4. ZAŠČITA GENERATORJEV

4.1. UVOD

Generatorji so kot členi proizvodnih enot tehnično najzahtevnejši del elektroenergetskega sistema. Njihove moči so od 100 kW (male distribucijske elektrarne) do moči preko 1000 MW, torej je njihovo razmerje moči okoli 1:10000. Z močjo raste tudi število zaščit. Pri malih hidroblokih sta lahko le dve zaščiti (nadtokovna in napetostna), pri velikih termoblokih pa naraste število relejnih zaščit tudi na 20!

Glede na pogonsko sredstvo ločimo zaščitne sisteme proizvodnih enot v dve skupini: v zaščitne sisteme termoblokov in v zaščitne sisteme hidroblokov. Zaščitne sisteme termoblokov pa ločimo lahko naprej na štiri skupine in sicer:

1) zaščitni sistemi manjših in srednjih termoblokov na premog do moči 70 MW, ki se danes vgrajujejo predvsem v toplarne
2) zaščitni sistemi srednjih termoblokov s plinskimi turbinami, ki se uporabljajo pogosto za pokrivanje potrošnje v konicah
3) zaščitni sistemi velikih klasičnih termoblokov, običajno moči nad 200 MW
4) zaščitni sistemi termoblokov v nuklearnih elektrarnah.

Zaščitne sisteme hidroblokov ločimo lahko prav tako v štiri skupine:

1) zaščitne sisteme malih hidroagregatov, ki obratujejo v distribucijskih hidroelektrarnah

2) zaščitne sisteme srednjih hidroagregatov do moči cca 70 MW
3) zaščitne sisteme velikih hidroagregatov
4) zaščitne sisteme prečrpovalnih hidroagregatov

Poleg tega obravnavamo pogosto pri zaščiti generatorjev tudi zaščito sinhronskih kompenzatorjev, ki so sicer motorji, a imajo precej isto problematiko kot zaščita generatorjev.

Posamezne zaščitne sisteme celotnih blokov delimo v zaščitne sisteme pogonskega dela in v zaščitne sisteme električnega dela.

Zaščitni sistem pogonskega dela pa delimo v zaščitni sistem pogonskega stroja z vsemi pomožnimi napravami in regulatorjem vrtljajev oz. moči in v zaščitni sistem vseh naprav, ki so povezane s pripravo pogonskega sredstva (npr. cevovodi in jezovne naprave pri hidroelektrarnah, kotli, mlini za premog, lokalni transport premoga, nuklearni reaktor).

Zaščitni sistem električnega dela obsega zaščito generatorja in njegovih pomožnih pogonov (vključno napetostni regulator), pri pri blok vezavi s transformatorjem, pa še zaščito tega transformatorja. V kolikor napaja lastno rabo bloka poseben transformator, vezan na napetost generatorja, spada njegova zaščita tudi v ta sklop. Poleg teh zaščit spada v zaščitni sistem električnega dela še zaščita, ki je skupna vsem tem delom.

V nadaljevanju se bomo ukvarjali predvsem z relejno zaščito generatorja in pa z relejno zaščito, ki je za posamezne dele bloka skupna.

Na določitev zaščitnega sistema vpliva poleg omenjenega predvsem še priključek generatorja na zbiralke (generator je priključen na zbiralke lahko direktno ali pa preko transformatorja), vzbujalni sistem in njegovo napajanje in pa stopnja avtomatizacije, predvsem, če agregat obratuje v avtomatizirani elektrarni brez posadke ali pa je v elektrarni posadka.

Zaščitne naprave v celotnem zaščitnem sistemu bloka se med seboj bolj in bolj povezujejo, povezujejo pa se tudi z drugimi avtomatskimi napravami, predvsem z regulatorji napetosti in moči. Poleg tega opravljajo sodobni regulatorji tudi neke zaščitne funkcije.

4.2. VRSTE IN VZROKI OKVAR V GENERATORJU

Pri generatorjih so možne številne vrste okvar, prav tako pa so številni vzroki, ki jih povzročajo glede na mesto nastanka okvare delimo okvare na 5 skupin.

4.2.1. Okvare na statorju

Nastopajo lahko v navitju ali pa na pločevinskem paketu. Okvare v statorskem navitju so najpogostejše. Med njimi je najpogostejši stik med navitjem in ozemljenimi deli. Pogostost nastopanja stika med ovoji iste faze je odvisna predvsem od izvedbe navitja, namreč od števila vodnikov v enem utoru. Sorazmerno redko nastopajo kratki stiki med navitji dveh faz in pa prekinitve vodnikov.

Vzroki za nastop okvare so lahko zunanji (prenapetosti, preobremenitve, kratki stiki), lahko pa so vzrok tudi v samem generatorju (slabo stanje izolacije, odpoved hlajenja, vlaga v navitju, vibracije, previsoki vrtljaji, pri katerih morebitna poškodba rotorja povzroči lahko tudi poškodbo na glavah statorskega navitja).

Okvare na statorskem paketu so običajno povezane z oblokom, ki nastane pri okvarah ob nastopu zemeljskega stika. Poškodbo izolacije med pločevinami paketa in s tem kratkostične toke v paketu pa lahko dobimo tudi zaradi drugih vzrokov. Pri direktno hlajenih generatorjih obstoja nevarnost okvare tudi na delu hladilnega sistema v statorju.

4.2.2. Okvare na rotorju

Nastopajo lahko na navitju, na kratkostični kletki, v samem pločevinskem paketu in pa na ščetkah oz. drsalnih obročih, pri generatorju brez ščetk pa na diodah oz. tiristorjih.

Na navitju so najpogostejše okvare zemeljski stiki. Sorazmerno redka, a zato dosti neprijetnejša okvara, je kratki stik med ovoji navitja. Prav tako redka je prekinitev navitja. Vzroki za okvare so lahko zunanji (predvsem nesimetrična obremenitev in asinhrosko obratovanje) ali pa notranji (slabo stanje izolacije, odpoved hlajenja, vlaga v navitju, vibracije, visoki vrtljaji pri pobegu).

Na kratkostični kletki pride lahko do prekinitve stika med palicami in spojnim čelnim obročem. Posledica tega je lahko tudi poškodba statorskega navitja. Vzrok okvare je poleg slabe izvedbe predvsem nesimetrična obremenitev, asinhrono obratovanje in pa visoki vrtljaji.

4.2.3. Okvare na hladilnem sistemu, vgrajenem v generator

Te okvare so predvsem netesnost, zamašitev hladilnih odprtin oz. hladilnikov, okvare na črpalkah oz. na ventilatorjih.

4.2.4. Okvare na ležajih

Vzroki okvar na ležajih so predvsem močne vibracije, motnje v sistemu mazanja, lahko pa jih povzročajo tudi tokovi skozi ležaje in to v primeru, če pride do poškodbe izolacije ležaja.

4.2.5. Okvare na tipalih za zaščito in nadzor, nameščenih v samem generatorju

Okvare na tipalih oz. dovodih nastopajo pogosto zaradi vibracij in zaradi mehanskih poškodb.

4.3. ZAŠČITA SISTEM GENERATORJA

Zaščitni sistem sestavljajo poleg zaščitnih relejev, tokovnih in napetostnih zaščitnih transformatorjev, tipal za temperature in pretoke in celotnega ožičenja še naprave za izvajanje zaščitnih ukrepov in za povezavo z informacijskim sistemom.

Naprave na katere delujejo zaščite avtomatsko, so:

5) odklopnik, ki loči agregat od omrežja,
6) naprava za razbuditev generatorja,
7) naprava za prekinitev dotoka pogonskega sredstva,
8) naprava za zaviranje in
9) naprava za gašenje.

Posledice nastale okvare so običajno odvisne od časa napajanja okvare. Zato želimo, da pri težkih okvarah (npr. kratki stik v generatorju), generator čimprej ločimo od omrežja, ga čimprej razbudimo, agregat pa ustavimo. Seveda so pri različnih zaščitah uporabljeni različni zaščitni ukrepi.

Pri velikih generatorjih je posebno važno, da zaščita ne zataji, da ne deluje po nepotrebnem. Zato uporabljamo pri zaščiti velikih generatorjev vse pogosteje dva zaščitna sistema, ki imata ločeno napajanje in ločeni izklopni tuljavi. Zaščitni releji so med oba sistema porazdeljeni tako, da naj bi pri verjetnejših okvarah vedno deloval po en rele v vsakem sistemu. Če se bojimo, da bi pri okvarah zaščita zatajila, delujeta oba releja samostojno, če pa se skušamo izogniti nepotrebnemu delovanju zaščite, pa je potrebno, da delujeta oba releja istočasno.

4.4. GLAVNE ZAŠČITE PRI OKVARAH

V generatorju nastopajo 4 osnovne električne okvare in imamo 4 glavne električne zaščite. Te so: statorska zemeljskostična zaščita, kratkostična zaščita, zaščita pri stiku med ovoji in rotorska zaščita.

4.4.1. Zaščita pri stiku statorskega navitja z ozemljenimi deli (statorska zemeljskostična zaščita)

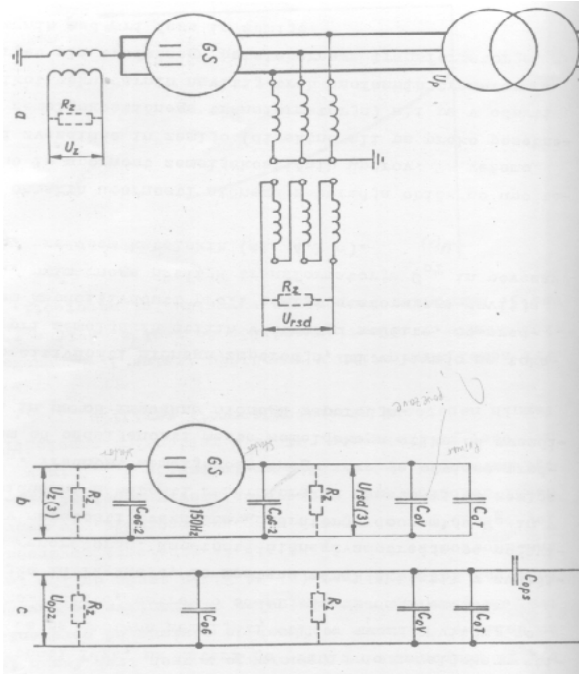
Stik statorskega navitja z ozemljenimi deli generatorja je najpogosteje nastopajoča okvara navitja generatorja. Posledice stika navitja z ozemljenim pločevinskim paketom statorja so odvisne predvsem od velikosti toka zemeljskega stika in od časa trajanja napajanja mesta okvare. Včasih pa vpliva na posledice tudi kot med napetostjo, ki zemeljskostični tok povzroča, in med tem tokom. Pri kapacitivnem zemeljskostičnem toku in pri obloku namreč lahko nastopi visokofrekvenčni pojav, ki pogosto povzroča nevarne prenapetosti.

Tok zemeljskega stika do dveh amperov ne povzroča posledic na statorskem paketu. Kratkotrajni tokovi do 20 A pa lahko povzroče že manjše okvare na paketu, ki pa jih lahko hitro odpravimo. To je tudi nekakšna meja za tokove pri zemeljskih stikih pri nas, čeprav se v nekaterih sistemih, npr. v Veliki Britaniji, dopuščajo tudi zemeljskostični tokovi, ki so enaki nazivnim tokovom generatorjev! Seveda pa takšni tokovi zahtevajo poleg hitrega delovanja zaščite tudi hiter izklop in hitro demagnetacijo generatorja.

Ločimo dvoje tipov zaščit, namreč zaščite blokov generator – transformator, ki delujejo na residualno napetost in pa zaščite generatorjev, ki so galvansko vezani na zbiralke in ki delujejo predvsem na residualni tok.

4.4.1.1. Zemeljskostična zaščita bloka generator – transformator

Območje te zaščite zajema poleg navitja statorja vsa primarna navitja močnostnih in pa tudi instrumentnih transformatorjev in pa njihove medsebojne povezave, torej vse, kar je galvansko povezano s statorskim navitjem (sl. 4.1 a).



Sl. 4.1

4.4.1.1.1. Zemeljski stik v zaščitenem območju

Če nastopi zemeljski stik na fazni sponki generatorja, dobijo generatoske napetosti faz proti zemlji komponente sofaznega zaporedja, katerih iznos je enak fazni napetosti faze, na kateri je prišlo do zemeljskega stika. Če pa nastane zemljski stik v samem navitju, so te komponente, ustrezno oddaljenosti od zvezdišča, manjše in izginejo, če nastane zemeljski stik v zvezdišču generatorja. Napetosti ničnega zaporedja se pojavijo v napetosti zvezdišča generatorja do zemlje U_z in v residualni napetosti generatorskih napetosti do zemlje U_{rsd}. Vrednost zemeljskostičnega toka je odvisna predvsem od oddaljenosti mesta zemeljskega stika od zvezdišča in pa od impedanc ničnega zaporedja.

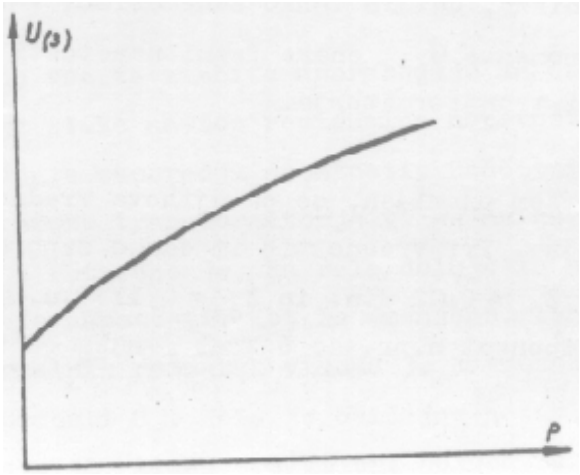
Kapacitivnosti ničnega zaporedja, ki vplivajo na tokove pri zemeljskih stikih v območju zaščite, so predvsem kapacitivnosti rpoti zemlji statorskega navitja C_{oG}, primarnega navitja transformatorja C_{oT} in povezav C_{oV}, predvsem kabelskih (sl. 4.1 c).

Od ohmskih upornosti ničnega zaporedja običajno upoštevamo le upornost zemeljskostičnih uporov. Te vežemo med zvezdišče in zemljo (direktno ali pa preko posebnega zemeljskostičnega transformatorja) ali pa v odprt trikot sekundarnih navitij treh enofaznih transformatorjev ali trofaznega petstebernega transformatorja, vezanih med tri faze in zemljo.

Da ne pride do nevarnih prenapetostnih pojavov pri nastopu zemeljskega stika, je potrebno, da je ohmska upornost R_z manjša od kapacitivne upornosti celotne primarne strani do zemlje.

Pri zemeljskem stiku pride do sprememb tudi pri napetostih 3. harmonskih komponent do zemlje (sl. 4.1 b). Te komponente se inducirajo v vseh treh fazah in so sofazne. Njihova velikost je odvisna od obremenitve. Od praznega toka do polne obremenitve se poveča tudi več kot za 3 krat (sl. 4.2) in znaša do 12% fazne napetosti. Tokovi, ki jih te napetosti povzročajo, tečejo po upornostih ničnega zaporedja. Te upornost določajo tudi njihovo delitev v napetost tretje harmonske med zvezdiščem in zemljo $U_{z(3)}$ in v napetost te frekvence, ki je v residualni napetosti faznih napetosti generatorja proti zemlji $U_{rsd(3)}$.

Pri zemeljskem stiku v zvezdišču izgine 3. harmonska komponenta napetosti zvezdišča do zemlje, dvigne pa se 3. harmonska komponenta v residualni napetosti.



Sl. 4.2

4.4.1.1.2. Zemeljski stik izven zaščitnega območja

Pri zemeljskem stiku v omrežju na sekundarni strani generatorskega transformatorja povzroče komponente ničnega zaporedja U_{osz} te strani tudi komponente napetosti ničnega zaporedja U_{opz} na primarni, generatorski strani (sl. 4.1 c). Če ni zemeljskostičnih uporov, se napetosti ničnega zaporedja U_{osz} delijo v razmerju med kapacitivnostjo ničnega zaporedja med primarni in med sekundarnim navitjem transformatorja C_{ops} in med celotno kapacitivnostjo ničnega zaporedja pri zemeljskem stiku na sekundarni strani:

$$U_{opz} = \frac{C_{ops}}{C_{oT} + C_{oG} + C_{oV}} * U_{osz} \tag{4.1}$$

Če je sistem na sekundarni strani transformatorja neozemljen, je vrednost impedanc pozitivnega in negativnega zaporedja v primeri z impedanco ničnega zaporedja tako nizka, da jih lahko zanemarimo. V tem primeru so komponente U_{osz} enake fazni napetosti sekundarne strani transformatorja.

Če pa je sistem ozemljen, se pa njihova vrednost bistveno zmanjša. Pri vrednostih impedanc zaporedij Z_{1s} = 0,33 p.u., Z_{2s} = 0,22 p.u. in Z_{os} = 0,11 p.u. je vrednost teh komponent npr. že 6 krat manjša od fazne napetosti.

Pri neozemljenih omrežjih na sekundarni strani transformatorja lahko dobimo, da je pri zunanjem zemeljskem stiku napetost U_{osz} tudi preko 15% fazne napetosti generatorja. Da dobimo pri zunanjih zemeljskih stikih napetosti, ki so le ca 40 do 60% vrednosti nastavitve zaščite, je potrebno, da to napetost znižamo z zemeljskostičnim uporom. Moč upora je običajno manjša od 100 kW. Pogosto ga dimenzioniramo le za krajši čas delovanja npr. 20 s, saj zaščita okvaro itak takoj izključi.

Seveda se z vgradnjo upora poviša zemeljskostični tok. Obstojajo sicer predlogi, da naj bi kapacitivni tiok kompenzirali z induktivnim tokom dušilke v zvezdišču, vendar do večje uporabe te zamisli še ni prišlo, saj so tokovi zemeljskega stika običajno še vedno izpod 20 A, kar naj bi bila gornja meja.

4.4.1.1.3. Izvedbe zaščit

4.4.1.1.3.1. Nepopolne statorske zemeljskostične zaščite

Praktično vse te zaščite uporabljajo za detekcijo zemeljskega stika nastop residualne napetosti oz. komponent ničnega zaporedja napetosti. Zaščitni rele je običajno preko transformatorja vezan na napetost zvezdišča U_z. Potrebno je, da rele deluje le na osnovno komponento napetosti. Kot že omenjeno, lahko nastopijo v normalnih razmerah visoke 3. harmonske komponente v napetosti U_z. Rele je običajno nastavljiv od 5 do 15% napetosti, ki se pojavi pri polnem zemeljskem stiku. S tem lahko zavarujemo 80 do 95% navitja, nezaščitenih ostane tako le 5 do 15% navitja v okolici zvezdišča.

4.4.1.1.3.2. Popolne (100%) statorske zemeljskostične zaščite

Ker nastopajo zemeljski stiki tudi v okolici zvezdišča in to predvsem mehanskega izvora, vse pogosteje želimo, da je zajeto v zaščito celotno navitje. 100% zaščito lahko izvedemo na osnovi že obstoječih 3. harmonskih komponent napetosti ali pa na osnovi dodane napetosti osnovne frekvence oz. nižjih frekvenc.

4.4.1.1.3.2.1. Zaščite s 3. harmonskimi komponentami napetosti

3. harmonske komponente napetosti lahko uporabljamo na tri načine, lahko merimo napetosti teh frekvenc v zvezdišču, lahko merimo te komponente v faznih napetostih, lahko pa uporabimo oboje.

Zaščito z meritvijo 3. harmonske komponente napetosti v zvezdišču $U_{z(3)}$, ki nastopa vedno v normalnem obratovanju, izgine pa pri zemeljskem stiku v zvezdišču, uporabljamo pri zaščiti s podnapetostnim relejem, ki deluje le na 3. harmonsko komponento. Pogoj za delovanje te zaščite je, da je na generatorju nazivna napetost, napetost $U_{z(3)}$ pa je nič.

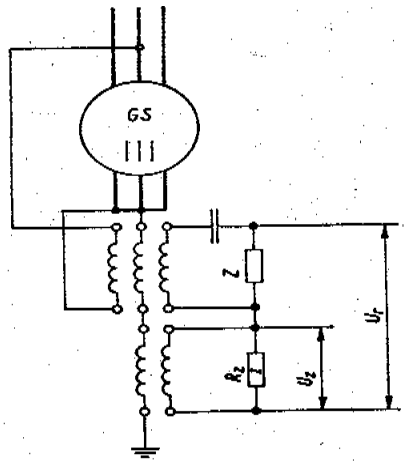
Za zaščito po drugem načinu, namreč meritev 3. harmonskih komponent v residualni napetosti $U_{rsd(3)}$, uporabljamo prenapetostni rele na 3. harmonsko komponento, ki je stabiliziran s faznim tokom. Kot že omenjeno, se v normalnem obratovanju spreminja 3. harmonska komponenta, odvisno od obremenitve, v razmerju ca 1:3. Pri zemeljskem stiku dobimo sicer povišanje teh vrednosti, npr. za 2,6 krat, vendar dobimo

pri neobremenjenem generatorju in pri zemeljskem stiku v zvezdišču še vedno nižjo napetost kot pri nazivno obremenjenem generatorju, ko je generator zdrav. Uporabljena tokovna stabilizacija pa omogoča, da je napetost 3. harmonske komponente, ki povzroči delovanje zaščite, odvisna od obremenitve. Čim višja je obremenitev generatorja, tem višja je napetost $U_{rsd(3)}$, ki povzroči delovanje zaščite.

Pri tretjem načinu uporabljamo napetosti $U_{rsd(3)}$, in $U_{z(3)}$. Kot delovna veličina je uporabljena ista kot pri drugem načinu, namreč napetost $U_{rsd(3)}$. Za stabilizacijo pa je namesto toka uporabljena 3. harmonska komponenta napetosti zvezdišča $U_{z(3)}$.

4.4.1.1.3.2.2. Zaščite z dodanimi napetostmi

Če dodamo generatorju v zvezdišču 10 do 15% fazne napetosti nasprotnega predznaka, se pri zdravem generatorju pojavi del te napetosti med zvezdiščem in zemljo, del pa na zemeljskostičnem uporu R_z (sl. 4.3). Dodana napetost povzroča na impedanci Z napetost, ki je nasprotno usmerjena kot napetost na uporu R_z. Vsoto obeh napetosti U_r vodimo na rele. Vrednost impedance Z določimo tako, da je v normalnih razmerah napetosti U_r enaka nič. Če pa nastopi v zvezdišču zemeljski stik, se napetost U_z dvigne, ravnotežje je porušeno in zaščita deluje. Neugodno pri tej izvedbi je, da je napetost celotnega navitja za omenjenih 10 do 15 procentov stalno višja.



Sl. 4.3

V zadnjem času so se pričele uporabljati zaščite, pri katerih se dodajajo sofazne napetosti nižjih frekvenc npr. 12,5 oz. 20 Hz. Te napetosti se dodajajo v zvezdišču ali pa preko trikotnega navitja petstebrnega transformatorja. Tok se v normalnem obratovanju

sklepa le preko kapacitivnosti, ki pa predstavljajo zanj zaradi nizke frekvence precejšnjo upornost. Če pa nastopi v zvezdišču zemeljski stik, se pa tok občutno poveča. To pa je kriterij za delovanje zaščite.

4.4.1.2. Zemeljskostična zaščita generatorja, ki je galvansko vezan na zbiralke

Direktno na zbiralke so priključeni predvsem generatorji manjših moči. Pri teh zaščitah ni dovolj ugotovitev, da je v galvansko povezanem sistemu nastal zemeljski stik, kar ugotovimo z nastopom residualnih napetosti, potrebno je namreč ugotoviti tudi območje, v katerem je zemeljski stik nastal. To dosežemo s tem, da vežemo na zbiralke preko trofaznega petstebrnega transformatorja zemeljskostični upor in da na vseh odvodih merimo residualni tok. V tem primeru dobimo namrečpri zemeljskem stiku v vseh treh fazah komponente tokov ničnega zaporedja, ki tečejo od zemeljskostičnega transformatorja do mesta zemeljskega stika.

Maksimalni zemeljskostični tok naj tudi v tem primeru ne preseže vrednosti 20 A. Ker s tokovnimi transformatorji v Holm-Greenovi vezavi že s težavo zajemamo toke, ki so le 2‰ I_n, je včasih težko doseči zaščito 90 oz. 95% navitja. Če je npr. I_N = 2 kA, je minimalni možni tok 4 A. Pri maksimalnem zemeljskostičnem toku 20 A lahko tako zaščitimo le 80% navitja! Te zaščite generatorjev delujejo torej na residualni tok, ki teče pri zemeljskem stiku v generatorju od zbiralk v generator. Ker je, kot že omenjeno ta tok le 2‰ od nazivnega toka, morajo biti releji zelo občutljivi in pa z malo porabo. Prav tako moramo posvetiti izbiri tokovnih transformatorjev, na katere je priključena ta zaščita, posebno pozornost. Biti morajo posebej umerjeni, saj lahko razlika magnetilnih tokov povzroči nepotrebno delovanje zaščite!

Če želimo, da zajame zaščita večji del navitja, je potrebno, da se upornost zemeljskostičnega upora spreminja, odvisno od oddaljenosti mesta zemeljskega stika.

Uporabimo lahko nelinearne upore, stopenjske upore ali pa potenciometrske upore, katerim se upornost zvezno spreminja. S tem lahko npr. dosežemo, da je maksimalni zemeljskostični tok, pri katerem zaščita še deluje, 4 A in pa da zaščita zajema 95% navitja.

Ker lahko pride zaradi tokovnih transformatorjev do diferenčnih tokov, ki bi povzročili nepravilno delovanje zaščite, je pogosto pogoj za delovanje zemeljskostične zaščite, da je zemeljski stik nastopil (delovanje releja na residualno napetost) in da nadtokovna zaščita ne deluje.

Običajno želimo delovanje zemeljskostične zaščite tudi v primeru, če generator ni vezan na zbiralke. V tem primeru prevzame vlogo zaščite rele, ki je vezan na residualno napetost generatorja.

4.4.2. Kratkostične zaščite generatorja

Za zaščito pri kratkih stikih med fazami in med navitji dveh faz uporabljamo predvsem vzdolžno diferenčno zaščito. Pogoj za uporabo te zaščite je, da zvezdišče ni vezano v samem generatorju. Območje zaščite je namreč od tokovnih transformatorjev v zvezdišču do tokovnih transformatorjev na odvodu.

V normalnem obratovanju nastopajo v generatorju sorazmerno nizki diferenčni tokovi. To so kapacitivni tokovi med faznimi vodniki. Kljub temu, da običajno uporabljamo na obeh straneh navitja zaščitne transformatorje istega tipa, uporabljamo sedaj predvsem stabilizirane diferenčne releje z nizko stabilizacijo (ca 10%) ali pa visokoimpedančne diferenčne releje. Ker so stabilizirani diferenčni releji opisani pri zaščiti transformatorja, bomo tu opisali le visokoimpedančne diferenčne releje.

4.4.2.1. Visokoimpeančna diferenčna zaščita

Pri tej zaščiti je uporabljen kot diferenčni rele prenapetostni rele. Napetost, na katero je delovanje releja nastavljeno z nastavljivim preduporom, je višja od padca napetosti, ki se pojavi pri maksimalnem možnem toku (pri zunanjih okvarah) na vodu od tokovnega transformatorja do releja. Pri napetosti, pri kateri rele deluje, teče skozi rele tok ca 2% I_n. To je tudi diferenčni tok, pri katerem zaščita že deluje. Zaradi tako visoke občutljivosti zajame ta zaščita lahko tudi zemeljske stike z višjimi zemeljskostičnimi tokovi.

Če pri zunanjih okvarah nastopi zaradi enosmerne komponente ali remanence nasičenje tokovnega transformatorja, to delovanje zaščite ne moti, saj se zaradi tega napetost na releju ne more povzpeti preko nastavljene vrednosti.

Pri večjih diferenčnih tokovih bi prišlo na releju in na tokovnih transformatorjih do nedopustnih visokih napetosti. Temu se izognemo z vgradnjo upora, katerega upornost je visoka do napetosti, pri kateri rele deluje, pri višjih napetostih se pa upornost občutno zmanjša. Napetostno odvisni upor vežemo paralelno z relejem. V poglavju 6.4.1. je nekoliko obširneje opisana podobna visokoimpedančna diferenčna zaščita zbiralk.

4.4.2.2. Kratkostična zaščita bloka

Za zaščito pri kratkih stikih med fazami in med navitji dveh faz v generatorju, transformatorju in v medsebojnih povezavah uporabljamo skupno vzdolžno diferenčno zaščito. Ker je v območju zaščite tudi transformator, mora biti stabilizirana tudi za zunanje kratke stike in pa pri vklopu. Sicer ni možno, da bi nevzbujen transformator vključili na polno napetost, nastopi pa lahko primer, da se pri okvari v bližini transformatorja napetost sesede, po izklopu okvare pa se trenutno dvigne. Pri tem lahko pride do visokega magnetilnega toka, ki pa lahko pride tudi s strani omrežja in bi zato zaščita, ki ni stabilizirana na vklopni tok, nepotrebno delovala.

Pri blokih moči nad 15 do 20 MVA običajno poleg diferenčne zaščite bloka uporabimo tudi diferenčno zaščito samega generatorja.

Če je na napetost generatorja vezan tudi transformator za napajanje lastne rabe, ga lahko zajamemo v skupno diferenčno zaščito bloka. Ker pa je njegaova moč bistveno manjša od moči generatorja, ne moremo s skupno diferenčno zaščito varovati tudi kratke stike na sekundarni strani tega transformatorja. Zato običajno uporabimo kot tretjo diferenčno zaščito diferenčni rele za zaščito transformatorja za lastno rabo.

4.4.3. Zaščita pri stiku med ovoji statorskega navitja

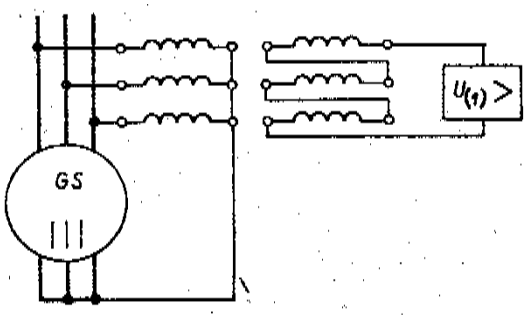
Nevarnosti stika med ovoji iste faze so predvsem izpostavljeni generatorji s tuljavičnim navitjem, do ovojnih stikov pa prihaja tudi pri paličnih navitjih. Temu so predvsem izpostavljene glave navitja.

Čeprav običajno pride ovojni stik v zemeljski stik, uporabljamo vse pogosteje posebne zaščite pri ovojnem stiku. Pri popolnem ovojnem stiku pride v kratkovezanih ovojih do zelo velikih tokov, ki so bistveno večji od kratkostičnih. Dosežejo tudi vrednosti preko 20 I_n! Vsekakor so posledice okvare lahko dosti hujše, če generator ne izključimo takoj, ampak šele po nastopu zemeljskega stika. Nastopajo pa težave z nastavitvami zaščite, saj niso točno določljive niti razmere pri ovojnem stiku niti razmere pri zunanjih motnjah, ki lahko povzroče nepotrebno delovanje zaščite.

Pri generatorjih z enojnim navitjem uporabljamo drugačne zaščite kot pri generatorjih z dvojni navitjem.

4.4.3.1. Zaščite generatorjev z enojnim navitjem

Rezultat ovojnega stika je znižanje fazne napetosti v fazi, kjer je ovojni stik nastal. Zato uporabljamo kot kriterij za delovanje te zaščite residualno napetost vseh treh faznih napetosti samega generatorja (ne napetosti faz do zemlje!). Te dobimo iz sekundarnih napetosti zaščitnih napetostnih transformatorjev, vezanih med fazami in zvezdiščem generatorja. Da dobimo residualno napetost, vežemo vsa tri sekundarna navitja v odprt trikot, na katerega vežemo zaščito (sl. 4.4). Pri tem moramo upoštevati, da dobimo residualno napetost tudi v normalnem obratovanju in pa pri zunanjih motnjah.

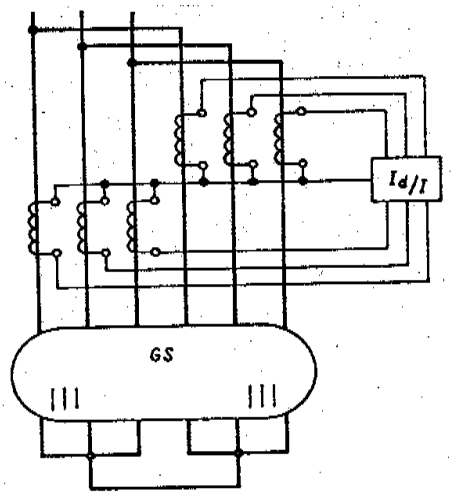


Sl. 4.4

V normalnem obratovanju so posebno izrazite 3. harmonske komponente, ki na delovanje ne smejo vplivati. Vednost napetosti osnovnega vala, pri kateri zaščita deluje, vzamemo nesimetrije pri turbogeneratorju ca 2% U_n, saj so običajne pri njih nižje od te vrednosti, pri generatorjih z izraženimi poli pa so možne tudi višje nesimetrije in moramo ustrezno zaščito nastaviti na višjo vrednost.

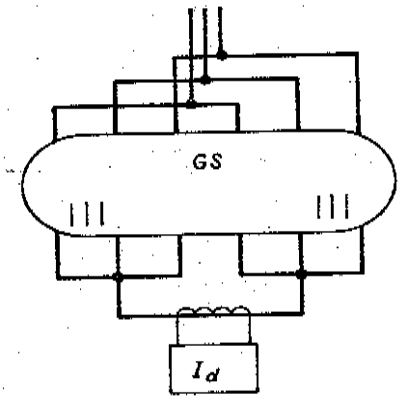
4.4.3.2. Zaščita generatorjev z dvojnim navitjem

Zaščita mora zajeti ovojne stike med ovoji istega navitja kot tudi stike med ovoji obeh navitij iste faze. Pri ovojnem stiku dobimo znižanje inducirane napetosti v tem navitju. Zaradi nastale razlike induciranih napetosti v obeh navitjih dobimo med navitjema krožni tok, ki ga zaščita uporablja za odkrivanje okvare. Uporabljamo dve vrsti zaščite. Lahko uporabimo prečno diferenčno zaščito, ko primerjamo tokove med posameznimi navitji (sl. 4.5) ali pa uporabljamo kot kriterij za delovanje zaščite nastop tokov med obema zvezdiščema (sl. 4.6). Pri tem moramo upoštevati, da nastopajo tudi tu nesimetrije v samem generatorju, ki pa ne smejo povzročiti nepotrebnega delovanja.



Sl. 4.5

Rele nastavljamo na vrednost okoli 10% I_n in to v primeru, če so tokovi, ki jih pričakujemo zaradi nesimetrije, izpod 5% I_n.

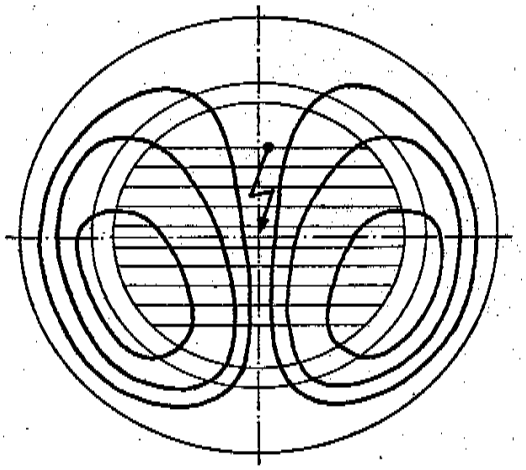


Sl. 4.6

4.4.4. Zaščita pri zemeljskem stiku v navitju rotorja

Zaščita pri stiku vzbujalnega navitja z ozemljenimi deli je običajno edina zaščita rotorja. Območje zaščite je poleg rotorskega navitja tudi ves enosmerni in izmenični vzbujalni tokokrog, ki je z navitjem rotorja v galvanski zvezi, lahko tudi preko usmernikov oz. tiristorjev.

Ker vzbujalni tokokrog ni ozemljen, ne predstavlja nastop zemeljskega stika za agregat nikakršne neposredne nevarnosti. Če pa se prvemu zemeljskemu stiku pridruži še drugi zemeljski stik, dobimo delni ali pa celo polni kratki stik. Posledica tega pa so okvare samega navitja in njegove okolice. Kratki stik med vzbujalnimi ovoji lahko povzroči tudi neenako vzbujanje (sl. 4.7).



Sl. 4.7

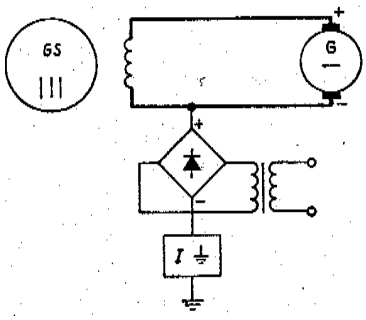
Posledice tega pa so lahko zelo velike radialne sile na rotor, ki povzroče močne vibracije, lahko pa tudi težje poškodbe na samem statorju.

Ker je prišlo v generatorjih, vgrajenih v termoelektrarnah Zahodne Nemčije do takih okvar, so sprejeli l. 1974 na VDE konferenci priporočilo, da naj deluje rotorska zaščita tudi na izklop, kar do takrat ni bilo običajno. Normalno deluje namreč zaščita le na signalizacijo, le v avtomatiziranih elektrarnah deluje pogosto tudi na izklop.

Celotni nadzirani tokokrog je povezan z zemljo preko izolacijske upornosti, ki znaša običajno do 300.000 ohmov in preko kapacitivnosti, ki znaša tudi do 2μF. Pri tem je običajno kapacitivnost samega rotorskega navitja izpod 0,5μF. Pri izbiri in nastavitvi zaščite je potrebno tudi upoštevati najvišjo možno napetost v tem tokokrogu, ki nastopa pri forsiranem vzbujanju, in pa višje harmonske komponente v napetosti, ki jih dobimo pri tiristorskem vzbujanju. V glavnem uporabljamo dve vrsti zaščite in sicer z enosmerno in z izmenično napetostjo.

4.4.4.1. Zaščite z enosmerno napetostjo

Pri zaščiti z enosmerno napetostjo pritisnemo na – pol tokokroga dodatno enosmerno napetost običajno do 50 V (sl. 4.8). V ta tokokrog je vključen enosmerni nadtokovni rele, ki deluje pri zemeljskem stiku v tokokrogu. Zaščita je nastavljena tako, da deluje npr. pri zemeljskem stiku na – polu pri upornosti 10.000 ohmov. Seveda pa je delovanje zaščite dosti bolj občutljivo, če nastopi okvara na drugem polu. Napetosti, ki smo jo dodali, moramo prišteti namreč celotno maksimalno možno enosmerno napetost tokokroga. Seveda mora biti upornost, pri kateri zaščita v tem primeru deluje, nižja od izolacijske upornosti celotnega enosmernega tokokroga.

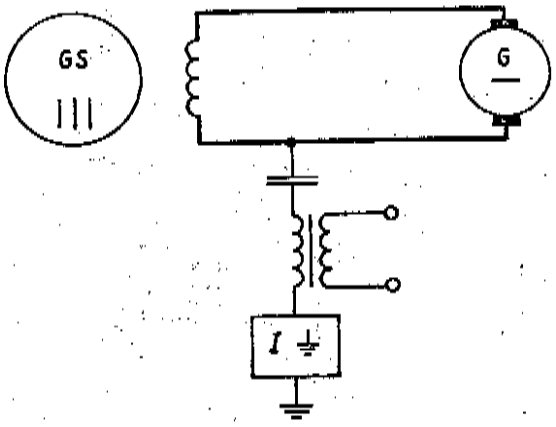


Sl. 4.8

4.4.4.2. Zaščita z izmenično napetostjo

Pri zaščiti z izmenično napetostjo (sl. 4.9) pritisnemo na tokokrog izmenično napetost, običajno 50 V. V ta tokokrog vgrajeni nadtokovni rele nadzira tok, ki teče v nadzirani tokokrog. Da ne teče pri okvari skozi rele enosmerni tok, je njegov tokokrog za ta tok zaprt s kondenzatorjem. V normalnih razmerah dobimo skozi rele tok, ki teče preko kapacitivnosti tokokroga v zemljo. Te kapacitivnosti se pri tiristorskem vzbujanju zaradi vgrajenih kondenzatorjev precej povečajo. Prav tako dobimo pri takem vzbujanju skozi rele tokove višjih harmonskih. Upornosti, na katere lahko nastavimo te zaščite, so do 5.000 ohmov. Omenimo naj, da teče kapacitivni tok od navitja v zemljo preko ležajev, kar pa včasih ni želeno.

Običajno uporabljamo v ta namen napetost 50 Hz. Obstojajo pa tudi sugestije, da bi uporabili občutno nižje frekvence. S tem bi dobili nižje kapacitivne tokove in pa višjo občutljivost.



Sl. 4.9

Če želimo imeti zaščito pri zemeljskem stiku v rotorskem tokokrogu, moramo uporabiti pri generatorjih posebni drsni obroč in pa ščetko, kar je namenjeno izključno zaščiti. V kolikor pa te zaščite ne uporabimo, po moramo uporabiti zaščito pri ovojnem stiku v rotorskem navitju. Ta zaščita deluje na osnovi meritve enosmerne napetosti oz. toka vzbujanja samega vzbujalnika. Naj omenimo, da obstojajo za to zaščito tudi druge ideje, ki pa v praksi še niso preverjene.

4.5. PREVENTIVNE ZAŠČITE

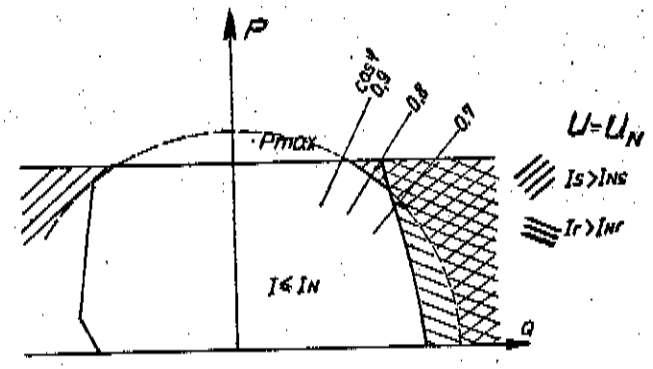
Uporabljamo 5 vrst preventivnih zaščit in sicer zaščito pred termičnimi simetričnimi in nesimetričnimi preobremenitvami, zaščito pred prenapetostjo, zaščito pred izostanku vzbujanja in pa zaščito pred motorskim obratovanjem.

4.5.1. Zaščite pred termičnimi preobremenitvami navitij

Visoke temperature zmanjšujejo električno odpornost in življensko dobo izolacijskih materialov. Posebno neugodno vpliva na navitje hitro spreminjanje temperature in to zaradi različnih temperaturnih razteznostnih koeficientov prevodnih in izolacijskih materialov. Do prekomernih temperatur navitja prihaja zaradi povišanih izgub v generatorju ali pa zaradi poslabšanja hlajenja.

Povišane izgube povzroča prekomerno povišana proizvodnja jalove moči, kar ima lahko za posledico prekomerno visok tok v statorskem ali v rotorskem navitju (sl. 4.10).

V rotorju pa dobimo dodatne izgube pri nesimetrični obremenitvi, pri asinhronskem obratovanju in pa pri višjih harmonskih komponentah tokov v statorju.



Sl. 4.10

Za izbiro zaščite in njeno nastavitev je važno, kakšno preobremenitev lahko generator prenese. Za klasične generatorje velja, da morajo zdržati 2 minuti 1,5-kratni tok, pri čemer morajo biti predhodno segreti na maksimalno obratovalno temperaturo. Bistveno nižjo preobremenljivost pa imajo veliki turbogeneratorji z vodnim oz. plinskim hlajenjem skozi cevi v statorju oz. rotorju. Ti generatorji morajo zdržati namreč le 1,3-kratni nazivni tok in to le 1 minuto. Ta vrednost velja za statorski tok, rotorski tok pa je lahko le 1,25-krat višji od nazivnega. Glede na visoko gostoto toka v teh generatorjih je časovna konstanta tudi ustrezno nizka (L. 13).

Za zaščito pred preobremenitvami navitij uporabljamo predvsem termične releje in pa termosonde.

4.5.1.1. Termični releji

Termične releje s spominsko funkcijo uporabljamo predvsem za statorsko navitje, pri velikih generatorjih pa uporabljamo termične releje tudi za rotorsko navitje. Termični releji se pri manjših in srednjih generatorjih uporabljajo predvsem pri avtomatiziranih elektrarnah. Njihova časovna konstanta je sorazmerno dolga, tudi do 80 minut. Včasih se pri njih uporablja kot korekcijska veličina temperatura hladilnega sredstva.

Veliki turbogeneratorji z direktnim hlajenjem so zaradi nizkih časovnih konstant pogosto opremljeni s termično zaščito rotorja in statorja. Delovni čas običajno ni nikdar krajši od 10 s, kar naj omogoča, da pri okvarah delujejo druge zaščite. Najdaljši delovni čas pa je 5 minut in sicer, če je tok npr. manjši od 1,16 I_n in večji od toka, ki je trajno

dopusten. S tako zaščito je varovano običajno statorsko in rotorsko navitje. Pri rotorskem navitju običajno merimo tok na izmenični strani usmerniške naprave.

Pri tem naj omenimo, da je za termično zaščito pri nesimetrijah predvidena posebna zaščita.

4.5.1.2.Termosonde

Termosonde z vgrajenim termoelementom ali s termometrskim upormo uporabljamo za nadzor temperatur navitij, temperatur statorskega paketa in izhodnih temperatur hladilnega sredstva. Pri prekoračitvi nastavljenih vrednosti dobimo signal. Pri avtomatskih elektrarnah pa deluje zaščita pri prekoračitvi temperature direktno na izklop agregata.

Za zaščito pred previsoko temperaturo v rotorskem navitju uporabljamo tudi meritev kvocienta med napetostjo in tokom, ki teče skozi vzbujalno navitje. Ker kvocient že predstavlja upornost navitja, ki s temperaturo raste , dobimo signalizacijo oz. izklop, če kvocient naraste preko nastavljene vrednosti.

4.5.2.Zaščite pred nesimetrično preobremenitvijo generatorjev

4.5.2.1.Vzroki nesimetričnih obremenitev

Nesimetrično obremenitev generatorjev povzročajo predvsem nesimetrične okvare in nesimetrični potrošniki. Manjše nesimetrične obremenitve pa povzročajo tudi nesimetrično grajeni deli omrežja, predvsem netransponirani vodi in transformatorji. Nesimetrične okvare so lahko transverzalne – kratki stiki ali pa longitudinalne – prekinitve.

Nesimetrične okvare so dvofazni kratki stiki in v ozemljenih sistemih tudi zemeljski stiki. Pri vseh teh okvarah delujejo druge zaščite in predstavlja zaščita pri nesimetriji le rezervno zaščito.

Bolj nevarne so eno in dvofazne prekinitve, ki niso povezane z delovanjem drugih zaščit. Prekinitve nastopajo predvsem pri nadzemnih vodih, pri izostalem enofaznem avtomatskem ponovnem vklopu oz. pri okvarah na stikalih. Nastopajo pa tudi drugod npr. v stikališčih. Pri nadzemnih vodih lahko nastane prekinitev zaradi utrga vodnika, ki je

običajno povezan z zemeljskim stikom, zaradi utrga locna, ki tvori električno zvezo med sledečima si odsekoma vodnika, in pa zaradi okvare na spojki, ki spaja dva dela vodnika.

Vrednost komponent tokov negativnega zaporedja, ki tečejo preko voda s prekinjenim vodnikom, je podana z enačbo:

$$I_2 = \frac{I_p}{1 + Z_2 : Z_1 + Z_2 : Z_o} \tag{4.2}$$

V enačbi je z I_p označen tok, ki je tekel pred prekinitvijo vodnika, z Z_1, Z_2 in Z_o pa so označene vsote impedanc pozitivnega, negativnega in ničnega zaporedja obeh delov sistema.

Če je sistem neozemljen in če vzamemo, da je $Z_1 = Z_2$, je vrednost komponent tokov negativnega zaporedja enaka polovični vrednosti faznega toka, ki je tekel pred okvaro. Manjše vrednosti komponent I_2 dobimo v sistemih, ki so efektivno ozemljeni. V teh omrežjih pride namreč dodatno še residualni tok po zemlji.

4.5.2.2. Nesimetrična obremenljivost generatorjev

Komponente tokov negativnega zaporedja v generatorju povzročajo vrsto nevšečnosti in tudi nevarnosti za generator in to predvsem vibracije in pregrevanje rotorja.

Komponente tokov negativnega zaporedja v statorju ustvarjajo magnetni nadtok, ki vrti s sinhrono hitrostjo v smeri, obratni smeri vrtenja rotorja. Ker magnetna upornost rotorja ni v vseh smereh enaka, nastopi nihanje amplitude magnetnega nadtoka, ki povzroča vibracije celotnega agregata. Magnetni nadtok, ki ga ustvarjajo tokovi negativnega zaporedja, inducira v vseh navitjih rotorja kot tudi v drugih njegovih prevodnih delih tokove. Tokovi dvojne frekvence dodatno segrevajo predvsem vzbujalno in dušilno navitje in pa masivne pole. Komponente tokov negativnega zaporedja zavirajo generator, saj povzročajo iste razmere, kot nastopajo pri asinhronskem stroju pri slipu s = 2, to je, ko se stroj zavira.

Induktivna upornost X_2, s katero se generator upira komponentam I_2, je približno enaka polovični vrednosti vsote subtransientnih reaktanc v vzdolžni smeri X''_d in prečni smeri X''_q rotorja:

$$X_2 = \frac{X''_d + X''_q}{2} \tag{4.3}$$

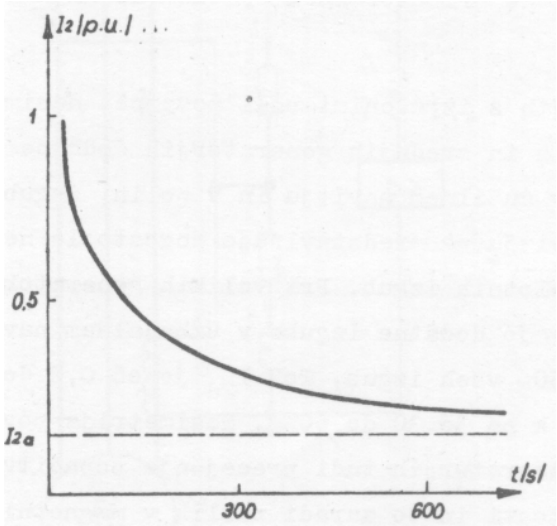
Dopuščeno vrednost komponent I_2 določa dovoljeno dodatno segrevanje rotorja. Pri tem so običajno najbolj šibko mesto spoji dušilnih palic z obroči.

Proizvajalci generatorjev podajajo za svoje stroje največjo, trajno dopustno vrednost komponent tokov negativnega zaporedja I_{2d}. Za kratkotrajne preobremenitve pa podajajo krivulje (sl. 4.11), pogosto pa podajajo dopuščeno preobremenitev s konstanto K, ki je:

$$K = \left(\frac{I_2}{I_N}\right)^2 - \left(\frac{I_{2d}}{I_N}\right)^2 * t \approx \left(\frac{I_2}{I_N}\right)^2 * t \tag{4.4}$$

Vrednost konstante K ne upošteva hlajenja in lahko z zadostno zanesljivostjo določimo dopuščeni čas obremenitve t le za čase, krajše od dveh minut.

Pri turbogeneratorjih so rotorji običajno termično močno obremenjeni. Poleg tega so pogosto nazivno obremenjeni in so dopuščene vrednosti nesimetrije dokaj nizke.



Sl. 4.11

Vrednosti I_{2d} znašajo od 0,1 do 0,3 I_N, konstanta K pa je od 2,5 do 20 s (tabela 4.1).

Kot lahko razberemo iz tabele 4.1, so faktorji K pri velikih enotah zelo nizki. Tako pride lahko do preobremenitev tudi že pri dvofaznem kratkem stiku s ponovnim vklopom!

Tabela 4.1

Hladilno sredstvo	**Hlajenje**	**Moč (MW)**	**I_{2d} (p.u.)**	**K(s)**
Zrak	Indirektno	do 50	0,3	20
Zrak	Direktno	do 50	0,25	20
Vodik	Indirektno	do 50	0,25	20
Vodik	Direktno	do 50	0,2	10
Vodik	Direktno	do 400	0,15	5
Tekočina	Direktno	do 800	0,1	2,5

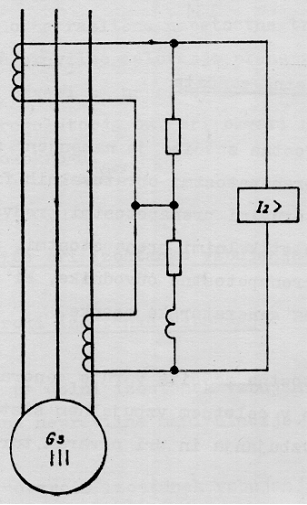
Pri rotorjih z izraženimi poli povzroča nesimetrija pri manjših in srednjih generatorjih dodatne izgube predvsem v dušilnem navitju in v polih, izgube v vzbujalnem navitju pa predstavljajo pogosto le nekaj odstotkov celotnih izgub. Pri velikih generatorjih pa predstavljajo dodaten izgube v vzbujalnem navitju tudi preko 50% vseh izgub. Tok I_{2d} je od 0,2 do 0,4 I_N, konstanta k pa je 30 do 60 s. Nesimetrija povzroča pri teh generatorjih tudi precejšnje popačitve statorskih napetosti in to zaradi razlik v magnetni upornosti rotorja v vzdolžni in prečni smeri.

4.5.2.3. Izvedbe zaščit

Zaščitni rele ima običajno vgrajen filter, ki izloči iz generatorskih tokov komponente negativnega zaporedja. Ker so običajno generatorski tokovi brz komponent tokov ničnega zaporedja, so normalno priključeni releji le dvofazno (sl. 4.12). Generatorje varujemo s nadtokovnimi in s termičnimi releji.

Nadtokovni časovno odvisni releji imajo običajno dve nastavitvi, eno na tok, ki je nižji od I_2 in drugo, nastavljeno na 20 do 40%. Rele deluje na vklop signalizacije, če je tok prekoračil prvo nastavitev, oz. po časovni zakasnitvi 5 do 15 s na izklop generatorja, če je tok prekoračil drugo nastavitev.

Nadtokovno časovno odvisni releji so bolj prilagojeni preobremenljivosti rotorja. V zadnjem času pa se uporabljajo tudi termični releji. Posebno važni postajajo ti releji pri velikih turbogeneratorjih z majhnimi termičnimi preobremenljivostmi.



Sl. 4.12

Sedaj praviloma izključujemo pri nesimetričnih obremenitvah generatorje in ne voda, kjer je prišlo do nesimetrije, lahko pa pričakujemo, da bo v bodočnosti prišlo do sprememb. Izklop agregata zaradi nesimetrije lahko namreč povzroči verižno reakcijo v sistemu, ki ima lahko zelo neljube posledice.

4.5.3. Relejna prenapetostna zaščita

Relejna prenapetostna zaščita je namenjena zaščiti generatorja pred prenapetostmi obratovalnih frekvenc. Za zaščito pred drugimi prenapetostmi predvsem pred atmosferskimi in stikalnimi prenapetostmi, ki jih včasih namestimo tudi na generatorske sponke.

Relejna prenapetostna zaščita varuje generator predvsem pri okvarah v celotnem vzbujalnem sistemu, pri ročnem vodenju vzbujanja in pri okvarah turbinskega regulatorja.

Do povišanja napetosti obratovalnih frekvenc prihaja tudi v normalnem obratovanju in sicer pri trenutnih razbremenitvah. Tem razbremenitvam sledi tudi povišanje vrtljajev, ki je pri turbogeneratorjih le nekaj procentov, občutno višje pa je pri nekaterih vodnih turbinah in to zaradi omejitev pri zapiranju turbine.

Prenapetostna zaščita deluje pri prenapetostih, ki so višje od prenapetosti pri popolni razbremenitvi agregata. Pri hidroagregatih, kjer nastopi dodatno povišanje vrtljajev, pa uporabimo običajno tudi zakasnjeno prenapetostno stopnjo, ki je nastavljena na nižjo vrednost kot prva, trenutna stopnja. Pri prenapetostnih zaščitah generatorjev, ki se jim lahko vrtljaji občutno dvignejo, mora biti rele frekvenčno neodvisen.

Prenapetostni rele in napetostni regulator priljučujemo običajno na različne napetostne transformatorje. S tem dobimo pravilno delovanje prenapetostne zaščite tudi pri okvari na napetostnem transformatorju napetostnega regulatorja oz. pri okvari na njegovem sekundarnem tokokrogu.

4.5.4. Zaščite pri izostanku vzbujanja generatorja

4.5.4.1. Vzroki izostanka vzbujanja

Popolni ali pa delni izostanek vzbujanja povzročajo okvare ali pa nepravilne manipulacije. Okvare, ki povzročajo izostanek vzubajanja, so v glavnem v regulacijskem sistemu, v tokokrogih in navitjih (kratek stik, dvojni zemeljski stik, prekinitev), na stikalih v vzbujalnih tokokrogih in na napajalnem delu.

Do izostanka vzbujanja pa privede tudi nepravilna manipulacija, npr. izklop napajanja ali demagnetacija generatorja. Čeprav nastopa izostanek vzbujanja sorazmerno redko, je v statistiki poškodb o nenormalnih pogonov generatorjev izostanek vzbujanja kar pogost, tudi do 15%.

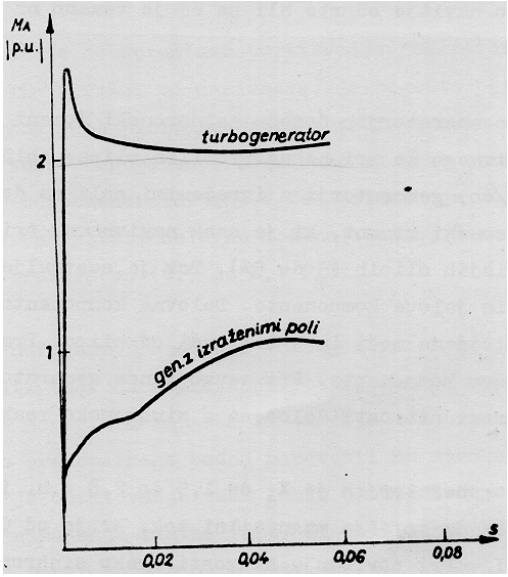
4.5.4.2. Posledice izostanka vzbujanja

Če generator obratuje ločeno, sledi izostanku vzbujanja zniževanja napetosti. Če pa obratuje z drugimi generatorji paralelno, pa po izostanku vzbujanja prične upadati magnetni pretok v rotorju. Posledica tega je, da preneha dajati jalovo moč, prične pa rasti jalova moč, ki jo prejema iz omrežja. Delovna moč, ki jo oddaja v omrežje, ostane v začetku nespremenjena.

Z zmanjševanjem magnetnega pretoka raste magnetilni tok, ki priteka iz omrežja, sinhronizacijska sila pada, veča pa se kolesni kot generatorja. Pri nevzbujenem generatorju je reakcijski moment M_r

$$M_r = \frac{U^2}{2}\left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q}\right) \tag{4.5}$$

Če povzroča pogonski stroj moment, ki je večji od reakcijskega momenta, preide generator iz sinhronega v asinhrono obratovanje (sl. 4.13).



Sl. 4.13

Pri generatorjih z izraženimi poli je vrednost reakcijskega momenta pri nazivni napetosti ca 0,35 M_N, bistveno manjša pa je pri turbogeneratorjih. Ker sta sinhronski reaktanci v vzdolžni in prečni smeri skoraj enaki, razlikujeta se le za 3 do 10%, je reakcijski moment lahko le nekaj odstotkov nazivnega momenta.

Če preide generator sinhrono hitrost, določa oddano moč generatorja asinhronski moment. Če je moment, ki ga povzroča pogonski stroj, večji od asinhronskega momenta in momenta, potrebnega za kritje izgub, se generator pospešuje in to tako dolgo, da se ustvari ravnotežje. Z vrtljaji namreč pri manjših slipih asinhronski moment raste, regulator pogonskega stroja pa z višanjem vrtljajev običajno zmanjšuje moč pogonskega stroja. Ker je pri vodnih turbinah časovna konstanta regulacijskega sistema pogosto precej velika, pride lahko pri izpadu vzbujanja do precejšnjega nihanja hitrosti agregata. Pri parnih turbinah pa nihanje hitrosti po izpadu vzbujanja ni običajno izrazito.

Trenutna vrednost asinhronskega momenta je odvisna tudi od trenutne lege rotorja. Zato dobimo poleg neke srednje vrednosti asinhronskega momenta še komponentno momenta, ki niha z dvojno frekvenco slipa. Ker povzročajo asinhronski moment tako toki v vzbujalnem kot tudi v dušilnem navitju, je moment različen, če je vzbujalno navitje odprto ali pa če je vezano na kratko.

Pri turbogeneratorjih doseže asinhronski moment vrednost nazivnega že pri nekaj promilih slipa, običajno (2 ... 7) ‰, generatorji z izraženimi poli pa dosežejo asinhronski moment, ki je enak nazivnemu, pri bistveno višjih slipih (3 ... 5) %. Tok je sestavljen iz delovne in jalove komponente.delovna komponenta je odvisna od oddane moči in s tem

tudi od slipa. Prav tako tudi jalova komponenta. Pri nevzbujenem generatorju je pri sinhroni hitrosti določena s sinhronsko reaktanco.

Pri turbogeneratorjih je X_d od 1,5 do 2,8 p.u. in tako priteka iz omrežja magnetilni tok, ki je od 0,36 do 0,75 I_N. Pri povišanju hitrosti preko sinhrone niha jalova moč med dvema vrednostma, ki sta določeni z reaktanco v prečni in z reaktanco v vzdolžni smeri. Pri slipu ca 0,5 dobita reaktanci približno vrednost tranzientnih reaktanc X'_d in X'_q, pri nadaljnjem večanju pa se približujeta vrednosti subtransientnih reaktanc X''_d in X''_q. Če oddaja generator pri asinhronem obratovanju nazivno moč, je pri teh generatorjih magnetilni tok 0,6 do 0,8 I_n.

Pri generatorjih z izraženimi poli je reaktanca X_d od 0,8 do 1,6, torej priteka pri nazivni napetosti iz omrežja v nevzbujen generator magnetilni tok, ki je od o,6 do 1,25 I_N. V asinhronem obratovanju, ko daje agregat nazivno delovno moč, se pa magnetilni tok dvigne do 2,5 I_N.

Ker normalno ne dopuščamo obratovanje generatorjev s tokom, ki je višji od nazivnega, je pogosto obratovanje nevzbujenih hidroagregatov zaradi visokih magnetilnih tokov nedopustno. Dopuščamo pa tako obratovanje pri turbogeneratorjih. V tem primeru je potrebno predvsem zmanjšati delovno moč za toliko, da nazivni tok ni prekoračen (0,5 do 0,7 P_N).

Pri asinhronemn obratovanju turbogeneratorjev je potrebno paziti tudi na segrevanje rotorja in na možnost prejemanja magnetilnega toka iz omrežja. Če pride zardi tega do prekomernega padca napetosti na sponkah generatorja, je obratovanje tudi lahko onemogočeno, predvsem zaradi napajanja lastne rabe, ki je običajno priključeno na generatorsko napetost.

4.5.4.3. Izvedbe zaščit

Zaščitni releji, ki jih uporabljamo kot zaščito pri izostanku vzbujanja, se med sabo razlikujejo glede na kriterije, ki jih uporabljajo za detekcijo, glede na okvare, pri katerih naj zaščita deluje in pa tudi glede na selektivnost in občutljivost pri razmerah, ko naj zaščita ne deluje (nihanje v omrežju, dopuščeno obratovanje v kapacitivnem območju in pod.).

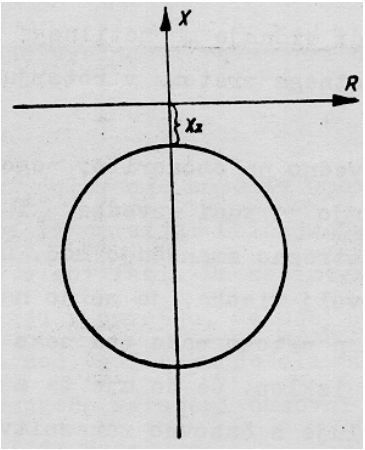
Glede na kriterije delovanja delimo zaščite na zaščite, ki ugotavljajo izostanek vzbujanja in meritev v vzbujalnih tokokrogih, in v zaščite, ki merijo veličine v trifaznem tokokrogu.

V prvi skupini uporabljamo podtokovne, podnapetostne in pa tudi kvocientne enosmerne releje. Vendar se te vrste zaščit v zadnjem času opuščajo. V drugi skupini zaščit se uporabljajo skoraj izključno uporovni releji, predvsem mho releji s premaknjeno karakteristiko.

Če opazujemo obratovanje generatorja po izostanku vzbujanja v R – X diagramu, vidimo, da obratuje generator v stacionarnem stanju v IV. Kvadrantu, saj oddaja delovno, prejema pa jalovo magnetilno moč. Pri sinhroni hitrosti poteka obratovanje med mho krogoma, katerih premera sta obe sinhronski reaktanci. Maksimalno možno moč ohmske komponente pa, kot omenjeno, določa reakcijski moment. Če preide sinhrono hitrost, pa so podane za posamezne slipe že obe reaktanci in pa tudi delovna upornost.

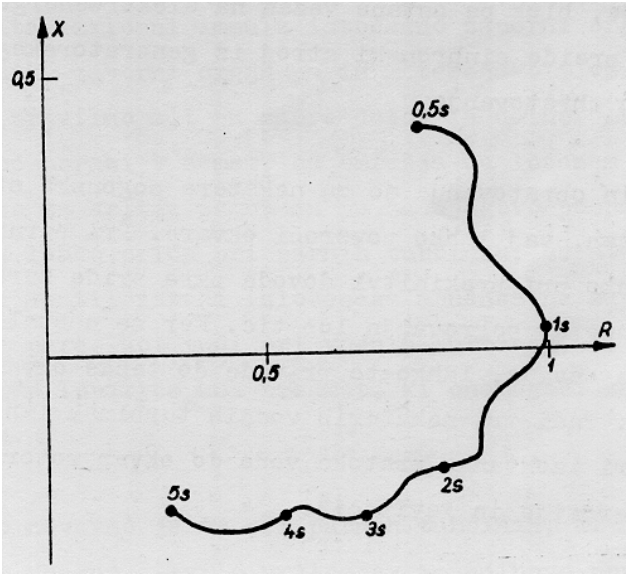
Ker potek krivulj impedanc agregata pri raznih slipih v R –X diagramu običajno nimamo, zadošča, da predpostavimo, da obratovanje pri izpadu iz vzbujanja ni izven mho kroga, ki je določen s prečno sinhronsko reaktanco. Prav tako ni možno obratovanje v konduktančnem krogu, ki je določen z maksimalno delovno močjo.

Ker ne želimo, da bi bila zaščita preveč občutljiva na nihanje v omrežju, običajno premaknemo mho krog za X_z navzdol (sl. 4.14). Nekateri svetujejo, da naj bo X_z enak vzdolžni sinhronski reaktanci X_d, drugi pa menijo, da naj bo X_z enak dvojni vrednosti transientne reaktance.



Sl. 4.14

Na sl. 4.15 je prikazan potek krivulje impedanc pri izostanku vzbujanja.



Sl.4.15

Vidno je nihanje reaktance in pa v nadaljevanju tudi višanje magnetilnega toka zaradi zmanjševanja magnetnega pretoka v rotorju.

Zaščite delujejo vedno na opozorilo, pogosto pa tudi na izklop. Obstojajo pa tudi izvedbe, ki pri izpadu vzbujanja takoj ustrezno zmanjšajo moč. Če je napetost v sistemu dovolj visoka, je možno nadaljnje obratovanje. Če pa napetost pade pod neko vrednost, deluje zaščita na izklop. Če deluje ta zaščita na izklop, običajno deluje s časovno zakasnitvijo 2 do 5 sekund.

4.5.5. Zaščita pred motorskim obratovanjem agregata

Če pogonski stroj agregata izgubi svojo energetsko napajanje, blok pa ostane vezan na elektroenergetski sistem, preide sinhronski stroj iz energetskega v motorsko obratovanje.

Tak način obratovanja je za nekatere pogonske stroje nedopusten, saj lahko povzroči okvare. Pri parni turbini lahko pri prekinitvi dovoda pare preide zaradi turbulence do segrevanja lopatic. Ker se nastala toplota ne odvaja, lahko to privede do težke okvare turbine. Tudi pri nekaterih vodnih turbinah lahko preide pri izostanku pretoka vode do okvar rotorja zaradi erozije in kavitacije.

Moč, ki jo agregat v tem primeru prejema, je odvisna od vrste pogonskega stroja. Pri parnih turbinah znaša ca 3% nazivne moči, pri vodnih turbinah pa le 6,2 do 2%, višje vrednosti pa so pri dieselskih motorjih (do 25%).

Kot kriterij za delovanje zaščite uporabimo moč, ki jo agregat prejema iz omrežja. Običajno uporabljamo močnostni rele le v eni fazi. Da se izognemo delovanju zaščite pri nihanju v omrežju, deluje zaščita le, če agregat prejema moč vsaj sekundo ali več. Zakasnjeno delovanje omogoča vgrajeni časovni rele, običajno nastavljiv od 1 do 5 sekund.

To zaščito pa uporabljamo tudi pri okvarah v pogonskem delu agregata in to za pravilno koordinacijo med delovanjem zapornega organa pogonskega stroja in med odklopom agregata od omrežja.

Če dobite izklopni impulz istočasno zaporni organ in oklopnik, zaporni organ pa iz kateregakoli vzroka ne deluje pravilno ali pa zapre dotok le delno, se dotekajoča moč porabi v samem, od omrežja že ločenem agregatu in to za kritje izgub in pa za njegovo pospeševanje. Do tega lahko pride pri parnih turbinah, če npr. hitro zaporni ventil zaradi izločenega apnenca ne zapre popolnoma pare, kot tudi pri vodnih turbinah, če npr. pride med lopatice kak predmet, ki onemogoči zaprtje turbine.

Posebno nevarno je to pri parnih turbinah, ki niso grajene za ubežno število vrtljajev in njihovo povišanje za 20% že lahko povzroča težke okvare turbinskega tekača.

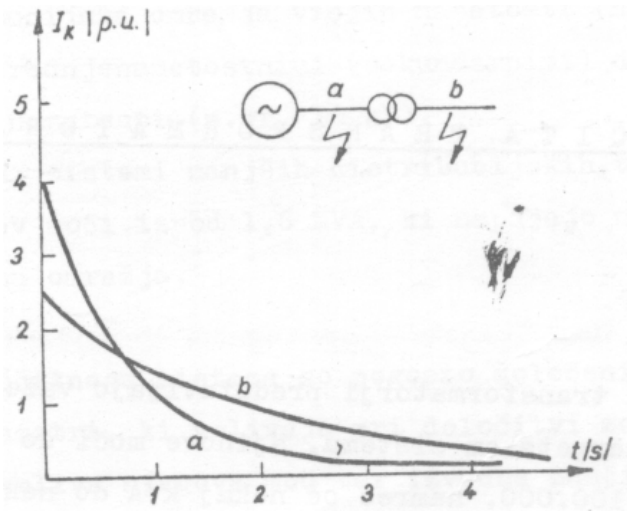
Pri vodnih turbinah to ni tako nevarno, saj so grajene za ubežno število vrtljajev. Vsekakor pa pride pri turbinah z daljšimi cevovodi in z zato daljšimi časi zapiranja pri istočasnem delovanju na zaporni organ in na odklopnik vedno po odklopu agregata do občutnega povišanja vrtljajev. To pa v primeru okvare na pogonskem stroju nikakor ni želeno.

Zato običajno delujejo pri parnih turbinah in pri vodnih turbinah z daljšimi cevovodi zaščite pri okvarah na pogonskem stroju le na zaporni organ. Izklop agregata pa izvede že omenjeni rele na povratno moč.

4.6. REZERVNE ZAŠČITE PRI KRATKIH STIKIH

Naloga teh rezervnih zaščit je, da delujejo pri kratkih stikih v samem bloku (pri zatajitvi diferenčne zaščite) kot tudi pri okvarah na zbiralkah oz. na vodih. Če zaščite zbiralk ni, predstavljajo te rezervne zaščite istočasno osnovno zaščito pri okvarah na zbiralkah.

Problem rezervnih zaščit pri kratkih stikih je pri agregatih, kjer se vzbujalni sistem napaja iz generatorske napetosti. Pri nastopu kratkega stika pride do hitrega upadanja kratkostičnega toka , ki je povezano z upadanjem napetosti na generatorju (sl. 4.16).



Sl. 4.16

Kot rezervno zaščito uporabljamo nadtokovne in distančne releje. Nadtokovne releje nastavljamo od 1,5 do 2 I_n in to s časom 2 do 4 s. Če je vzbujalni sistem napajan z generatorsko napetostjo, bi zaradi hitrega pojemanja toka do delovanja zaščite sploh ne prišlo. V tem primeru pa po delovanju nadtokovnega releja napaja časovni rele podnapetostni rele, nastavljen na ca 30% U_n (L. 17).

Vse pogosteje pa uporabljamo pri tej zaščiti tudi distančno zaščito, ki je bolj usklajena s celotno zaščito sistema. V svoji prvi stopnji deluje izključno pri okvarah v bloku in varuje le 50% transformator. V drugi stopnji pa deluje pri okvarah na zbiralkah, deluje pa tudi pri okvarah na vodih, ki nastopijo v bližini zbiralk.

Pogosto zadošča za zaščito impedančni rele, na katerega delovanje ne vpliva zasuk tokov pri prehodu skozi transformator toliko kot pri drugih izvedbah distančnih relejev.

5. ZAŠČITA TRANSFORMATORJEV

5.1. UVOD

Močnostni transformatorji predstavljajo važen člen v elektroenergetskem sistemu. Njihove moči so v razmerju ca 1:100.000, namreč od nekaj kVA do nekaj 100 MVA. To skupno z njihovimi različnimi karakteristikami in lastnostmi opravičuje sorazmerno širok spekter tako zaščitnih naprav kot tudi zaščitnih sistemov.

V zadnjem času lahko zasledimo željo po standardizaciji tipov zaščitnih sistemov. Tip zaščitnega sistema transformatorja določa predvsem naloga, ki jo opravlja transformator v sistemu. Običajno ločimo štiri tipe, in sicer:

1. Zaščitni sistemi generatorskih transformatorjev, ki povezujejo generatorje s prenosnim omrežjem. Tu so pogosto generatorske zaščitne naprave povezane s transformatorskimi.
2. Zaščitni sistemi prenosnih in interkonekcijskih transformatorjev moči, običajno nad 100 MVA. Transformatorji povezujejo omrežja visokih in zelo visokih napetosti, pri nas povezujejo omrežja napetosti 110, 220 in 380 kV.
3. Zaščitni sistemi razdelilnih transformatorjev, običajno moči do 63 MVA, ki povezujejo visokonapetostna omrežja s srednje napetostnimi distribucijskimi omrežji oz. srednje napetostna (primarna) distribucijska omrežja višjih napetosti (npr. 35 kV) s srednje napetostnimi (sekundarnimi) omrežji nižjih napetosti (npr. 10 kV).

4. Zaščitni sistemi manjših distribucijskih transformatorjev moči izpod 1,6 MVA, ki napajajo nizkonapetostna omrežja.

S tipom zaščitnega sistema so pogosto določeni tudi drugi parametri, ki vplivajo pri določitvi zaščite. Predvsem vpliva njegova moč ter izvedba zaščite in ozemljitve nevtralne točke omrežja na visoko in na nizkonapetostni strani transformatorja. Nadalje vpliva na izvedbo zaščite, ali je transformator enofazne ali trifazne izvedbe, ali je opremljen s krmilnim preklopnikom za regulacijo napetosti pod obremenitvijo, ali ima poleg sekundarnega še terciarno navitje. Nekoliko vpliva na izbiro zaščite tudi vodenje transformatorske postaje, v kateri je transformator (postaja je s posadko, postaja je daljinsko vodena, postaja je avtomatizirana).

Zaščitni sistem transformatorja sestavljajo poleg zaščitnih relejev predvsem še napetostni in tokovni zaščitni transformatorji, tipala neelektričnih veličin kot nadtoki, nivoji, pritiski, temperature, dalje naprave za izvajanje ustreznih zaščitnih ukrepov (npr. odklopniki, naprave za gašenje, odvodniki prenapetosti), celotno ožičenje in pa naprave za povezavo z informacijskim sistemom, kot tudi z avtomati oz. regulatorji.

5.2. VRSTE IN VZROKI OKVAR NA POSAMEZNIH DELIH TRANSFORMATORJA

Pri projektiranju zaščitnega sistema je potrebno poznati za varovani transformator možne vrste okvar in njih pogostost nastopanja kot tudi njihove vzroke. Okvare lahko delimo glede na mesto nastanka okvare. Taka razdelitev je koristna tudi pri statističnem zasledovanju okvar na oz. v transformatorju.

5.2.1. Okvare v navitju (vključno povezave med navitji)

Nastopa 5 osnovnih vrst okvar in sicer:

1. Stik med ovoji ene faze
2. Stik med navitji dveh faz
3. Stik med visoko in nizkonapetostnim navitjem
4. Stik me navitjem in ozemljenimi deli transformatorja
5. Prekinitev vodnika

Pogosto pa nastopajo te okvare tudi kombinirano. Najpogosteje nastopajo običajno stiki med navitji in pa zemeljski stiki. Pogostost teh okvar je pri transformatorjih precej različna. Navajajo se vrednosti od 0,5 do 20 okvar na transformator v 100 letih.

Vzroki za omenjene okvare so zunanji (prenapetosti, preobremenitve, kratki stiki v omrežjih), lahko pa so vzroki za okvaro v samem transformatorju (slabo stanje izolacije oz. izolacijskega olja, usedline, odpoved hladilnih naprav). Pogosto pa so vzroki kombinirani.

5.2.2. Okvare v izolacijskem olju

Obstojajo trije osnovni načini pri katerih olje prekomerno hlapi oz. celo razpada: prekomerno segrevanje olja, izločanje plinov pri delnih razelektritvah in intenzivno razpadanje olja pri obloku.

Sestava plinov, ki se pri tem ustvarjajo, je predvsem odvisna od vrste okvare. Pri obloku v olju nastajata vodik in pa acetilen (C_2H_2), delno pa tudi metan (CH_4) in etilen (C_2H_4). Pri delnih razelektritvah nastajata vodik in metan. Pri močnih pregrevanjih se pa tvorijo poleg vodika, metana, etilena in propilena (C_3H_6) včasih še etan, propan in butan. V koliko je prizadeta pri okvari tudi izolacija s celulozo, nastopata še ogljikov monoksid in dioksid. Seveda pa nastopajo pogosto kombinirane okvare in so zato tudi kombinacije plinov različne od že omenjenih.

Iz olja pa se tudi v normalnem obratovanju izloča vrsta plinov. Zrak se izloča po novem polnjenju olja, prav tako se intenzivneje izloča iz olja pri močnem padcu pritiska in pri hitrih ohladitvah. Izločanje etana, propana in butana je povezano z normalnim staranjem olja. Pri stikalnih manevrih preklopnika odcepov pod obremenitvijo pa se izločata predvsem acetilen in vodik.

Lastnost olja je, da so v njem lahko raztopljene sorazmerno velike količine plinov, tako da pri manjših okvarah olje absorbira vse nastale pline. Le pri nekoliko intenzivnejši okvari se plini več ne absorbirajo in se pričnejo dvigovati.

Če pa je okvara težja in nastopi v olju oblok, se ustvarja plin zelo hitro in sicer 50 do 150 cm^3/kWs! Vsled tega se prične zelo hitro umikati olje iz kotla proti konzervatorju. Vzroki za okvare v olju so lahko zunanji (prenapetosti in termične preobremenitve), lahko pa so notranji in sicer slabo stanje samega olja (prevelik odstotek vlage, kisika, zraka, nečistoč in drugih plinov) ali poškodbe na drugih delih transformatorja.

5.2.3. Okvare v transformatorskem jedru

Okvare so pogosto mehanskega značaja, lahko pa os tudi poškodbe v izolaciji, predvsem poškodba izolacije med pločevinami in izolacije svornikov, ki povzročajo visoke kratkostične tokove po železnih delih. Te okvare so sorazmerno redke. Vzroki za nastop okvare so lahko zunanji, npr. previsoke napetosti, lahko pa so tudi notranji, npr. slabo stanje izolacije med pločevinami oz. med prevodnimi deli jedra.

5.2.4. Okvare na dovodih in prevodnih izolatorjih

Okvare so poškodbe prevodnih izolatorjev, kratki stiki med dovodi oz. stiki z ozemljenimi deli in pa prekinitve dovodov. Te okvare so sorazmerno redke. Vzroki okvar so: napake v materialih, napetostne in tokovne preobremenitve kot tudi slabo stanje izolacije dovodov.

5.2.5. Okvare na krmilnih preklopnikih stopenj pod obremenitvijo

Okvare nastopajo predvsem na motorskem pogonu, tudi do 90% vseh okvar na preklopnikih, nastopajo pa tudi na stikalnih elementih (do 20%). Okvare na preklopnikih nastopajo sorazmerno pogosto in predstavljajo od 30 do 60% vseh okvar regulacijskih transformatorjev. Vendar pa je treba pripomniti, da je čas popravila običajno sorazmerno kratek.

5.2.6.Okvare na hladilnih napravah

Vzrok okvar v hladilnem sistemu so predvsem okvare na črpalkah ali ventilatorjih. Tudi te okvare nastopajo sorazmerno redko.

5.2.7. Okvare na transformatorskem kotlu in konzervatorju

Najpogostejša okvara je običajno slabo tesnjenje in puščanje olja. Te okvare običajno ne zahtevajo takojšnjo intervencijo.

5.2.8. Okvare na tipalih za zaščito in nadzor, nameščenih na transformatorju

Okvare nastopajo na samih tipalih ali pa na dovodih. Ob koncu naj omenimo, da je pri okvarah pogosto prizadetih več delov transformatorja istočasno. Pri kratkih stikih v navitju je npr. vedno prizadeto tudi olje.

5.3. GLAVNE ZAŠČITE, KI DELUJEJO PRI OKVARAH V TRANSFORMATORJIH

Zaščitne naprave, ki delujejo pri okvarah v transformatorju, delimo v pet skupin, in sicer:

1. Zaščitni releji, pri katerih je vhodna napajalna veličina tok. V to skupino spadajo nadtokovne zaščite, zaščita na residualni tok, zaščite kotla, diferenčne zaščite in zaščite pri nesimetriji.
2. Zaščitni neelektrični releji, ki delujejo pri ustvarjanju plinov v transformatorju. V to skupino spadajo Buchholzov rele, rele na pritisk in rele na spremembo pritiska.
3. Zaščitne naprave, ki delujejo pri požaru v transformatorju.
4. Zaščitne naprave, ki delujejo na osnovi detekcije nastopa visokofrekvenčnih pojavov pri razelektritvah oz. pri obloku v transformatorju.
5. Zaščite, ki delujejo pri okvarah na pomožnih napravah.

V nadaljevanju bomo obravnavali le zaščitne releje (skupin 1 in 2).

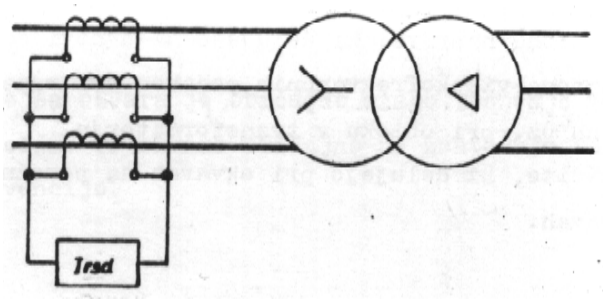
5.3.1. Zaščite z releji, katerih vhodna napajalna veličina je tok

5.3.1.1. Nadtokovna zaščita

Te zaščite, ki nadzirajo vrednost faznih tokov, običajno niso glavne, ampak le rezervne oz. preventivne zaščite. Le pri manjših transformatorjih so nadtokovne zaščite tudi glavne zaščite pri okvarah v transformatorju. Zato so te zaščite v celoti obravnavane pri rezervnih oz. preventivnih zaščitah.

5.3.1.2. Zaščite na residualni tok

Kot zaščitni rele je uporabljen pri teh zaščitah nadtokovni rele, katerega vhodna napajalna veličina je residualni tok (vsota komponent ničnega zaporedja faznih tokov – enačba 3.15). Zaščita deluje pri stiku navitja oz. dovodov z ozemljenimi deli transformatorja. V kolikor je navitje vezano v trikot, varuje zaščita celotno navitje,



Sl. 5.1

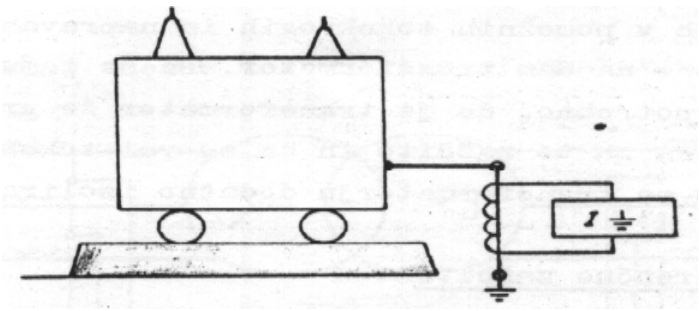
Če pa je vezano v zvezdo, ostane določen del navitja v okolici zvezdišča nezaščiten. To zaščito uporabljamo le, če zvezdišče zaščitenega navitja ni ozemljeno. V tem primeru bi zaščita delovala tudi pri zemeljskih stikih izven zaščitenega področja, ki obsega poleg navitja tudi dovode od tokovnih transformatorjev do samega transformatorja. Vsako navitje, ki ga želimo zaščititi, mora imeti svojo zaščito.

Za pravilno delovanje je potrebno, da je residualni tok dovolj visok za aktiviranje zaščite. Če zajemamo residualni tok iz tokovnih transformatorjev, vezanih v Holm-Greenovi vezavi, obstoja nevarnost, da pride pri nesimetričnih okvarah izven transformatorja do neenakih magnetilnih tokov tokovnih transformatorjev, kar lahko povzroči nepotrebno delovanje zaščite. Na to je treba pri izbiri tokovnih transformatorjev še posebej paziti. Te nevarnosti ni, če uporabimo objemni tokovni transformator.

5.3.1.3. Zaščita kotla

Zaščita deluje pri stikih navitja z ozemljenimi deli transformatorja. Transformator je namreč ozemljen preko tokovnega transformatorja, na katerega je vezan zaščitni nadtokovni rele. Zato mora biti transformator od okolice izoliran (sl. 5.2).

Pogoj za uporabo te zaščite je, da je zemeljskostični tok dovolj velik, da aktivira zaščito. Zato uporabljamo to zaščito predvsem pri efektivno ozemljenih sistemih.



Sl. 5.2

Tudi pri tej zaščiti obstoja nevarnost nepravilnega delovanja in to predvsem zaradi dveh vzrokov:

1. Če pride do zemeljskega stika z visokim zemeljskostičnim tokom v bližini transformatorja, lahko del zemeljskostičnega toka steče tudi preko podnožja transformatorja do transformatorja in nato preko tokovnega transformatorja v zemljo. Če je ta tok dovolj visok, lahko sproži delovanje zaščite. Da se temu izognemo, mora biti upornost med transformatorjem in zemljo dovolj visoka.
2. Do delovanja zaščite lahko pride tudi pri zemeljskih stikih v pomožnih tokokrogih in napravah, ki so montirane na transformator. Da se temu izognemo, je potrebno, da je transformator že predhodno predviden za to zaščito in da so vsi tokokrogi in naprave na transformatorju dodatno izolirane.

5.3.1.4. Diferenčne zaščite

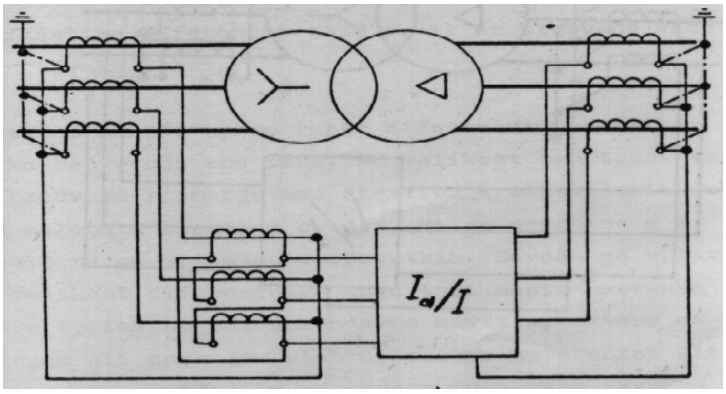
Pri zaščiti transformatorja uporabljamo dve vzdolžni diferenčni zaščiti in sicer zaščito, pri kateri primerjamo fazne tokove na primarni strani I_1 s faznimi tokovi na sekundarni strani I_2, in pa zaščito, kjer primerjamo residualni tok v dovodu s tokom, ki teče iz zvezdišča v zemljo. Razlika tokov je kriterij za delovanje zaščite.

5.3.1.4.1. Fazna diferenčna zaščita

Ker je to najpogostejša diferenčna zaščita, uporabljamo zanjo kar ime diferenčna zaščita.

<u>1.Prilagoditev faznih tokov</u>

Ker so fazni tokovi na sekundarni strani tokovnih transformatorjev na obeh straneh transformatorja v normalnih razmerah različni po iznosu, pogosto pa so tudi fazno premaknjeni, bi dobili že v normalnih razmerah diferenčne tokove, ki bi predstavljali njihovo razliko. Temu se lahko izognemo na dva načina, z uporabo vmesnih transformatorjev in z uporabo posebne vezave. Če uporabimo vmesne tokovne transformatorje, vežemo

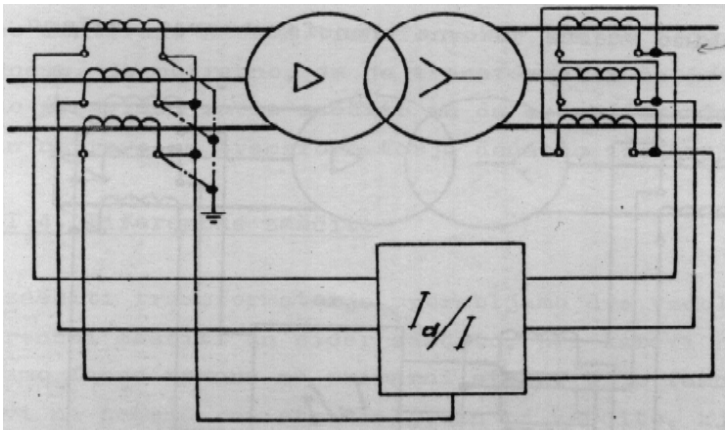


Sl. 5.3

straneh transformatorja v zvezdo, ki jo zaščitno ozemljimo (sl. 5.3).

Trije enofazni vmesni transformatorji, ki jih vežemo enako, kot je vezan zaščitni transformator, omogočajo, da dobimo v normalnih pogojih zanemarljive diferenčne tokove. Prestavno razmerje vmesnih transformatorjev določimo iz prenosnega razmerja tokovnih transformatorjev na obeh straneh transformatorja in iz prestavnega razmerja zaščitnega transformatorja.

Vmesnim transformatorjem se pa lahko tudi izognemo, če vežemo sekundarno navitje tokovnih transformatorjev ustrezno vezavi zaščitnega transformatorja (sl. 5.4).



Sl. 5.4

Seveda pri tej vezavi ni možno ozemljiti vsa sekundarna navitja tokovnih transformatorjev, kar je gotovo pomanjkljivost tega načina, ki pa se kljub temu precej uporablja.

Do diferenčnih tokov prihaja v zaščitnem območju transformatorja pri raznih okvarah, dobimo pa jih tudi, če okvar ni.

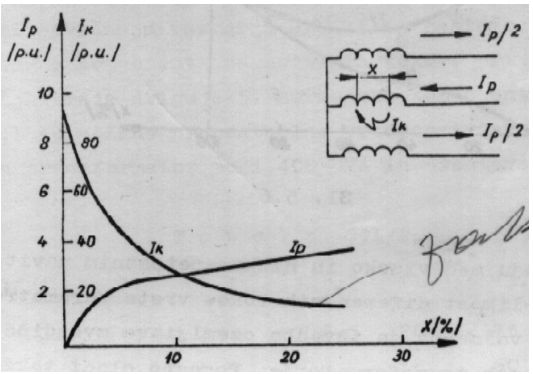
2.Diferenčni tokovi pri okvarah v zaščitenem območju

Območje zaščite sega od tokovnikov na primarni strani do tokovnikov na sekundarni strani transformatorja.

Diferenčne tokove dobimo pri naslednjih okvarah: stik med navitji dveh faz oz. med faznimi vodniki, stik med ovoji ene faze, stik navitja z ozemljenimi deli in pa stik med primarnim in sekundarnim navitjem.

Pri stiku med navitji in pri stiku med faznimi vodniki dobimo diferenčne tokove, ki so bistveno višji od nazivnih tokov.

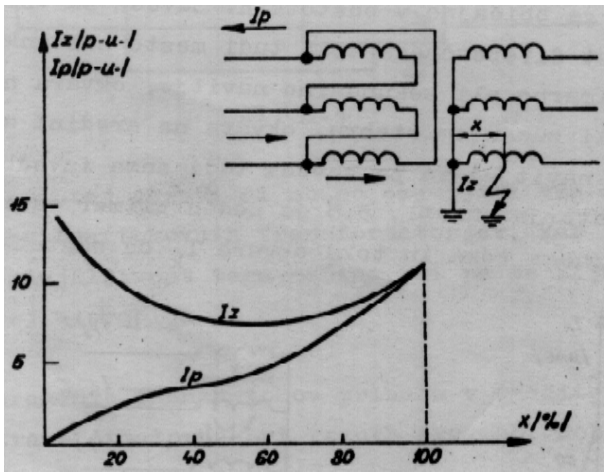
Bistveno manjši pa so lahko diferenčni tokovi pri stiku med ovoji ene faze. Na velikost teh tokov vpliva predvsem razmerje med številom kratko vezanih in med celotnim številom ovojev, ki ga označimo z X, podajamo pa ga običajno v odstotkih. Seveda pa vpliva na velikost diferenčnega toka tudi mesto nastanka okvare (primarno ali sekundarno navitje, okvara na notranjem ali zunanjem stebru, okvara na sredini ali pa konceh navitja) in pa seveda tudi sama izvedba transformatorja. Na sl 5.5 je podan primer odvisnosti primarnega toka in toka okvare I_k od odstotka kratko vezanih ovojev X. Oba tokova sta izražena glede na nazivni tok (p.u.).



Sl. 5.5

Pri stiku navitja z ozemljenimi deli transformatorja dobimo za delovanje zaščite dovolj visoke tokove le, če je sistem efektivno ozemljen. Pri navitju, vezanem v zvezdo,

pa je potrebno še, da je mesto okvare dovolj oddaljeno od zvezdišča navitja. Odvisnost toka okvare in primarnega toka od razdalje mesta zemeljskega stika X je podano za transformator z ozemljenim zvediščem na sl. 5.6.



Sl. 5.6

Pri preboju med visoko in nizkonapetostnem navitjem določa velikost diferenčnih tokov vrsta parametrov, predvsem važna pa je izvedba ozemljitve zvezdišč na obeh straneh transformatorja. Pogosto sledi takšni okvari še preboj nizkonapetostnega dela na zemljo.

3.Diferenčni tokovi v primeru, da ni okvare v zaščitenem območju

Do diferenčnih tokov v zdravem transformatorju prihaja lahko zaradi štirih vzrokov in to zaradi magnetilnih tokov zaščitenega transformatorja, zaradi odstopanja prestave transformatorja od nazivne vrednosti, zaradi neenakih karakteristik zaščitnih tokovnih transformatorjev oz. zaradi njihovih neenakih magnetilnih tokov in pa zaradi ničnih komponent tokov pri zemeljskem stiku izven zaščitenega območja (le pri transformatorjih z ozemljenim zvezdiščem).

a. Magnetilni tokovi praznega teka zaščitenega transformatorja

V normalnih prilikah so magnetilni tokovi sorazmerno majhni. Pri večjih transformatorjih so izpod 1% nazivnega toka, pri manjših pa nekoliko iznad te vrednosti. Bistveno pa narastejo pri občutnem povišanju razmerja med napetostjo U in frekvenco f.

Pri povišanju razmerja $U/U_N:f/f_N$ rastejo višje harmonske komponente magnetilnih tokov, pri čemer se najhitreje dviguje 5. harmonska komponenta. V tabeli 5.1 so podane procentne vrednosti teh komponent za transformator moči 400 MVA in prestave 500/132 kV.

Tabela 5.1

$U/U_N:f/f_N$	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
$I_{(1)}$ (%I_N)	0,7	3	6,5	20	75	130
$I_{(3)}$ (%I_N)	0,6	2,8	6	18	60	95
$I_{(5)}$ (%I_N)	0,25	1	2	14	38	45

Po vklopu transformatorja se pojavi lahko pri transformatorju izredno visoka amplituda magnetilnega toka. Najvišja je, če pride do vklopa v trenutku, ko gre napetost skozi nič. Ta vrednost doseže v primeru, da je transformator vezan na neskončno močno omrežje, amplitudo, ki je 5 do 10 krat višja od amplitude nazivnega toka in to, če se transformator vključi z nizkonapetostne strani. Pri vklopu z visokonapetostne strni pa je amplituda še do 2 krat večja! Seveda nastopajo pri pri vklopu v magnetilnem toku poleg enosmerne komponente še višje harmonske komponente. Primer njihove sestave je podan v tabeli 5.2.

Tabela 5.2

$\mathbf{I_{(1)}}$	$\mathbf{I_{(-)}}$	$\mathbf{I_{(2)}}$	$\mathbf{I_{(3)}}$	$\mathbf{I_{(4)}}$	$\mathbf{I_{(5)}}$	$\mathbf{I_{(6)}}$	$\mathbf{I_{(7)}}$
100%	60%	60%	50%	5%	4,1%	3,7%	2,4%

Pojav se izniha v nekaj sekundah. S časom se poleg amplitud spreminja tudi procentualna udeležba posameznih komponent.

b. Spreminjanje prestave

Pri transformatorjih je predvideno, da se prestava lahko preklaplja v breznapetostnem stanju za do 5%. Občutno večji obseg spreminjanja prestave pa

imajo regulacijski transformatorji. Pri nas znaša ta obseg do 16%, po podatkih v literaturi pa je ta obseg tudi do 22%.

Vzporedno s preklapljanjem prestave transformatorja bi bilo potrebno spreminjati tudi prestavno razmerje vmesnih transformatorjev. Ker tega ne delamo, dobimo v diferenčni veji tokove, ki so enaki toku iz primarne strani, pomnoženem z odstopanjem prestave od njene nazivne vrednosti.

c. Neenake karakteristike zaščitnih tokovnih transformatorjev.

Ker so zaščitni tokovni transformatorji na visokonapetostni strani grajeni drugače kot transformatorji na nizkonapetostni strani, prihaja do različnih magnetilnih tokov. Na to razliko vpliva tudi dejstvo, da so bremena na obeh straneh pogosto različna. Do velikih razlik magnetilnih tokov pride lahko pri kratkih stikih izven zaščitnega območja. Da razlike ne prekoračijo vrednosti, ki povzročijo nepotrebno delovanje zaščite, je potrebno posvetiti posebno skrb izbiri transformatorjev za diferenčno zaščito.

4.Diferenčni releji

Diferenčna zaščita naj zajame čim več okvar v transformatorju, po možnosti tudi ovojne stike in stike navitja z ozemljenimi deli. Kot že omenjeno, so diferenčni tokovi pri obeh vrstah okvar lahko dokaj majhni. Poleg tega je želeno, da naj zaščita deluje čim hitreje, da bi bile namreč posledice okvare čim manjše in pa da ne bi delovala istočasno omrežna zaščita, npr. distančna zaščita v drugi stopnji.

Poleg tega, da naj bo diferenčni rele občutljiv na čim nižje diferenečne tokove, je potrebno, da deluje izključno pri okvarah v zaščitenem območju. Delovanje diferenčnega releja pri diferenčnih tokovih, ki jih ne povzroča okvara v transformatorju, preprečujemo z osnovno nastavitvijo in pa s stabilizacijo.

Osnovna nastavitev je običajno nastavljiva od 20 do 40% I_n. Pri tem je važno, da naj bo rele najbolj občutljiv pri že omenjenih okvarah, torej ko je sistem tokov pozitivnega zaporedja tokov enak sistemu negativnega zaporedja, oboje je namreč značilno za ovojni in za zemeljski stik. Manj pa je rele lahko občutljiv pri trifaznih okvarah, saj so v tem primeru diferenčni tokovi itak precej visoki.

V novejših zaščitah uporabljamo za preprečitev neželenih delovanj predvsem stabilizacijo. Pri teh izvedbah je vrednost diferenčnega toka, pri katerem zaščita deluje,

odvisna od velikosti stabilizacijskega toka. Tako je pri višjem stabilizacijskem toku potreben za delovanje tudi višji diferenčni tok.

Glede na vrsto diferenčnih tokov, ki naj ne povzroče delovanje zaščite, uporabljamo tri vrste stabilizacije in sicer stabilizacijo, ki naj prepreči delovanje pri okvarah izven zaščitenega območja, stabilizacijo pri vklopnem pojavu in stabilizacijo pri povišanju napetosti oz. znižanju frekvence. Pri prvi stabilizaciji uporabljamo tokove s primarne in s sekundarne strani, pri drugi in tretji stabilizaciji pa le komponente v diferenčnem toku. Stabilizacijski (vzdrževalni) kot tudi diferenčni (delovni) tokovi se v vseh sodobnih zaščitah pred primerjavo predhodno usmerjajo. Zato bomo obravnavali le take izvedbe.

a. Stabilizacija transformatorja pri okvarah izven zaščitenega območja.

Ta stabilizacija preprečuje delovanje zaradi nepravilne prestave tokovnih transformatorjev, kot tudi zaradi njihovih pogreškov. Stabilizacija se izvaja na tri načine:

1. Stabilizacijski tok je enak aritmetični vsoti primarnega in sekundarnega toka. Zato se vsak tok predhodno usmeri, nato pa se tokova seštejeta (sl. 5.7 a):

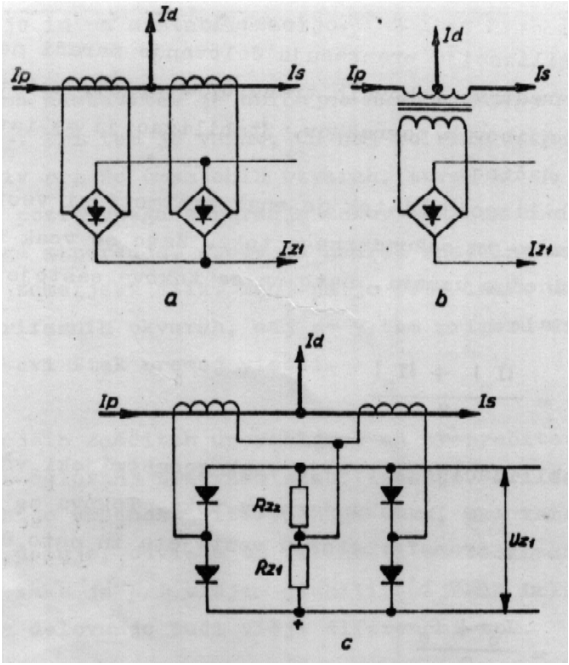
$$I_{zl} = \frac{|I_p| + |I_s|}{2} \tag{5.1}$$

2. Stabilizacijski tok je enak geometrijski vsoti primarnega in sekundarnega toka. Tokova se predhodno v transformatorju seštejeta in nato usmerita (sl. 5.7 b):

$$I_{zl} = \frac{I_p + I_s}{2} \tag{5.2}$$

3. Stabilizacijska napetost U_{zl} je sorazmerna vsoti tokov pozitivne polaritete in tokov negativen polaritete. Stabilizacijsko napetost dobimo na uporih R_{z1} in R_{z2}. Preko upora R_{z1} tečejo tokovi pozitivne polaritete, preko upora R_{z2} pa tokovi negativne polaritete (sl. 5.7 c).

V izvedbah srečamo vse tri načine stabilizacije. Praktično je njihovo delovanje enako pri zunanjih okvarah in okvarah v zaščitenem območju, če se okvara napaja le iz ene strani.



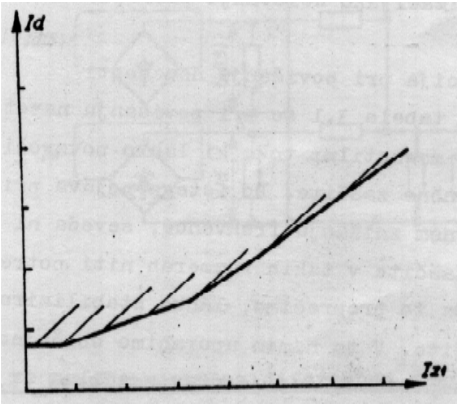
Sl. 5.7

Pri dvostranskem napajanju okvare pa je najboljši 2. način, saj v tem primeru sploh ni stabilizacije. Pomanjkljivost tega načina pa je, da ga ne moremo uporabljati pri transformatorjih s trojnimi navitji.

Pri sodobnih izvedbah se stabilizacijski faktor $I_d : I_{z1}$ spreminja (sl. 5.8). Ker želimo čim večjo občutljivost zaščite pri ovojnem oz. zemeljskem stiku, pogosto v območju $I_1 \leq I_N$ stabilizacije sploh ne uporabimo. V območju $I_N < I_{z1} < 3I_N$ je stabilizacija namenjena za kompenzacijo nepravilne prestave. Pri višjih tokovih pa je faktor stabilizacije višji, saj ej namenjena stabilizacija tudi kompenzaciji pogreškov tokovnih transformatorjev.

Če pa diferenčni tok doseže vrednost, ki je višja kot je tok pri okvari na sekundarni strani transformatorja, seveda stabilizacija ni več potrebna.

Pri tem naj še omenimo, da uporabljamo običajno najvišjo nastavitev stabilizacije pri regulacijskih transformatorjih, kar je vsekakor potrebno zaradi spreminjajočega prestavnega razmerja.



Sl. 5.8

b. Stabilizacija pri vklopnem magnetilnem toku

Pri vklopu transformatorja dobimo diferenčni tok, v katerem so poleg osnovne in enosmerne komponenete tudi izrazite višje harmonske komponente, predvsem druga in tretja (tabela 5.2). Ker nastopa tretja harmonska komponenta pogosto tudi pri okvarah v transformatorju, je za stabilizacijo ne uporabljamo. Sedaj običajno uporabljamo za stabilizacijo le drugo harmonsko komponento, bodisi vse višje harmonske komponente in to z izjemo 3. harmonske. Če naj 2. harmonska komponenta, izluščena iz diferenčnega toka, kompenzira celoten vklopni magnetilni tok, mora biti njeno stabilizacijsko delovanje precej močno.

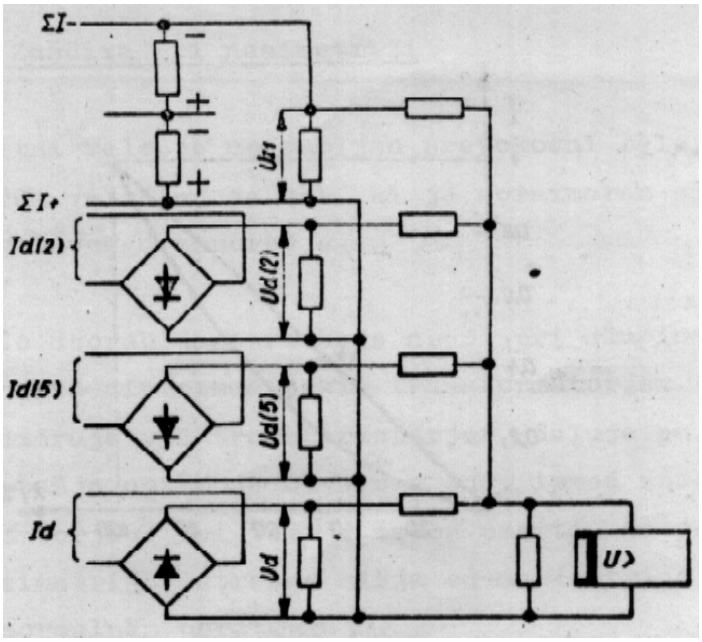
c. Stabilizacija pri povišanju napetosti

Kot sledi iz tabele 3.1 se pri povišanju napetosti močno dvigne magnetilni tok, ki lahko povzroči delovanje diferenčne zaščite. Do istega pojava pride tudi pri občutnem znižanju frekvence, seveda ni poseg diferenčne zaščite v takih razmerah niti potreben, niti željen. Da to preprečimo, lahko stabiliziramo delovanje zaščite. V ta namen uporabimo običajno 5. harmonsko komponento, saj je prav značilna za pojav pri dvigu napetosti.

d. Povezava stabilizacij

Za povezavo stabilizacijskih tokov oz. napetosti z delovnim diferenčnim tokom oz. napetostjo uporabljamo dva načina povezave. Pri tokovnem načinu vežemo vse stabilizacijske tokove paralelno. Zaščita deluje, če je vrednost tokov stabilizacije manjša od vrednosti delovnega diferenčnega toka, zmanjšanega za vrednost osnovne nastavitve.

Pri napetostnem načinu pa seštevamo vse stabilizacijske napetosti. Diferenčni rele deluje, če je njihova napetost manjša od napetosti, ki jo povzroča delovni diferenčni tok na ustreznem uporu, zmanjšano za vrednost osnovne nastavitve. Pogosto pa se oba načina tudi kombinirata (sl. 5.9).

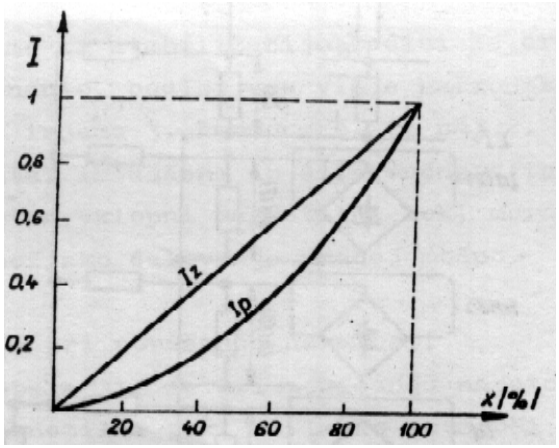


Sl. 5.9

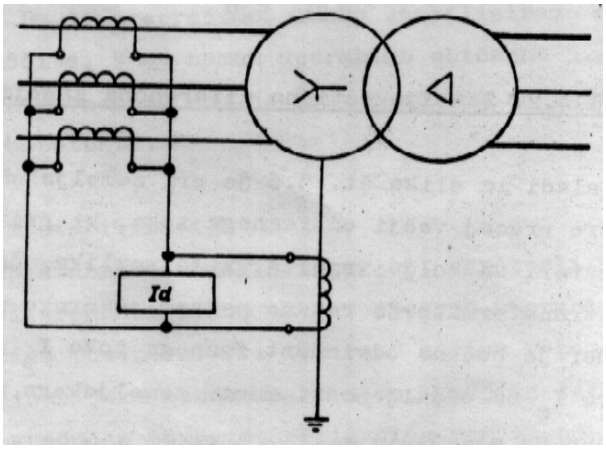
5.3.1.4.2. Zemeljskostična diferenčna zaščita

Kot sledi iz slike št. 5.6 je pri zemeljskem stiku tok okvare precej višji od faznega toka, ki priteka v transformator. Še bolj izrazita pa je razlika, če je zvezdišče transformatorja vezano na zemljo preko upora. Za ta primer je podana odvisnost faznega toka I_p oz. toka okvare I_z od oddaljenosti mesta zemeljskega stika od zvezdišča na sl. 5.10.

Da zajamemo čim več zemeljskih stikov v transformatorju uporabljamo zemeljskostično zaščito, pri kateri povzroča delovanje ravno tok I_z. Rele zemeljskostične zaščite napaja namreč razlika med residualnim tokom iz faznih tokovnih transformatorjev in med tokom, ki teče skozi zvezdišče (sl. 5.11).



Sl. 5.10



Sl. 5.11

Ta zaščita ne deluje pri zunanjih zemeljskih stikih, pri zemeljskih stikih v samem transformatorju pa je bistveno bolj občutljiva od diferenčne zaščite.

5.3.1.5. Zaščita pri nesimetriji

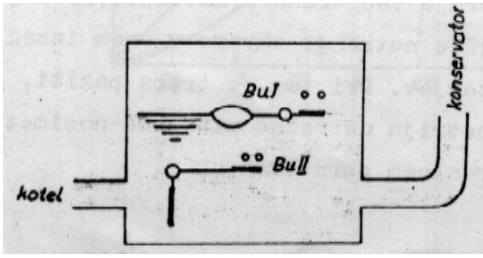
Kot zaščitni rele je uporabljen nadtokovni rele, katerega vhodna veličina je tok, ki je sorazmeren sistemu tokov negativnega zaporedja. To zaščito uporabljamo redkeje npr. pri skupinski zaščiti manjših distribucijskih transformatorjev. Ta zaščita nadzoruje več transformatorjev, deluje pa, če pride do težje notranje okvare v enem izmed zaščitnih transformatorjev. Pri tem je treba paziti, da je nastavljena nesimetrija ustrezno nižja od nesimetrije, ki nastopa v normalnem obratovanju.

5.3.2. Zaščitni neelektrični releji

Pri zaščiti transformatorja pri notranjih okvarah uporabljamo dve vrsti neelektričnih relejev. Ti delujejo pri razvijanju plina v transformatorju in jih imenujemo včasih tudi plinski releji. Pri transformatorjih s konservatorjem uporabljamo Buchholzove releje. Pri transformatorjih, ki pa niso opremljeni s konservatorjem (v ta nemen služi blazina inertnega plina, ki je v kotlu nad oljem), pa uporabljamo releje, ki delujejo, če naraste pritisk preko nastavljene vrednosti, ali pa delujejo na spremembo pritiska v kotlu. Ker se te zaščite v glavnem v Evropi ne uporabljajo, bomo uporabljali le Buchholzov rele.

5.3.2.1. Buchholzov rele

Na zamisel izkoriščati nastajanje plinov pri okvarah v samem transformatorju je prišel nemški strokovnjak M.Buchholz. V cev, ki povezuje kotel z konservatorjem, je vgradil mehanski rele, ki nosi njegovo ime. Rele ima običajno dva stikalna elementa (sl. 5.12).



Sl. 5.12

Prvi je vezan na plavač in se sklene, če v releju nabrani plini zavzamejo prostornino, ki je večja od nastavljene vrednosti. Ta je od 0,1 do 0,5 dm^3, odvisno od velikosti transformatorja. Če je okvara večja, pride zaradi intenzivnega ustvarjanja plinov v transformatorju do močnega pretoka olja skozi rele. Hitrost olja kontrolira drugi stikalni element, vezan na loputo. Če je hitrost olja večja od nastavljene vrednosti (75 do 120 cm/s), rele deluje. Prvi kontakt označujemo običajno z Bu I, deluje pa na opozorilo. Drugi kontakt, ki ga označujemo z Bu II, pa deluje na izklop transformatorja.

Pri delovanju Bu I je priporočljivo analizirati strukturo izločenih plinov, prav tako pa je priporočljivo analizirati istočasno tudi v olju raztopljene pline in to s plinskim kromatografom. Iz primerjave obeh analiz lahko dokaj sigurno sklepamo na vzrok delovanja. Če sumimo, da je okvara v transformatorju, je potrebno opravljati pogostejše analize olja. Iz tega lahko sklepamo na intenzivnost ev. okvare in na tej osnovi še pravočasno izločimo transformator iz obratovanja.

Z Buchholzovimi releji opremljamo praktično vse transformatorje s konservatorjem in to od distribucijskih moči nekaj sto kVA do največjih enot. Pomanjkljivost te zaščite pa je, da deluje Bu II sorazmerno počasi, povprečni čas je ca 0,2 s, najhitreje pa deluje v času ca 0,09 s. Zato obstoja nevarnost, da deluje prej distančna zaščita vodov v svoji drugi stopnji, kar nikakor ni želeno.

Naj omenimo, da Buchholz rele deluje tudi pri močnejših vibracijah in sunkih in zato tudi pri močnejših potresih.

5.4. PREVENTIVNE IN REZERVNE ZAŠČITE TRANSFORMATORJA

Naloga preventivnih zaščit transformatorja je preprečevanje njegovega prehitrega staranja in pa preprečevanje razmer, ki lahko privedejo do okvare v njem. Te zaščite imajo pogosto dve stopnji, v prvi stopnji delujejo na opozorilo, v drugi pa na izklop.

Rezervne zaščite delujejo pri okvarah v samem transformatorju, delujejo pa tudi pri okvarah izven transformatorja, če iz določenih vzrokov ni prišlo do delovanja glavne zaščite. Ker so preventivne in rezervne zaščite pogosto med seboj povezane, jih bomo obravnavali skupno.

Preventivne in rezervne zaščite delimo glede na karakteristično veličino v štiri skupine, na zaščite, pri katerih je karakteristična veličina temperatura, tok, distanca oz. magnetni fluks.

5.4.1. Zaščite, ki delujejo na osnovi temperature

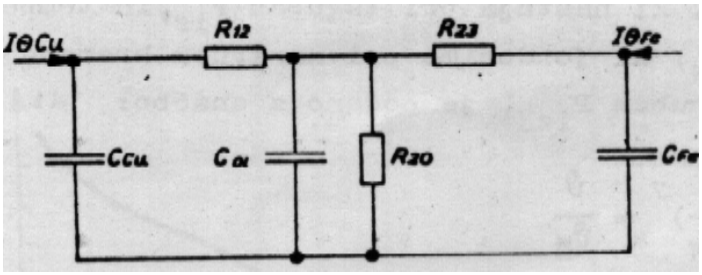
5.4.1.1. Toplotne razmere v transformatorju

Življenjska doba transformatorja je predvsem odvisna od temperature navitja, pri čemer igra važno vlogo pri staranju celuloznih izolacijskih snovi tudi vlaga v njih. Na

staranje olja v transformatorju pa vpliva temperatura, novejše raziskave pa so dokazale, da pomembno vplivata na njegovo življenjsko dobo tudi vlaga in kisik v njem.

Za zaščito je važna predvsem temperatura olja na najtoplejšem delu, ki jo lahko merimo tudi v obratovanju. Važna je tudi povprečna temperatura navitja, ki pa jo lahko merimo le v izklopnem stanju in pa najvišja temperatura navitja, ki pa jo lahko le ocenjujemo.

Za vpogled v toplotne razmere v transformatorju so potrebne običajno številne poenostavitve. Transformator je namreč grajen iz velikega števila teles. Običajno si transformator predstavimo kot skupek določenega števila homogenih teles z veliko notranjo temperaturno prevodnostjo. Za osnovna razmišljanja zadošča, če si predstavimo transformator kot skupek treh teles in sicer navitja, olja in jedra. Za tak poenostavljen primer dobimo nadomestno toplotno shemo na sl. 5.13.



Sl. 5.13

V vezje prihajata dva toplotna tokova, tok $I_{\Theta Cu}$ predstavljajo izgube v navitju, tok $I_{\Theta Fe}$ pa izgube v jedru. Pri nazivnem toku so izgube v navitju od 4 do 6 krat večje od izgub pri nazivni napetosti v jedru, le pri generatroskih transformatrojih pade to razmerje tudi do 2,6.

V nadomestni shemi predstavlja R_{12} toplotno upornost med navitjem in oljem, R_{23} toplotno upornost med jedrom in oljem ter R_{20} toplotno upornost med oljem in okolico. Ker je upornost R_{23} običajno nizka, jo pogosto zanemarjamo in s tem dobimo le problem skupka dveh teles, navitja in olja z jedrom.

Iz nadomestne sheme lahko v stacionarnem stanju dobimo iz podanih izgub P_{Cu} in P_{Fe} in pri podanih upornostih R_{12} in R_{20} temperaturo na najtoplejšem delu navitja in temperaturo najtoplejšega olja. Vendar pa je potrebno upoštevati, da sta obe toplotni upornosti odvisni od temperaturnih razlik med navitjem in oljem oz. med oljem in okolico. Razmerje med temperaturno razliko ϑ, ki nastaja pri izgubah P_{iz} in temperaturno razliko ϑ_N, ki jo dobimo pri nazivnem bremenu oz. nazivnih izgubah P_{izN}, je podana z enačbo:

$$\left(\frac{P_{iz}}{P_{izN}}\right)^{y} = \frac{\vartheta}{\vartheta_N} \tag{5.3}$$

Eksponent y je za prehod olje – okolica pri transformatorjih s prisilno oljno cirkulacijo ca 0,9, pri transformatorjih s prigrajenimi ventilatorji je 0,8, pri transformatorjih z naravnim hlajenjem pa le 0,7, pri prehodu navitje – olje pa je y običajno 0,8.

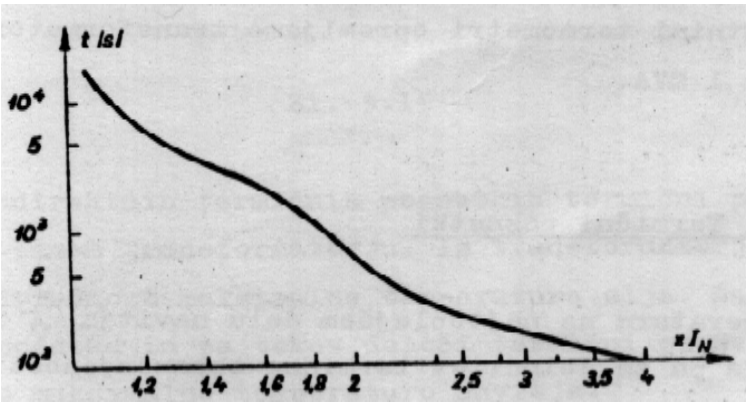
Zaradi eksponenta y oz. zaadi nelinearnosti toplotnih upornosti dobimo pri izgubah, ki so nižje od nazivnih, višje temperature, kot bi jih dobili, če bi bile upornosti linearne. Pri izgubah, ki pa so višje od nazivnih, pa so te temperature nekoliko nižje.

Pri dejanskih razmerah pa moramo upoštevati, da se spreminjajo tako obremenitve kot tudi okoliške temperature. Pri zasledovanju nestacionarnih stanj pa moramo upoštevati še toplotno kapacitivnost navitja C_{Cu}, jedra C_{Fe} in olja C_{Ol}. Namesto teh kapacitivnosti običajno podajamo dve časovni konstanti in sicer časovno konstanto navitje – olje: $T_1 = R_{12} * C_{Cu}$, ki je običajno 5 do 7 minut in pa časovno konstanto (olje + jedro) – okolica:

$$T_2 = R_{20}(C_{01} + C_{Fe}) \tag{5.4}$$

Vrednost te konstante pa je od 2 do 6 ur.

V diagramu na sl. 5.14 je prikazano trajanje preobremenitve v odvisnosti od velikosti obremenitve, če naj



Sl. 5.14

bi v prej neobremenjenem transformatorju dosegel najtoplejši del navitja svojo nazivno temperaturo.

Za zaščito pred termičnimi preobremenitvami uporabljamo dve zaščiti, namreč zaščito, vezano na temperaturo olja, in pa zaščito, ki naj deluje pri prekoračitvah temperature najtoplejšega dela navitja.

5.4.1.2. Termična zaščita olja

V ta namen uporabljamo kontaktne termometre, ki so nameščeni na samem transformatorju in kažejo temperaturo najtoplejšega olja. Poleg tega pa imajo tudi kazalce s kontakti, ki se sklenejo, če temperatura olja doseže nastavljeno vrednosti. Te kontakte uporabljamo tudi za vklop ventilatorjev oz. črpalk in to pri temperaturi od 45° do 65°C. Če temperatura prekorači nazivno vrednost, se vključi opozorilo, v kolikor pa prekorači neko mejno vrednost, pa deluje zaščita na izklop.

S kontaktnimi termometri opremljamo transformatorje moči iznad 1 MVA.

5.4.1.3. Termični posnetki

Ker temperatura na najtoplejšem delu navitja ni izmerljiva, je pa za določitev termične obremenjenosti transformatorja bistvena, uporabljamo termične posnetke. Obstojata dve izvedbi termičnih posnetkov in sicer direktni in pa indirektni.

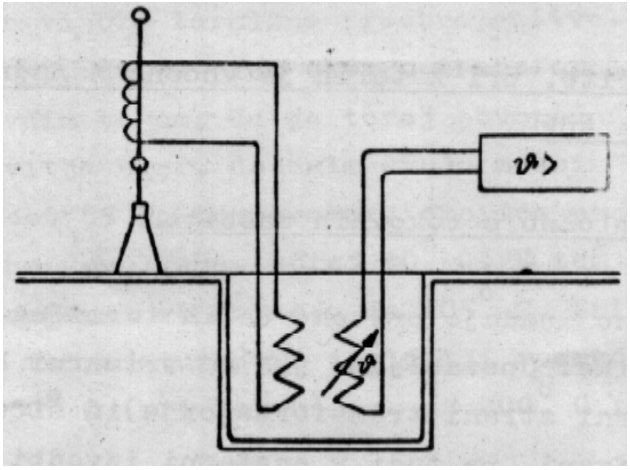
Pri direktnih termičnih posnetkih imamo v posebnem žepu na transformatorju vgrajeno sondo z grelcem, ki je napajan preko tokovnega transformatorja. Poleg tega je v sondi še termični upor oz. termobimetal, na katerega je vezana zaščita (sl. 5.15).

Grelno navitje ima proti olju v termičnem posnetku stalno časovno konstanto T_1. Nastavljiva pa je vrednost nadtemperature najtoplejšega dela navitja pri nazivni obremenitvi in pa vrednost temperature, pri kateri naj zaščita deluje.

Pri indirektnih termičnih posnetkih termični posnetek ni na samem transformatorju. Iz transformatorja dobiva le vrednost maksimalne temperature olja. Na osnovi tega podatka in pa tokov določi termični posnetek predvideno maksimalno temperaturo navitja.

Termični posnetki imajo predvidene običajno tudi kontakte za vklop in izklop hladilnih naprav, omogočajo pa tudi meritev te navidezne temperature. Lahko pa jih opremimo tudi s temperaturno-časovnimi integratorji, ki omogočajo ugotoviti trajanje, ko je bila temperatura v nastavljenem območju npr. med 100 in 110°C, med 110 in 120°C,

med 120 in 130°C pa preko. Na tej osnovi lahko grobo ocenimo tudi iztrošenost transformatorja.



Sl. 5.15

5.4.2. Zaščite, pri katerih je vhodna napajalna veličina tok

5.4.2.1. Splošno o tokovnih zaščitah

V to skupino spadajo nadtokovne in termične zaščite ter varovalke. Uporabljamo jih na primarni kot tudi na sekundarni strani transformatorja in sicer v trifazni, dvofazni, pa tudi v enofazni izvedbi (npr. pri termorelejih).

Te zaščite delujejo pri preobremenitvah, pri okvarah v transformatorju oz. na dovodih pa delujejo kot rezervna zaščita. Pri manjših transformatorjih prevzamejo včasih tudi vlogo glavne zaščite, predvsem pri okvarah na dovodih do transformatorja. Poleg tega delujejo tudi pri okvarah izven transformatorja in to običajno kot rezervne zaščite. Le v kolikor ni na sekundarni strani zaščite zbiralk, prevzamejo pri okvarah na zbiralkah tudi vlogo glavne zaščite.

Nadtokovne in termične zaščite kot tudi zaščite z varovalkami se med seboj precej razlikujejo predvsem v odvisnosti časa delovanja od tokov. Ker te zaščite delujejo le na osnovi tokov, pri čemer pri nazivnih vrednostih tokov nikakor ne smejo pričeti delovati, prihaja lahko do manjših termičnih preobremenitev navitja in to preden zaščita deluje.

5.4.2.2. Kratek stik pri transformatorju

Pri kratkih stikih na sekundarni strani transformatorja dopuščamo visoke termične preobremenitve. Obstoja namreč možnost, da je pred okvaro transformator segret z nazivnim tokom, da je torej povprečna nadtemperatura navitja npr. dosegla svojo maksimalno dopuščeno vrednost 65 K, temperatura okolice pa naj bo tudi maksimalno dovoljena, torej 40°C. V tem primeru je povprečna temperatura navitja že 105°C. Pri kratkem stiku se ta temperatura pri izolaciji razreda A lahko dvigne na 250°C (pri bakru) oz. na 200°C (pri aluminiju).

Pri izračunu dopuščenega trajanja kratkega stika predpostavljamo, da se vse izgube v navitju porabijo za njegovo segrevanje. V tem primeru je temperatura navitja, segretega pred okvaro na ϑ_o °C, po času trajanja kratkega stika t podana z enačbo

$$\vartheta_g = \vartheta_0 + aJ_k^2 t \tag{5.5}$$

J_k je gostota toka pri kratkem stiku (A/mm^2), a pa je faktor, ki je odvisen od povprečne vrednosti temperature $(\vartheta_g+\vartheta_o):2$. Njegova vrednost je podana za baker v tabeli 5.3. (L.39).

Tabela 5.3

$(\vartheta_g+\vartheta_o):2$	140	160	180	200	220	240
a	7,41	7,80	8,20	0,59	8,99	9,36

Po že omenjeni publikaciji ..... morajo biti transformatoji grajeni tako, da v že omenjenih razmerah zdrže kratki stik v času dveh sekund, če je napetost kratkega stika u_k manjša od 5%, če pa je 5% ali večja, mora transformator zdržati vsaj 3 sekunde.

5.4.2.3. Nadtokovni releji

Te releje uporabljamo predvsem kot zaščito pri kratkih stikih, redkeje kot zaščito pri preobremenitvah. Pri vseh transformatorjih, ki so priključeni na visoko napetost, uporabljamo pri nas trifazno zaščito na primarnem in na sekundarnem navitju. Pri razdelilnih transformatorjih med dvema napetostma srednjega nivoja (npr. 35/10 kV) pa uporabljamo tudi dvofazne zaščite in včasih tudi le na eni strani transformatorja.

Pri nas uporabljamo predvsem nadtokovne, časovno neodvisne releje, le redko pa časovno odvisne releje. Pri tem uporabljamo le pri manjših distribucijskih transformatorjih primarne releje, ki ne potrebujejo tokovnih transformatorjev, drugod pa skoraj izključno uporabljamo le sekundarne tokovne zaščite, ki se napajajo preko tokovnih transformatorjev. Zato primarnih relejev ne bomo obravnavali podrobneje.

Za vse nadtokovne releje je značilno, da pri svojem delovanju ne upoštevajo obremenitev transformatorja pred nastopom preobremenitve.

1. Nadtokovno, časovno neodvisni releji

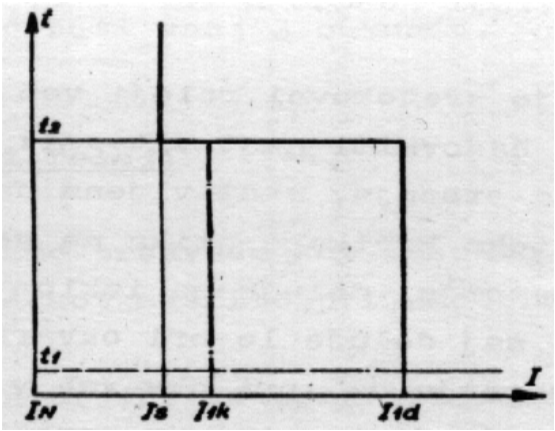
Pri nastavitvah relejev moramo upoštevati nastavitve zaščit omrežja na primarni in na sekundarni strani, kot tudi najvišji dopuščeni čas trajanja kratkega stika.

Običajno imajo nadtokovni releji več tokovnih območij z različnimi časovnimi nastavitvami:

a. Nadtokovna stopnja, nastavljena na vrednost, ki je višja od toka kratkega stika na sekundarni strani transformatorja, deluje na izklop brez časovne zakasnitve, saj deluje le pri okvarah na dovodih do transformatorja oz. pri okvarah v samem transformatorju. Seveda je ta stopnja nameščena le na primarni strani.

b. Nadtokovna stopnja, nastavljena na vrednost I_s, s katero lahko v stiski transformator trajno obremenjujemo, seveda na račun njegove življenjske dobe. To vrednost lahko tudi spreminjamo, odvisno na letni čas in kraj npr. 1,25 I_N. Pri prekoračitvi te vrednosti je potrebno ukrepanje in sicer je ukrepanje prepuščeno bodisi operaterju bodisi avtomatiki. Če preobremenitev ostane, deluje zaščita na izklop in to po časovni zakasnitvi t_2 – nekaj minut in več (v Franciji za interkonekcijske transformatorje 20 minut). Delovanje te stopnje se lahko poveže tudi z delovanjem kontaktnih termometrov. V kolikor temperatura olja ϑ_d doseže neko nastavljeno vrednost ϑ_m, se delovanje skrajša na t_1 – vrednost zakasnitve naslednje stopnje.

c. Nadtokovna stopnja, nastavljena na I_{ld} (1,5 do 2 I_N), ki deluje po krajši časovni zakasnitvi t_1 (nekaj sekund) na izklop. Seveda mora biti čas izklopa enak ali pa krajši od dopuščenega trajanja kratkega stika t_k (slika 5.16).



Sl. 5.16

2. Nadtokovni, časovno odvisni releji

Za zaščito transformatorja se uporabljajo predvsem releji z ekstremno inverzno karakteristiko, ki poteka podobno, kot krivulja dopuščene preobremenitve transformatorja. Te zaščite uporabljamo pri nas redko.

5.4.2.4. Termični releji

Prednost teh relejev pred nadtokovnimi releji je, da upoštevajo predhodno obremenitev transformatorja in pa da dopuščajo trajanje preobremenitve, ki je odvisna od njene vrednosti. Kot je potrebno pri transformatorju upoštevati dve časovni konstanti, imajo običajno tudi termični releji dve konstanti npr. T_1=100 minut in T_2=10 minut. Seveda morajo biti konstante releja manjše od konstant transformatorja.

5.4.2.5. Varovalke

Manjši tokovni transformatorji so pogosto opremljeni z varovalkami in to na primarni strani in na sekundarni strani, ki varujejo transformator le pri kratkih stikih. Z uporabo varovalk na primarni strani odpade potreba po odklopniku na primarni strani, saj v tem primeru lahko njegovo vlogo prevzamejo močnostne ločilke. Seveda pa moramo biti pri izbiri varovalk previdni. Paziti moramo, da varovalke ne pregorijo pri vklopnem

toku transformatorja oz. pri kratkotrajnih preobremenitvah, npr. pri preobremenitvah po krajših izpadih oz. znižanjih napetosti.

Pri zaščiti transformatorjev moči do 1 MVA pri nas zelo pogosto uporabljamo izvedbo po zamisli prof. A.Čebulja (L.11). Transformator je na primarni visokonapetostni strani zaščiten z varovalkami, vgrajenimi v odklopni ločilnik. Na sekundarni nizkonapetostni strani pa je transformator zaščiten s trifaznim bimetalnim relejem, ki deluje na izklop ločilk.

5.4.3. Distančna zaščita

Glede na zahteve po selektivnem delovanju celotne zaščite prenosnega sistema je včasih potrebno, da opremimo tudi transformatorje z distančno zaščito. V prvi stopnji izklopi distančni rele transformator le pri večjih okvarah v transformatorju in na dovodih, ne deluje pa pri večjih okvarah v omrežju na sekundarni strani transformatorja.

V drugi stopnji pa je predvideno, da deluje v drugi smeri, da namreč deluje pri okvarah na zbiralnicah primarne strani. Če želimo, da transformator izključimo z distančno zaščito v drugi stopnji pri okvarah na zbiralnicah na primarni in na sekundarni strani,l moramo uporabiti seveda dva distančna releja.

5.4.4. Zaščita pri prekomerni gostoti magnetnega fluksa

Pri dalj časa trajajočem povišanju kvocienta med napetostjo in pa frekvenco prihaja lahko do poškodb v transformatorju. Nasičenje na določenih mestih jedra nastopi namreč že občutno prej, kot se nasiti normalni prerez jedra. Taka mesta so predvsem zožitve magnetne poti pri svornikih. Posledica ev. nasičenja na tem mestu je, da lahko teče sorazmerno močan magnetni nadtok tudi po svorniku. Posledica tega je močno segrevanje svornikov, kar lahko povzroči poškodbo izolacije med svornikom in paketom. V tem primeru pride do visokih kratkostičnih tokov v jedru.

Da do te okvare ne pride, uporabljamo pri velikih prenosnih in generatorskih transformatorjih posebno zaščito, ki pri prekoračitvi nastavljenega kvocienta med napetostjo in frekvenco deluje po časovni zakasnitvi na izklop (L.14).