja transformatora je tada:

$$U_m = (R_2 + R_B)I_2 = (3 + 15) \cdot 20 = 360 \text{ V}$$

Posmatrajući karakteristiku magnećenja, jasno je da struja magnećenja u analiziranom slučaju iznosi približno 0,05 A, što je zanemarljivo u odnosu na idealnu vrijednost sekundarne struje.

Primjer 3. Amplituda struje kvara i zasićenje

- Posmatra se strujni transformator iz prethodnog primjera. Odrediti talasni oblik sekundarne struje ako kroz primarni namotaj protiče simetrična struja kratkog spoja oblika:

$$i_1(t) = I_1 \sqrt{2} \sin \omega t$$

gdje je I_1 efektivna vrijednost struje kratkog spoja.

- Razmotriti slučajeve u kojima efektivna vrijednost struje kratkog spoja iznosi 30 kA i 60 kA.

11

Primjer 3.

Posmatra se strujni transformator iz prethodnog primjera. Odrediti talasni oblik sekundarne struje ako kroz primarni namotaj protiče simetrična struja kratkog spoja oblika:

$$i_1(t) = I_1 \sqrt{2} \sin \omega t$$

gdje je I_1 efektivna vrijednost struje kratkog spoja. Razmotriti slučajeve u kojima efektivna vrijednost struje kratkog spoja iznosi 30 kA i 60 kA.

Rješenje:

Pojednostavljena zamjenska šema strujnog transformatora se može jednostavno opisati diferencijalnom jednačinom prvog reda:

$$\frac{d\phi}{dt} = (R_2 + R_B)i_2(t)$$

gdje je sekundarna struja data izrazom:

$$i_2(t) = \frac{i_1(t)}{m} - i_m(\phi(t))$$

Zamjenom izraza za sekundarnu struju, diferencijalna jednačina dobija oblik:

$$\frac{d\phi}{dt} = (R_2 + R_B) \left(\frac{i_1(t)}{m} - i_m(\phi(t)) \right)$$

Važno je uočiti da struja magnećenja zavisi od vrijednosti magnetnog fluksa u jezgru transformatora, a ova zavisnost je u potpunosti definisana karakteristikom magnećenja. Karakteristika magnećenja koja opisuje zavisnost između magnetnog fluksa i struje magnećenja lako se određuje na osnovu karakterisitke magnećenja koja opisuje zavisnost između napona i struje magnećenja. Napon magnećenja je dat izrazom:

$$u_m(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}$$

Uz pretpostavku sinusoidalnog napona magnećenja i zanemarene početne uslove, vremenska promjena magnetnog fluksa određuje se kao:

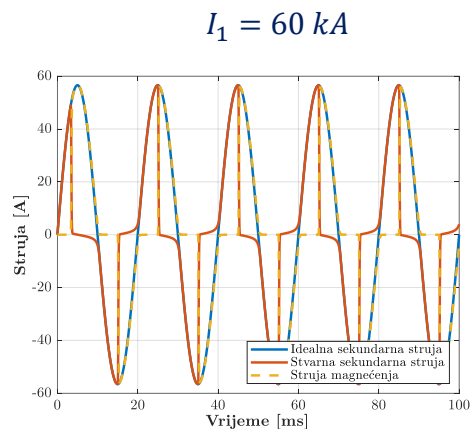
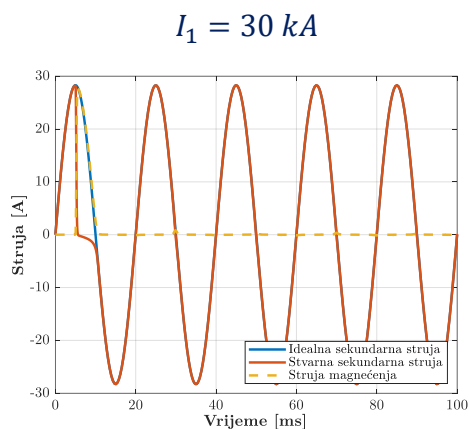
$$\phi(t) = \int_0^t u_m(t) dt = \int_0^t U_m \sqrt{2} \sin \omega t dt = -\frac{U_m \sqrt{2}}{\omega} \cos \omega t$$

odakle je maksimalna vrijednost magnetnog fluksa:

$$\phi_m = \frac{U_m \sqrt{2}}{\omega}$$

Prema tome, sa $U_m(I_m)$ karakteristike magnećenja se jednostavno prelazi na $\phi(i_m)$ karakteristiku magnećenja koja je potrebna za rješavanje diferencijalne jednačine.

Primjer 3. Amplituda struje kvara i zasićenje



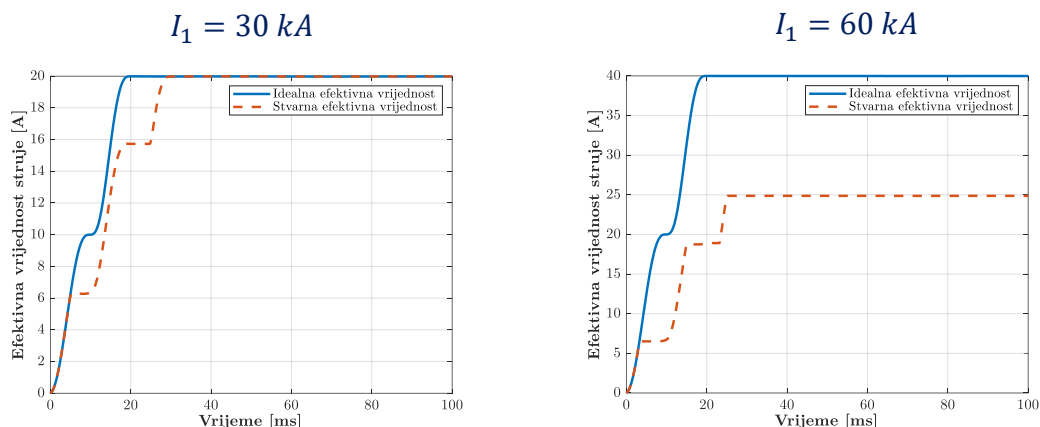
12

Vremenske promjene struja strujnog transformatora za $I_p = 30 \text{ kA}$ i $I_p = 60 \text{ kA}$ prikazane su na slikama.

Prelazni proces na početku je posljedica pretpostavke $\phi(0) = 0$, odnosno pretpostavke da je strujni transformator u potpunosti razmagnetisan.

Kao što se uočava, kada efektivna vrijednost primarne struje iznosi 30 kA , sekundarna struja je praktično identična idealnoj sekundarnoj struji. Međutim, kada efektivna vrijednost primarne struje iznosi 60 kA , strujni transformator ulazi u zasićenje, koje je praćeno izobličenjem talasnog oblika sekundarne struje usljed periodičnog rasta struje magnećenja.

Primjer 3. Amplituda struje kvara i zasićenje



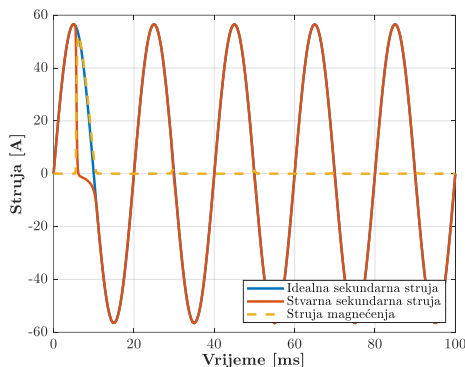
13

Savremeni zaštitni releji ne donose odluku o djelovanju direktno na bazi talasnog oblika mjerene struje, već se najčešće koriste izvedene veličine. Algoritmi implementirani unutar samog releja u opštem slučaju nijesu poznati. Za potrebe demonstracije, neka se zaštitni relej za donošenje odluke o djelovanju oslanja na efektivnu vrijednost osnovnog harmonika koja se određuje pomoću jednostavnog FIR filtra. Vremenske promjene efektivne vrijednosti određene na osnovu talasnih oblika sekundarne struje prikazane su za različite nivoe primarne struje.

Kao što se uočava, kada je efektivna vrijednost primarne struje 60 kA, greška mjerenja strujnog transformatora je nedozvoljeno velika. Ako se efektivna vrijednost sekundarne struje koristi za donošenje odluke o djelovanju prekostrujnog releja, te ako je proradna struja releja podešena na 30 A, jasno je da bi u ovom slučaju došlo do zatajenja zaštite iako je stvarna struja značajno veća od proradne struje zaštitnog releja.

Primjer 4. Breme transformatora i zasićenje

- Posmatra se strujni transformator iz prethodnog primjera. Odrediti talasni oblik sekundarne struje, ako kroz primarni namotaj protiče struja kratkog spoja efektivne vrijednosti 60 kA, a breme transformatora iznosi 5 Ω .



14

Primjer 4.

Posmatra se strujni transformator iz prethodnog primjera. Odrediti talasni oblik sekundarne struje, ako kroz primarni namotaj protiče simetrična struja kratkog spoja efektivne vrijednosti 60 kA, a breme transformatora iznosi 5 Ω umjesto 15 Ω .

Rješenje:

Talasni oblici struja strujnog transformatora u posmatranom scenariju prikazani su na slici. Kao što je ranije pokazano, kada efektivna vrijednost primarne struje iznosi 60 kA, strujni transformator je ulazio u zasićenje za breme transformatora od 15 Ω . Smanjenjem bremena transformatora na 5 Ω , strujni transformator pri istoj primarnoj struji očigledno ne ulazi u zasićenje, već vjerno transformiše primarnu struju.

Ovaj primjer jasno ilustruje značaj prelaska sa starih elektromehaničkih zaštitnih releja na savremene digitalne releje. Dok su elektromehanički releji imali tipičnu potrošnju od 3 do 10 VA po releju, potrošnja savremenih

numeričkih releja je obično manja od 0,5 VA. Drastično smanjenje bremena direktno povećava otpornost strujnih transformatora na zasićenje tokom kratkih spojeva u mreži i drugih prelaznih procesa praćenih velikim vrijednostima struje. Na ovaj način se obezbjeđuje pouzdanije djelovanje svih zaštitnih uređaja priključenih preko strujnih transformatora.

Primjer 5. Jednosmjerna komponenta i zasićenje

- Posmatra se strujni transformator iz prethodnog zadatka.
- Odrediti talasni oblik sekundarne struje ako kroz primarni namotaj protiče asimetrična struja kratkog spoja oblika:

$$i_1(t) = I_1\sqrt{2}\left(\sin(\omega t - \theta) + \sin \theta e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

- Pretpostaviti da je breme strujnog transformatora 5Ω .
- Pretpostaviti da efektivna vrijednost simetrične komponente struje kratkog spoja iznosi 15 kA, a da se kratki spoj dešava pri vrijednosti ugla $\theta = 60^\circ$.
- Razmotriti slučajeve u kojima vremenska konstanta jednosmjerne komponente struje kratkog spoja iznosi 10 i 50 milisekundi.

15

Primjer 5.

Posmatra se strujni transformator iz prethodnog zadatka. Odrediti talasni oblik sekundarne struje ako kroz primarni namotaj protiče asimetrična struja kratkog spoja oblika:

$$i_1(t) = I_1\sqrt{2}\left(\sin(\omega t - \theta) + \sin \theta e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Pretpostaviti da efektivna vrijednost simetrične komponente struje kratkog spoja iznosi 15 kA, a da se kratki spoj dešava pri vrijednosti ugla $\theta = 60^\circ$. Pretpostaviti da je breme strujnog transformatora 5Ω . Razmotriti slučajeve u kojima vremenska konstanta jednosmjerne komponente struje kratkog spoja iznosi 10 i 50 milisekundi.

Rješenje:

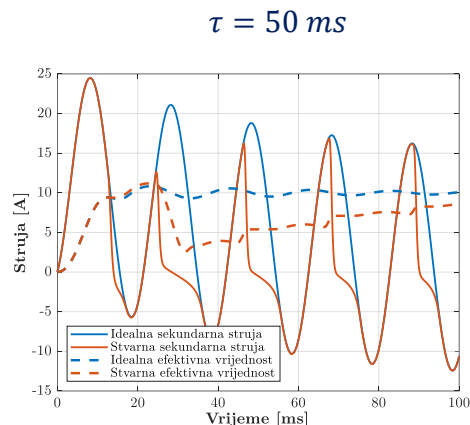
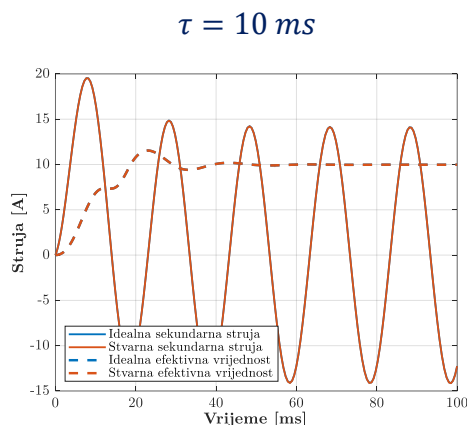
U do sada razmatranim primjerima, struja kratkog spoja je sadržala samo naizmjeničnu komponentu. U praksi, pored naizmjenične komponente obično

postoji i jednosmjerna komponenta, čija amplituda zavisi od trenutka na periodi naizmjeničnog napona u kojem se kratki spoj dešava. Trajanje jednosmjerne komponente zavisi od vremenske konstante τ čija se vrijednost određuje kao:

$$\tau = \frac{X}{\omega R}$$

gdje su R i X ekvivalentna otpornost i reaktansa u odnosu na mjesto kvara. S obzirom na očekivane vrijednosti odnosa X/R , vrijednosti vremenske konstante τ su u distributivnim mrežama obično manje od 20 ms. Sa druge strane, u prenosnim mrežama najviših napona, posebno u blizini velikih generatora, mogu se očekivati vrijednosti vremenske konstante veće od 100 ms. Prema tome, neophodno je izučiti uticaj jednosmjerne komponente na funkcionisanje strujnih transformatora.

Primjer 5. Jednosmjerna komponenta i zasićenje

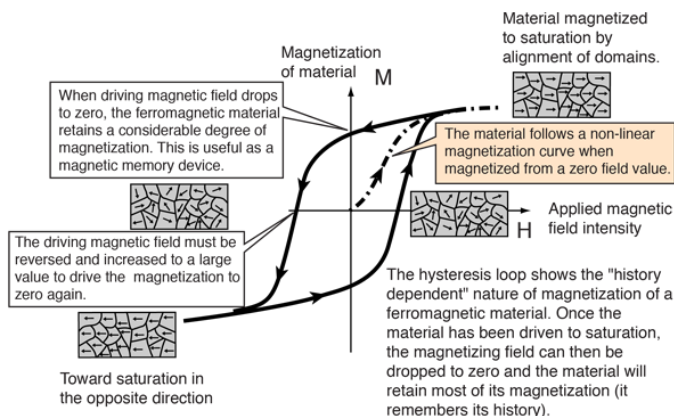


Na slikama su prikazane vremenske promjene idealne i stvarne sekundarne struje strujnog transformatora kada primarnim namotajem teče asimetrična struja kratkog spoja za različite vrijednosti vremenske konstante τ . Kao što se uočava, kada je vrijednost vremenske konstante 10 ms, jednosmjerna komponenta iščezava nakon prve periode, a strujni transformator ne ulazi u zasićenje, zbog čega sekundarna struja predstavlja vjernu sliku primarne struje. Sa druge strane, kada je vrijednost vremenske konstante 50 ms, jednosmjerna komponenta dovodi do zasićenja magnetnog jezgra strujnog transformatora i izobličenjem talasnog oblika sekundarne struje. Usljed značajne potcjene struje kratkog spoja, postoji rizik od zatajenja relejne zaštite. Ipak, važno je naglasiti da nakon iščezavanja jednosmjerne komponente, radna tačka strujnog transformatora se može vratiti u linearnu regiju, što bi omogućilo djelovanje zaštite sa zakašnjenjem. Ovo naravno zavisi od efektivne vrijednosti simetrične komponente struje kvara.

Kao što se uočava iz vremenskih promjena efektivne vrijednosti sekundarne struje za slučaj vremenske konstante $\tau = 50 \text{ ms}$, stvarna sekundarna struja je gotovo identična idealnoj struji neposredno nakon kratkog spoja. Teorijski, zaštitni relej bi u ovom kratkom periodu mogao reagovati. Ovo naravno zavisi

od konstrukcije releja, odnosno da li se radi o elektromehaničkom ili mikroprocesorskom releju, kao i od podešenog vremenskog zatezanja.

Histerezisna petlja feromagnetnog materijala



Do sada korišćena kriva magnećenja predstavlja alternativnu formu histerezisne petlje feromagnetnog materijala prikazane na slici. Predstavljena kriva je poznata i kao BH karakteristika, jer opisuje zavisnost magnetne indukcije B od jačine magnetnog polja H u feromagnetnom materijalu. Osim analiziranih aspekata ulaska magnetnog kola u zasićenje, važan aspekt feromagnetnog materijala je i remanentna indukcija. Kada se magnetno jezgro prethodno ekscitovalo do zasićenja, nakon prekida struje magnećenja, vrijednost magnetne indukcije u jezgru ne pada na nulu, već zadržava vrijednost B_r poznatu kao remanentna indukcija. Postojanje remanentne indukcije znači da u magnetnom jezgru transformatora postoji magnetni fluks. Remanentni fluks ϕ_r može biti pozitivan ili negativan zavisno od smjera prethodne ekscitacije, a u zavisnosti od konstrukcije magnetnog jezgra i vrste feromagnetnog materijala može iznositi i do 80% maksimalne vrijednosti fluksa. Matematički, remanentni fluks se jednostavno uzima u obzir rješavanjem diferencijalne jednačine strujnog transformatora uz nenulti početni uslov $\phi(0) = \phi_r$.

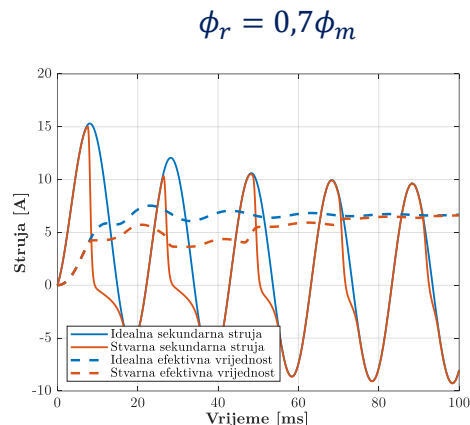
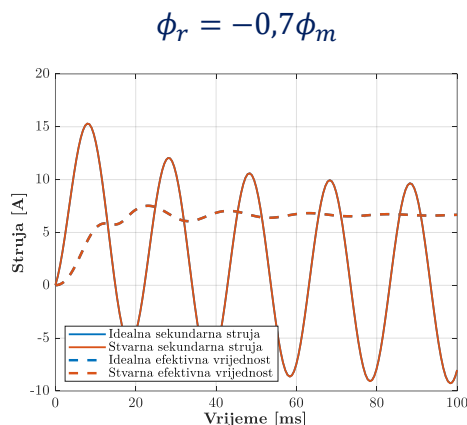
Primjer 6. Remanentna indukcija i zasićenje

- Posmatra se strujni transformator iz prethodnog zadatka.
- Odrediti talasni oblik sekundarne struje ako kroz primarni namotaj protiče asimetrična struja kratkog spoja čija je efektivna vrijednost u ustaljenom stanju $I_p = 10 \text{ kA}$, a kratki spoj se dešava u trenutku $\theta = 60^\circ$. Vremenska konstanta jednosmjerne komponente je $\tau = 25 \text{ ms}$.
- Pretpostaviti da je breme strujnog transformatora 5Ω .
- Razmotriti slučajeve u kojima inicijalna vrijednost magnetnog fluksa odgovara remanentnom fluksu u iznosu od -70% odnosno 70% maksimalne vrijednosti sa karakteristike magnećenja.

Primjer 6.

Posmatra se strujni transformator iz prethodnog zadatka. Odrediti talasni oblik sekundarne struje ako kroz primarni namotaj protiče asimetrična struja kratkog spoja čija je efektivna vrijednost u ustaljenom stanju $I_p = 10 \text{ kA}$, a kratki spoj se dešava u trenutku $\theta = 60^\circ$. Vremenska konstanta jednosmjerne komponente je $\tau = 25 \text{ ms}$. Pretpostaviti da je breme strujnog transformatora 5Ω . Razmotriti slučajeve u kojima inicijalna vrijednost magnetnog fluksa odgovara remanentnom fluksu u iznosu od -70% odnosno 70% maksimalne vrijednosti sa karakteristike magnećenja.

Primjer 6. Remanentna indukcija i zasićenje



19

Rješenje:

Na slikama su predstavljene vremenske promjene struja strujnog transformatora za slučaj kada inicijalna vrijednost magnetnog fluksa odgovara negativnoj odnosno pozitivnoj vrijednosti remanentnog fluksa, respektivno. Kao što se uočava, u slučaju kada inicijalna vrijednost fluksa odgovara negativnoj vrijednosti remanentnog fluksa, asimetrična struja kratkog spoja ne dovodi do zasićenja magnetnog jezgra strujnog transformatora. Sa druge strane, kada inicijalna vrijednost fluksa odgovara pozitivnoj vrijednosti remanentnog fluksa, strujni transformator ulazi u zasićenje, što rezultira distorzijom talasnog oblika i potcjenom efektivne vrijednosti struje kratkog spoja. Imajući prethodno u vidu, remanentna indukcija ima kritičan uticaj na ponašanje strujnog transformatora pri visokim strujama kratkih spojeva, zbog čega je neophodno uzeti u obzir pri projektovanju i analizi strujnih transformatora, posebno za primjene u relejnoj zaštiti.

Klase strujnih transformatora za zaštitu

Klasa	Ograničenje remanentnog fluksa	Kriterijum dizajna
P	Ne	Performanse pri simetričnim strujama kratkih spojeva
PR	Da	
PX	Ne	Karakteristika magnećenja
PXR	Da	
TPX	Ne	Performanse pri asimetričnim strujama kratkih spojeva
TPY	Da	
TPZ	Da	

Kroz prethodne primjere pokazano je kako različiti faktori mogu uticati na zasićenje strujnih transformatora. S obzirom na posljedice zasićenja transformatora na djelovanje zaštitnih releja, jasno je da je pravilan izbor strujnih transformatora jedan od osnovnih preduslova pouzdanog i efikasnog funkcionisanja sistema relejne zaštite. Iz tog razloga, IEC standardom 61869-2 propisane su različite klase strujnih transformatora za zaštitu prikazane u tabeli.

Kao što se uočava, klase strujnih transformatora za zaštitu se mogu svrstati u dvije kategorije prema tome da li ograničavaju vrijednost remanentnog fluksa ili ne. Strujni transformatori klasa P, PX i TPX ne postavljaju ograničenje u pogledu vrijednosti remanentnog fluksa. Kod drugih klasa, remanentni fluks je ograničen na 10% vrijednosti fluksa zasićenja. Ovo se najčešće postiže konstrukcijom magnetnog jezgra sa vazдушnim procjepom.

Za strujne transformatore klasa P i PR, klase tačnosti definišu se na osnovu performansi transformatora pri simetričnim strujama kratkih spojeva. Prema tome, strujni transformatori klasa P i PR su pogodni za primjenu u djelovima elektroenergetskog sistema u kojima jednosmjerna komponenta struje kratkog

spoja iščezava veoma brzo. Najveći broj strujnih transformatora u elektroenergetskim sistemima je upravo ovog tipa. Strujne transformatore klasa PX i PXR karakteriše niska vrijednost rasipne reaktanse. Za transformatore iz ove kategorije je do sada korišćena pojednostavljena zamjenska šema potpuno precizna, pa se performanse transformatora lako utvrđuju uz poznatu sekundarnu karakteristiku magnećenja, otpornost namotaja sekundara i breme transformatora. Strujni transformatori klasa PX i PXR pogodni su za primjenu u situacijama u kojima struja kratkih spojeva značajno prevazilazi primarnu nazivnu struju, a jednosmjerna komponenta struje iščezava veoma brzo. Na kraju, za transformatore klasa TPX, TPY i TPZ, klase tačnosti se definišu na osnovu performansi transformatora pri asimetričnim strujama kratkih spojeva. Prema tome, ovi transformatori su pogodni za primjenu u prenosnim sistemima najviših napona, koje karakterišu velike vrijednosti vremenske konstante jednosmjerne komponente struje kratkog spoja.

Klase tačnosti strujnih transformatora P i PR

Klasa	Strujna greška [%]	Fazna greška [min]	Kompozitna greška [%]
5P i 5PR	1	60	5
10P i 10PR	3	n/d	10

$$\varepsilon_c = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (mi_2 - i_1)^2 dt}$$

Klase tačnosti P i PR strujnih transformatora predstavljene su u tabeli. Pored strujne i fazne greške, za strujne transformatore za zaštitu se definiše i dozvoljena vrijednost kompozitne greške:

$$\varepsilon_c = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (mi_2 - i_1)^2 dt}$$

Nazivni granični faktor tačnosti

- Nazivni granični faktor tačnosti (eng. *Accuracy Limit Factor*, ALF):

$$ALF = \frac{I_{gr}}{I_{1n}}$$

gdje je I_{gr} nazivna granična struja pri kojoj se garantuju performanse strujnog transformatora, a I_{1n} je nazivna primarna struja

- Standardne vrijednosti nazivnog graničnog faktora tačnosti:

ALF	5	10	15	20	30
------------	---	----	----	----	----

- 5P20:** strujni transformator klase P, kod kojeg maksimalna vrijednost kompozitne greške iznosi $\pm 5\%$ pri simetričnim strujama kratkog spoja koje su 20 puta veće od nazivne primarne struje

Za razliku od strujnih transformatora za mjerenje kod kojih se dozvoljena greška definiše pri različitim nivoima opterećenja, granične vrijednosti kompozitne greške strujnih transformatora za zaštitu predstavljene u tabeli na prethodnom slajdu garantuju se pri nazivnoj graničnoj struji I_{gr} . Umjesto nazivne granične struje I_{gr} , u tehničkoj specifikaciji strujnog transformatora definiše se nazivni granični faktor tačnosti (eng. *Accuracy Limit Factor*, **ALF**), koji se određuje kao:

$$ALF = \frac{I_{gr}}{I_{1n}}$$

U domaćoj literaturi, nazivni granični faktor tačnosti poznat je i kao prekostrujni broj.

Standardizovane vrijednosti nazivnog graničnog faktora tačnosti predstavljene su u tabeli.

Strujni transformatori za zaštitu se uvijek označavaju tako što se prvo navede

klasa tačnosti, zatim tip transformatora i na kraju vrijednost nazivnog graničnog faktora tačnosti. Tako oznaka 5P20 ukazuje da se radi o transformatoru klase P, kod kojeg maksimalna vrijednost kompozitne greške iznosi $\pm 5\%$ pri simetričnim strujama kratkog spoja koje su 20 puta veće od nazivne primarne struje.

Nazivni granični faktor tačnosti odnosi se na scenario u kojem je strujni transformator opterećen naznačenim bremenom pri faktoru snage 0,8 induktivno. Izuzetak su strujni transformatori naznačenog bremena manjeg od 5 VA, kod kojih se pretpostavlja jedinični faktor snage.

Granični faktor tačnosti

- Granični faktor tačnosti se razlikuje od nazivnog pri nenazivnom opterećenju strujnog transformatora:

$$ALF' = ALF \frac{R_2 + R_{Bn}}{R_2 + R_B}$$

gdje je R_2 otpornost sekundarnog namotaja, R_{Bn} je naznačeno breme strujnog transformatora, a R_B je njegovo stvarno breme

- Standardne vrijednosti nazivnog bremena strujnog transformatora:

$S_{Bn} [VA]$	2,5	5	10	15	30
---------------	-----	---	----	----	----

- Konverzija snage u impedansu:

$$S_{Bn} = Z_{Bn} I_{2n}^2$$

Potrošnja zaštitnih uređaja priključenih na sekundar strujnog transformatora je rijetko identična naznačenom bremenu. Kada se stvarno opterećenje strujnog transformatora razlikuje od naznačenog, granični faktor tačnosti ALF' se razlikuje od njegove naznačene vrijednosti i određuje se na osnovu relacije:

$$ALF' = ALF \frac{R_2 + R_{Bn}}{R_2 + R_B}$$

gdje je R_2 otpornost sekundarnog namotaja, R_{Bn} je naznačeno breme strujnog transformatora, a R_B je njegovo stvarno breme. Jasno je da se vrijednost graničnog faktora tačnosti povećava ako je breme strujnog transformatora manje od naznačenog. Drugim riječima, pri sekundarnom opterećenju nižem od nazivnog, strujni transformator obezbjeđuje adekvatnu preciznost pri većim vrijednostima primarnih struja. Ovo posebno dolazi do izražaja kod strujnih transformatora korišćenih u kombinaciji sa elektromehaničkim relejima na koje se sada priključuju mikroprocesorski releji. Proizvođači zaštitnih uređaja u tehničkoj specifikaciji releja definišu vrijednost graničnog faktora tačnosti ALF' pri kojoj se garantuje adekvatno funkcionisanje zaštitnog releja.

Najčešće se koriste strujni transformatori nazivnih bremena prikazanih u tabeli. Vrijednosti naznačenog bremena u VA se lako konvertuju u Ω na osnovu relacije:

$$S_{Bn} = Z_{Bn} I_{2n}^2$$

gdje je Z_{Bn} naznačeno breme strujnog transformatora u Ω .

Primjer 7. Proračun graničnog faktora tačnosti

- Za potrebe zaštite nadzemnog voda, prorađnu struju prekostrujne visokopodesive zaštite je potrebno podesiti na $15I_n$.
- Zaštita se realizuje korišćenjem SIPROTEC 7SJ82 releja koji zahtijeva vrijednost graničnog faktora tačnosti $ALF' \geq 20$.
- Da li se za ovu namjenu može koristiti strujni transformator 300/1 A, 5P10, 5 VA, za koji je $R_B = 0,6 \Omega$ i $R_2 = 3 \Omega$?
- Nazivno breme transformatora:

$$R_{Bn} = \frac{S_{Bn}}{I_{2n}^2} = \frac{5}{1^2} = 5 \Omega$$

- Granični faktor tačnosti:

$$ALF' = ALF \frac{R_2 + R_{Bn}}{R_2 + R_B} = 10 \frac{3 + 5}{3 + 0,6} = 22,2 > 20$$

24

Primjer 7.

Za potrebe zaštite nadzemnog voda, prorađnu struju prekostrujne visokopodesive zaštite je potrebno podesiti na $15I_n$. Zaštita se realizuje korišćenjem SIPROTEC 7SJ82 releja koji za ispravno funkcionisanje zahtijeva vrijednost graničnog faktora tačnosti $ALF' \geq 20$. Da li se za ovu namjenu može koristiti strujni transformator 300/1 A, 5P10, 5 VA? Pretpostaviti da je stvarno breme strujnog transformatora $0,6 \Omega$, te da je otpornost sekundarnog namotaja 3Ω .

Rješenje:

Na osnovu naznačene struje i bremena strujnog transformatora, slijedi:

$$R_{Bn} = \frac{S_{Bn}}{I_{2n}^2} = \frac{5}{1^2} = 5 \Omega$$

Tada je stvarni granični faktor tačnosti:

$$ALF' = ALF \frac{R_2 + R_{Bn}}{R_2 + R_B} = 10 \frac{3 + 5}{3 + 0,6} = 22,2$$

Očigledno, stvarna vrijednost graničnog faktora tačnosti je veća od 15, što su zahtjevi u pogledu zaštite nadzemnog voda, kao i od 20, što su zahtjevi samog zaštitnog releja. Prema tome, strujni transformator se može koristiti za realizaciju sistema relejne zaštite.

Naponski mjerni transformatori

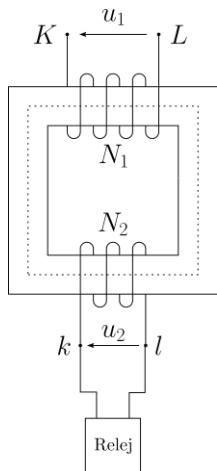
Definicija i vrste naponskih transformatora

- Mjerni transformator koji transformiše primarni napon u sekundarni napon proporcionalne vrijednosti
- Vrste naponskih transformatora:
 - Indukcioni naponski transformatori
 - Kapacitivni naponski transformatori
 - Optički naponski transformatori

Naponski transformator je mjerni transformator koji transformiše primarni napon u sekundarni napon proporcionalne vrijednosti, prilagođen za priključenje mjernih i zaštitnih uređaja.

Prema njihovoj konstrukciji, razlikuju se induktivni, kapacitivni i optički naponski transformatori, pri čemu su prve dvije grupe u dominantnoj primjeni. Dok se induktivni naponski transformatori obično koriste na nižim naponskim nivoima, za visoke i ultra visoke napone karakteristične za prenosnu mrežu se vezuje primjena kapacitivnih naponskih transformatora.

Princip rada indukcionih naponskih transformatora



- Nazivni prenosni odnos naponskog transformatora:

$$m = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{N_1}{N_2}$$

gdje su U_{1n} i U_{2n} nazivni naponi, a N_1 i N_2 broj navojaka primarnog i sekundarnog namotaja

Princip rada indukcionih naponskih transformatora je identičan indukcionim strujnim transformatorima. Na magnetnom jezgru nalazi se primarni namotaj koji je priključen na primarni napon. Primarni napon uzrokuje struju kroz primarni namotaj, koja stvara magnetni fluks u magnetnom jezgru transformatora. Ovaj magnetni fluks se obuhvata sa sekundarnim namotajem i u njemu indukuje napon koja je proporcionalan primarnom naponu.

Kod idealnog naponskog transformatora, primarni i sekundarni napon su idealno proporcionalni u skladu sa nazivnim prenosnim odnosom:

$$k_r = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{N_1}{N_2}$$

gdje su U_{1n} i U_{2n} nazivni naponi, a N_1 i N_2 predstavljaju broj navojaka primarnog i sekundarnog namotaja, respektivno. Po pravilu, primarni namotaj ima značajno veći broj navojaka od sekundarnog.

Izbor nazivnih napona naponskog transformatora

- Nazivni primarni napon odgovara nazivnom naponu mreže (faznom ili linijskom)
- Standardne vrijednosti nazivnog sekundarnog napona:

Tip transformatora	U_{2n} [V]
Trofazni transformator	100, 110, 200
Dvopolno izolovan monofazni transformator	100, 110, 200
Jednopolno izolovan monofazni transformator	$\frac{100}{\sqrt{3}}$, $\frac{110}{\sqrt{3}}$, $\frac{200}{\sqrt{3}}$

Primarni nazivni napon zavisi od naponskog nivoa mreže na koju se naponski transformator priključuje. Standardni naponski nivoi propisani su IEC standardom 60038. Kod trofaznih naponskih transformatora, nazivni primarni napon odgovara nazivnom linijskom naponu mreže. Isto važi i za dvopolno izolovane monofazne naponske transformatore koji se priključuju između faznih provodnika. Sa druge strane, za jednopolno izolovane monofazne naponske transformatore koji se priključuju između faznog provodnika i zemlje ili između neutralne tačke trofaznog sistema i zemlje, nazivni primarni napon odgovara nazivnom faznom naponu mreže.

Standardne nazivne vrijednosti sekundarnog napona u Evropi, u skladu sa IEC standardom 61869-3, prikazane su u tabeli za različite tipove naponskih transformatora. Preferirane vrijednosti sekundarnog napona su 100 i 110 V za dvopolno izolovane transformatore, dok se primjena nazivnog napona od 200 V preporučuje u slučaju dugih krugova sekundarnog ožičenja. Naponski transformatori mogu imati i pomoćni tercijerni namotaj koji se spreže u otvoreni trougao, čime se omogućava određivanje nulte komponente napona. Nazivni napon pomoćnog namotaja je najčešće jednak trećini pripadajućeg linijskog napona. Savremeni mikroprocesorski releji imaju sposobnost

numeričkog određivanja nulte komponente napona, pa se pomoćni namotaj može koristiti za prigušenje ferorezonanse zatvaranjem otvorenog trougla otpornikom.

Klase tačnosti naponskih transformatora za mjerenje

Klasa tačnosti	Naponska greška [%]	Fazna greška [min]
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1	1,0	40
3	3,0	n/d

Zamjenska šema indukcionog naponskog transformatora je identična zamjenskoj šemi indukcionog strujnog transformatora. Jedina razlika je što je primarni namotaj, umjesto na kontrolisani strujni izvor, priključen na kontrolisani naponski izvor napona $\frac{U_1}{m}$. Iz istih razloga kao i kod strujnog transformatora, primarni i sekundarni napon nijesu idealno proporcionalni.

Razlika između idealnog i stvarnog sekundarnog napona kvantifikuje se pomoću naponske i fazne greške. Na osnovu dozvoljenih vrijednosti naponske i fazne greške, u IEC standardu 61869-3 definisane su klase tačnosti naponskih indukcionih transformatora za mjerenje. Dostupne klase tačnosti induktivnih naponskih transformatora predstavljene su u tabeli. Podrazumijeva se da naponska i fazna greška neće premašiti dozvoljene vrijednosti za primarne napone u opsegu od 80 do 120% nazivnog napona. Pritom, opterećenje naponskog transformatora nalazi se u opsegu od 0 do 100% nazivnog opterećenja pri jediničnom faktoru snage, odnosno u opsegu od 25 do 100% nazivnog opterećenja pri faktoru snage 0,8 induktivno.

Klase tačnosti naponskih transformatora za zaštitu

Klasa tačnosti	Naponska greška [%]	Fazna greška [min]
3P	3	120
6P	6	240

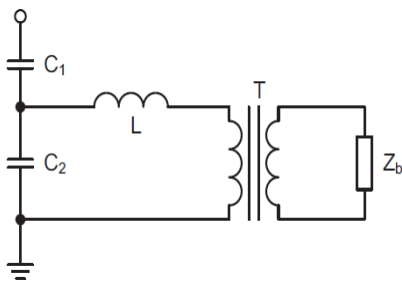
Nazivni naponski faktor	Nazivno vrijeme	Način priključenja transformatora i uzemljenja mreže
1,2	Trajno	Između faza ili između zvjezdišta transformatora i zemlje
1,2	Trajno	Faza-zemlja u direktno ili efikasno uzemljenoj mreži
1,5	30 sekundi	
1,2	Trajno	Faza-zemlja u neefikasno uzemljenoj mreži sa AIZ
1,9	30 sekundi	
1,2	Trajno	Faza-zemlja u neefikasno uzemljenoj mreži bez AIZ
1,9	8 sati	

Za razliku od induktivnih strujnih transformatora, induktivni naponski transformatori nemaju problema sa zasićenjem. Međutim, kod izbora naponskih transformatora za zaštitu važno je voditi računa o činjenici da primarni napon može značajno odstupati od nazivnog napona za vrijeme kratkih spojeva. U slučaju metalnog kratkog spoja, napon pogođene faze na mjestu kvara je jednak nuli. Kod kratkih spojeva preko impedanse, napon pogođenih faza je nešto viši, ali ipak daleko ispod definisanog opsega vrijednosti za naponske transformatore za mjerenje. Na kraju, kod kratkih spojeva u izolovanim mrežama i mrežama uzemljenih preko impedanse, naponi zdravih faza dostižu vrijednosti linijskih napona. Prema tome, naponski transformatori za zaštitu moraju obezbijediti adekvatne performanse na značajno širem opsegu primarnih napona u odnosu na naponske transformatore za mjerenje. Klase tačnosti naponskih transformatora za zaštitu sa graničnim vrijednostima naponske i fazne greške prikazane su u prvoj tabeli.

Naponski transformatori za zaštitu moraju obezbijediti precizno mjerenje u skladu sa dozvoljenim vrijednostima naponske i fazne greške na opsegu od 5% nominalnog napona do napona $F_U U_n$. F_U predstavlja nazivni naponski faktor

čija vrijednost zavisi od načina priključenja naponskog transformatora na mrežu i načina uzemljenja mreže. Standardne vrijednosti nazivnog naponskog faktora predstavljene su u drugoj tabeli. Kao što se uočava, bez obzira na način priključenja i način uzemljenja mreže, naponski transformatori moraju trajno izdržati rad pri primarnom naponu koji je 20% veći od nazivnog. U efikasno uzemljenim mrežama, u kojima kratki spojevi mogu biti praćeni blagim porastom napona, naponski transformatori moraju u trajanju od 30 sekundi izdržati rad pri primarnom naponu koji je 50% veći od nazivnog. Ovaj vremenski period je na strani sigurnosti imajući u vidu činjenicu da se u efikasno uzemljenim mrežama teži minimizovati vrijeme trajanja kratkog spoja zbog povećanih strujnih naprezanja. Na kraju, u neefikasno uzemljenim mrežama u kojima je zemljospoj praćen rastom napona zdravih faza do linijskih vrijednosti, naponski transformatori moraju zadržati adekvatne performanse pri naponima koji su 90% veći od nazivnog napona. Dok u mrežama sa automatskim isključenjem zemljospoja naponski transformatori povećane napone moraju izdržati 30 sekundi, u mrežama bez automatskog isključenja zemljospoja ovaj interval iznosi 8 sati.

Princip rada kapacitivnih naponskih transformatora



- Međunapon na kondenzatoru C_2 :

$$U_c = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

- Rast opterećenja indukcionog transformatora rezultira rastom međunapona
- Uticaj opterećenja se kompenzuje prigušnicom:

$$L = \frac{1}{\omega_n^2(C_1 + C_2)}$$

30

Kapacitivni naponski transformatori dominantnu primjenu nalaze u mrežama visokih napona. Ovo je posljedica činjenice da veličina i cijena induktivnih naponskih transformatora eksponencijalno rastu sa naponskim nivoom, dok kapacitivni naponski transformatori predstavljaju značajno ekonomičnije rješenje za napone iznad 145 kV.

Kao što je prikazano na slici, kapacitivni naponski transformator sastoji se od dva osnovna dijela: kapacitivnog naponskog djelitelja i indukcionog naponskog transformatora. Kapacitivni djelitelj čine dva redno vezana kondenzatora C_1 i C_2 . Primarni napon se dijeli između ova dva kondenzatora inverzno proporcionalno njihovim kapacitivnostima, tako da se na kondenzatoru C_2 pojavljuje međunapon:

$$U_c = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Međunapon U_c je očigledno proporcionalan primarnom naponu. Kako bi se ovaj napon, reda 10 do 20 kV u mrežama visokih napona, sveo na vrijednosti koje omogućavaju priključenje mjerne i zaštitne opreme, njegova vrijednost se

mjeri pomoću indukcionog naponskog transformatora. Na ovaj način se takođe obezbjeđuje i galvansko odvajanje sekundarnih krugova od primarnog strujnog kruga.

Nakon priključenja mjernih i zaštitnih uređaja, namotajima indukcionog naponskog transformatora protiče struja koja mijenja raspodjelu napona između kondenzatora C_1 i C_2 . Konkretno, povećanjem opterećenja indukcionog naponskog transformatora povećava se kako moduo, tako i fazni stav međunapona U_c u odnosu na slučaj kapacitivnog naponskog transformatora u praznom hodu. Pri visokim vrijednostima opterećenja ili u slučaju kratkog spoja na sekundaru indukcionog transformatora, međunapon U_c može dostići ekstremno visoke vrijednosti koje mogu oštetiti kondenzator, zbog čega se isti najčešće štiti zaštitnim iskrišem. Dodatno, kako bi se kompenzovao uticaj opterećenja na grešku mjerenja transformatora, na red sa primarnim namotajem indukcionog transformatora dodaje se kompenzaciona induktivnost čija je vrijednost data izrazom:

$$L = \frac{1}{\omega_n^2(C_1 + C_2)}$$

gdje je ω_n nazivna kružna učestanost naizmjeničnog napona u sistemu.

Standardne nazivne vrijednosti primarnog i sekundarnog napona i nazivne snage kapacitivnog naponskog transformatora definisane su IEC standardom 61869-5 i identične su standardnim vrijednostima za induktivne naponske transformatore. Isto važi i za klase tačnosti kapacitivnih naponskih transformatora za mjerenje i zaštitu. Kapacitivni naponski transformatori moraju obezbijediti adekvatne performanse na opsegu primarnih napona od 5% nazivnog napona do napona $F_U U_{1n}$, gdje je F_U nazivni naponski faktor koji se definiše na isti način kao i kod induktivnih naponskih transformatora.

Ferorezonantni zahtjevi za kapacitivne transformatore

Primarni napon	Maksimalno trajanje oscilacija [s]	Maksimalna trenutna greška [%]
$0,8U_{1n}$	0,5	10
U_{1n}	0,5	10
$1,2U_{1n}$	0,5	10
$1,5U_{1n}$	2	10

Za razliku od indukcionih naponskih transformatora za koje se vezuje vrlo malo operativnih problema, kapacitivni naponski transformatori suočavaju se sa fenomenom ferorezonanse. Ferorezonansa predstavlja održivu rezonansu kola koje se sastoji od kapacitivnosti i nelinearne induktivnosti. Ferorezonansa može biti izazvana sklopnim operacijama na primarnoj ili sekundarnoj strani transformatora, a praćena je visokim vrijednostima struja i napona koje mogu oštetiti opremu i rezultirati pogrešnim djelovanjem zaštitnih releja. Iz tog razloga, za kapacitivne naponske transformatore postavljaju se posebni zahtjevi u pogledu ferorezonanse.

Prema IEC standardu 61869-5, kapacitivni naponski transformatori moraju biti dizajnirani tako da ferorezonansa izazvana sklopnim operacijama nije održiva pri bilo kojem naponu ispod $F_U U_{1n}$ i pri bilo kojem opterećenju manjem od nazivnog. Standard definiše maksimalno dozvoljeno trajanje ferorezonantnih oscilacija i maksimalnu trenutnu grešku nakon definisanog intervala. Zahtjevi za kapacitivne naponske transformatore u pogledu ferorezonanse prikazani su u tabeli za efikasno uzemljene mreže. Jedina razlika za neefikasno uzemljene mreže je proširenje razmatranog naponskog opsega do $1,9U_{1n}$, za koji je maksimalno dozvoljeno trajanje oscilacija takođe 2 sekunde.

Ispunjavanje navedenih zahtjeva u pogledu ferorezonanse se postiže dodavanjem pažljivo dizajniranog prigušnog kola koje se najčešće priključuje na pomoćni tercijerni namotaj indukcionog naponskog transformatora.

Tranzijentni odziv

Vrijeme [ms]	Odnos trenutnog sekundarnog napona i vršnog napona prije primarnog kratkog spoja [%]		
	Klasa T1	Klasa T2	Klasa T3
10	n/d	≤ 25	≤ 4
20	≤ 10	≤ 10	≤ 2
40	< 10	≤ 2	≤ 2
60	< 10	$\leq 0,6$	≤ 2
90	< 10	$\leq 0,2$	≤ 2

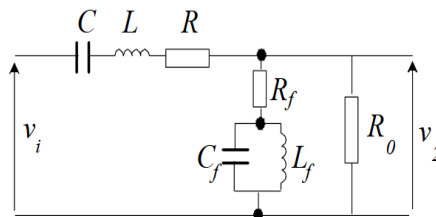
Osim ferorezonanse, još jedan izuzetno važan operativni aspekt kapacitivnih naponskih transformatora je njihov tranzijentni odziv. Kapacitivni naponski transformatori sastoje se od kalemova i kondenzatora čije se struje i naponi ne mogu trenutno promijeniti. Iz tog razloga, poremećaji u mreži poput kratkog spoja koji rezultira naglim padom napoma se na sekundarnu stranu kapacitivnih naponskih transformatora preslikavaju sa zakašnjenjem nakon kratkotrajnog prelaznog procesa. Ovakvo ponašanje može izazvati brojne probleme u radu zaštitnih releja, zbog čega IEC standard definiše posebne zahtjeve u pogledu tranzijentnog odziva za kapacitivne naponske transformatore za zaštitu. Standardne klase tranzijentnog odziva prikazane su u tabeli. Standardom su definisane dozvoljene vrijednosti odnosa trenutnog sekundarnog napona $u_2(t)$ u diskretnim trenucima nakon primjene kratkog spoja na strani primara i vršne vrijednosti sekundarnog napona prije sprovođenja kratkog spoja $U_2\sqrt{2}$. Matematički, ovaj odnos se može definisati kao:

$$k_t = \frac{|u_2(t)|}{U_2\sqrt{2}} 100$$

Predstavljene klase tranzijentnog odziva odnose se na naponske transformatore klase 3P i 6P. Klasa tranzijentnog odziva se obično navodi nakon klase tačnosti. Na primjer, oznaka kapacitivnog naponskog transformatora za zaštitu klase tačnosti 3P i klase tranzijentnog odziva T1 je 3PT1.

Primjer 8. Tranzijentni odziv

- Posmatra se kapacitivni naponski transformator nazivnog primarnog napona 500 kV.
- Transformator se može predstaviti zamjenskom šemom na slici.
- Ispitati da li posmatrani kapacitivni naponski transformator ispunjava zahtjeve u pogledu tranzijentnog odziva klase T1 koje postavlja IEC standard 61869-5.



33

Primjer 8.

Posmatra se kapacitivni naponski transformator nazivnog primarnog napona 500 kV. Transformator se može predstaviti ekvivalentnom zamjenskom šemom predstavljenom na slici. U zamjenskoj šemi figurišu sljedeći parametri:

- Ekvivalentna kapacitivnost $C = C_1 + C_2 = 91,605 \text{ nF}$,
- Ekvivalentna induktivnost kompenzacionog reaktora i transformatora $L = 76,136 \text{ H}$,
- Ekvivalentna otpornost kompenzacionog reaktora i transformatora $R = 3289 \text{ } \Omega$,
- Otpornost kola za suzbijanje rezonanse $R_f = 77379 \text{ } \Omega$,
- Induktivnost kola za suzbijanje rezonanse $L_f = 315,3 \text{ H}$,
- Kapacitivnost kola za suzbijanje rezonanse $C_f = 0,0285 \text{ } \mu\text{F}$ i
- Otpornost bremena induktivnog naponskog transformatora $R_0 = 103,997 \text{ k}\Omega$.

Svi parametri svedeni su na naponski nivo primara indukcionog

transformatora.

Ispitati da li posmatrani kapacitivni naponski transformator ispunjava zahtjeve u pogledu tranzijentnog odziva klase T1 koje postavlja IEC standard 61869-5.

Rješenje:

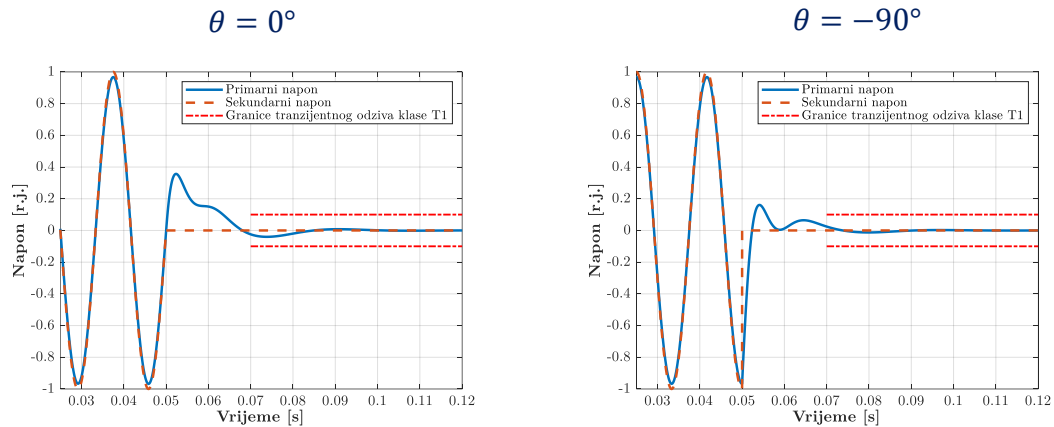
Kako je od interesa u ovom slučaju samo promjena sekundarnog napona pri kratkom spoju na strani primara, to je dovoljno posmatrati zavisnost između napona na ulazu i izlazu ekvivalentne zamjenske šeme koja je opisana funkcijom prenosa naponskog transformatora. Primjenom Laplasove transformacije i osnovnih zakonitosti iz teorije električnih kola, lako se dolazi do funkcije prenosa:

$$G(s) = \frac{V_p(s)}{V_s(s)} = \frac{A_3 s^3 + A_2 s^2 + A_1 s}{B_4 s^4 + B_3 s^3 + B_2 s^2 + B_1 s + B_0}$$

gdje su pojedinačni koeficijenti brojioca i imenioca dati izrazima:

$$\begin{aligned} A_3 &= L_f C_f R_f R_0 C \\ A_2 &= R_f R_0 C \\ A_1 &= L_f R_0 C \\ B_4 &= L_f C_f (R_f + R_0) LC \\ B_3 &= LCL_f + RCL_f C_f (R_f + R_0) + L_f C_f R_f R_0 C \\ B_2 &= LC(R_f + R_0) + RCL_f + L_f C_f (R_f + R_0) + L_f R_0 C \\ B_1 &= RC(R_f + R_0) + L_f + R_f R_0 C \\ B_0 &= R_f + R_0 \end{aligned}$$

Primjer 8. Tranzijentni odziv



34

Uz poznatu funkciju prenosa, jednostavno se simulira odziv kapacitivnog naponskog transformatora na promjene ulaznog napona. Razmatraju se dva granična slučaja u zavisnosti od trenutka nastanka kratkog spoja:

- Kratki spoj nastaje pri prolasku primarnog napona kroz nulu ($\theta = 0^\circ$) i
- Kratki spoj nastaje pri maksimalnoj vrijednosti primarnog napona ($\theta = -90^\circ$).

Odziv kapacitivnog naponskog transformatora u posmatranim slučajevima predstavljen je na slikama. Kao što se uočava, nakon pada primarnog napona na nulu, sekundarni napon pada na nulu tek nakon prelaznog procesa koji traje oko 40 milisekundi. Takođe, lako je uočiti da je kritičan scenario s aspekta tranzijentnog odziva scenario u kojem se kratki spoj dešava prilikom prolaska napona kroz nulu. Ovo je posljedica činjenice da je u posmatranom scenariju akumulirana energija na kondenzatorima maksimalna. S obzirom da se odziv na primarni kratki spoj nalazi unutar dozvoljenih granica 20 milisekundi nakon kratkog spoja, jasno je da posmatrani transformator zadovoljava zahtjeve klase T1.

Na kraju, važno je istaći da postoje aspekti kapacitivnih naponskih transformatora poput uticaja temperature, parcijalnih pražnjenja, dielektričnih gubitaka i frekventnog opsega koji neće biti razmatrani u ovom poglavlju. Za više informacija o ovim aspektima, zainteresovani čitalac se upućuje na IEC standard 61869-5.