



KONFIGURISANJE I TESTIRANJE DIFERENCIJALNE ZAŠTITE TRONAMOTAJNIH ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

CONFIGURATION AND TESTING OF DIFFERENTIAL PROTECTION FOR THREE WINDING POWER TRANSFORMERS

Nemanja Milovanović, Zoran Stojanović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U radu su dati osnovni principi rada relejne zaštite. Navedene su osnovne zaštite koje se koriste za štićenje energetskih transformatora i opisan princip diferencijalne zaštite. Zatim je detaljno objašnjena funkcija diferencijalne zaštite za korišćeni mikroprocesorski relaj i odgovarajući softver. Praktičnim radom, ispitani su najbitniji aspekti diferencijalne zaštite relaja pomoću testnog alata i izvršena analiza povratnih informacija iz relaja i testnog alata.

Ključne reči: Relejna zaštita, Mikroprocesorski relaj, Energetski transformator, Diferencijalna zaštita

Abstract – This document presents the basic principles of relay protection. The basic protection functions used in the protection of power transformers were listed and the principle of differential protection was described. The function of differential protection for the used microprocessor relay and corresponding software were explained in detail. By practical work, the most important aspects of differential protection were tested using a test set and analysis of results from the relay and test set were performed.

Keywords: Relay protection, Microprocessor relay, Power transformer, Differential protection

1. UVOD

Navedena tema master rada pripada oblasti relejne zaštite pod čijim pojmom se podrazumeva skup zaštitnih uređaja i postupaka za štićenje elemenata i elektroenergetskog sistema u celini. Osnovni cilj primene relejne zaštite je najbrže moguće isključenje elemenata i ili dela elektroenergetskog sistema sa kvarom uz očuvanje funkcionalnosti ostalog dela sistema.

Relejna zaštita predstavlja složen sistem, sastavljen od strujnih i naponskih transformatora, sekundarnih strujnih krugova između sekundara strujnih i naponskih transformatora i zaštitnih uređaja, samih uređaja relejne zaštite i prekidača koji prekidaju strujni krug u kvaru (prema nalogu relaja). Ovaj složen sistem treba ispravno i neprekidno da funkcioniše da bi osigurao nesmetan i kontinualan rad elektroenergetskog sistema u celini i isporuku električne energije od proizvođača, preko prenosnog i distributivnog sistema do krajnjeg potrošača.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Zoran Stojanović, van. prof.

Istorijски gledano, postoje tri generacije zaštitnih relaja:

- elektromehanički relaj,
- statički relaj,
- numerički relaj.

Numerički relaji bazirani su na primeni mikroprocesora i softvera koji zamenuje osnovne principe delovanja relejne zaštite. Odlikuju se vrlo malom potrošnjom i velikom brzinom rada. U jednoj fizički samostalnoj jedinici poseduju više zaštitnih funkcija (više relajnih zaštita objedinjeno u jednoj jedinici) [1].

2. ZAŠTITA TRANSFORMATORA

Energetski transformator je sveprisutan element rasklopnih postrojenja, trafostanica i elektrana elektroenergetskog sistema na svim naponskim nivoima. On ima vitalnu funkciju u elektroenergetskom sistemu i predstavlja vrlo skup pojedinačni element. Stoga njegova efikasna zaštita od mogućih kvarova predstavlja važnu komponentu u celokupnom sistemu relejne zaštite elektroenergetskog sistema.

Izolacija energetskih transformatora u pogonu je izložena, osim pogonskog napona, delovanju privremenih, sklopnih i atmosferskih prenapona. Takođe je izložena procesu neprekidnog starenja, te mehaničkim naprezanjima do kojih dolazi usled dinamičkih sila u uslovima nastanka kratkih spojeva. Stoga u pogonu energetskih transformatora treba računati na mogućnost nastanka kvarova. Mogući kvarovi energetskog transformatora jesu:

- međufazni kratki spojevi u transformatoru ili na njegovim izvodima,
- kratki spojevi između zavoja iste faze,
- kratki spojevi sa zemljom namota transformatora ili njegovih izvoda.

U pogonu su najčešći preskoci na izvodima transformatora i spojevi među zavojima iste faze. Ovi kratki spojevi su uzrokovani veoma naglim prenaponskim udarima. Česti su takođe i preskoci ili proboji prema uzemljenim delovima energetskog transformatora. Kao zaštita od navedenih kvarova energetskih transformatora mogu se upotrebiti sledeće zaštite:

- diferencijalna zaštita,
- Buholc relaj,
- zemljospojna zaštita,
- prekostrujna zaštita,
- distantna zaštita.

Osim navedenih kvarova, u pogonu se još javljaju i razna opasna/abnormalna stanja. To je u prvom redu preopterećenje transformatora do kojeg može doći usled ispada drugog transformatora ili vodova koji paralelno napajaju isto potrošačko područje.

Znatno opasnije su struje kratkog spoja koje teku kroz energetski transformator usled kvarova u napajanoj mreži (nije kvar u samom transformatoru). Kod ovih opasnih stanja zahteva se da zaštita energetskog transformatora (ali ne diferencijalna) signalizira kvar i isključi energetski transformator pre nego što dođe do njegovog kvara ili do znatnog sniženja trajanja života izolacije transformatora. Trajanje izolacije usko je povezano sa radnom temperaturom kojoj je izložena pri eksploraciji transformatora i obrnuto je proporcionalna s povećanjem radne temperature. Stoga je potrebno ne izlagati izolaciju transformatora povećanim topotnim naprezanjima.

Upravo ovakva topotna naprezanja izolacije transformatora posledica su velikih struja kvara (Džulovi gubici u namotajima) koje prolaze kroz transformator pri napajanju kvara na nekom od njegovih izvoda u napajanoj mreži [1].

Za zaštitu od nedozvoljenih stanja preopterećenja energetskog transformatora najčešće se primenjuje termička zaštita. Za zaštitu energetskog transformatora od struja spoljašnjih kratkih spojeva (kvarovi izvan, ali u blizini energetskog transformatora) najčešće se primenjuje:

- prekostrujna zaštita (sa strujno nezavisnom vremenskom karakteristikom),
- distantna zaštita.

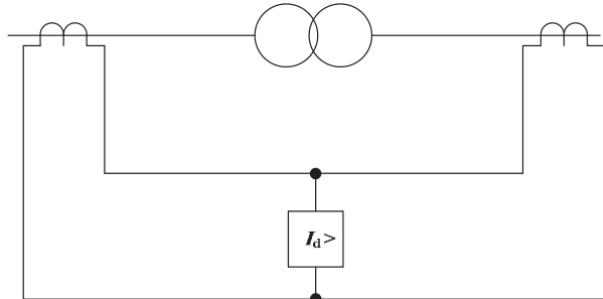
Treba naglasiti da je diferencijalna zaštita ujedno i osnovna relejna zaštita energetskog transformatora dok su ostale navedene zaštite rezervne i/ili dopunske zaštite. Prilikom primene diferencijalne zaštite energetskih transformatora, između ostalog, treba voditi računa i o sledećim osobinama:

- prenosom odnosu, spoju namotaja i načinu uzemljenja,
- struji magnećenja energetskog transformatora,
- različitim naponskim nivoima primarne i sekundarne (i tercijarne) strane energetskog transformatora, zbog čega se moraju koristiti strujni transformatori različitih prenosnih odnosa i karakteristika,
- faznom pomeraju između struja i napona između primarne i sekundarne (i tercijarne) strane energetskih transformatora grupu spoja zvezda – trougao (tj. treba voditi računa o vektorskoj grupi transformatora),
- regulaciji napona na visokonaponskom namotaju energetskog transformatora,
- faznim pomerajima i regulaciji napona kod regulacionih transformatora.

2.1. Diferencijalna zaštita

Diferencijalni sistem se pravi tako da pokrije čitav transformator. To je moguće izvršiti iz razloga veoma visoke efikasnosti rada transformatora i jednakosti odnosa struje i navojaka (N^*I) na primarnom i sekundarnom namotaju. Strujni transformatori na primarnoj i sekundarnoj strani energetskog transformatora povezani su tako da se napravi sistem cirkulacione struje. Ti strujni transformatori ujedno određuju zonu diferencijalne zaštite [2].

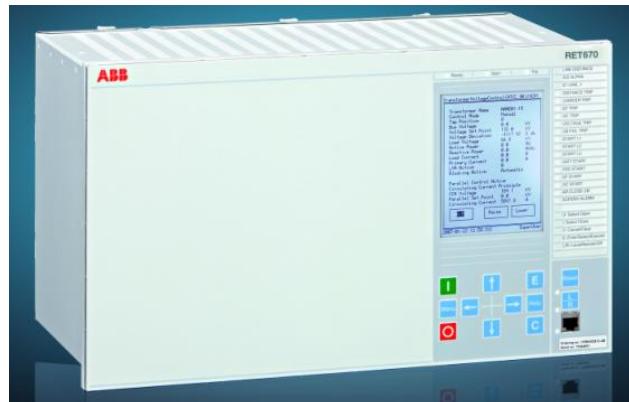
Na slici 1 prikazan je ovaj princip.



Slika 1. Princip transformatorske diferencijalne zaštite

3. RELEJ ABB RET 670

Relej ABB RET 670 obezbeđuje brzu i selektivnu zaštitu, praćenje i upravljanje za dvonamotajne i tronamotajne transformatore, autotransformatore i otočne prigušnice. RET 670 ima vrlo malo zahteva za strujne transformatore, međutransformatori nisu potrebni. Za diferencijalnu zaštitu je obezbeđena blokada na drugi harmonik i blokada na prepoznavanje talasnog oblika da bi se izbegla prorada usled udarne struje i blokada na peti harmonik da bi se izbegla prorada usled prepobuđenosti. Izgled releja dat je na slici 2.



Slika 2. Izgled releja RET 670 novije serije

Konfigurisanje releja, podešavanje zaštitnih funkcija, nadzor i upravljanje uređaja vrši se preko softvera PCM600 u okviru koga imamo veoma širok opseg funkcija i podešenja. Za nadzor i podešavanje releja može se koristiti i LHMI (Local Human Machine Interface) uređaja. LHMI obuhvata ekran, led sijalice koje služe kao indikatori različitih stanja, portove za komunikaciju i određene tastere.

3.1. Transformatorska diferencijalna zaštita T2WPDIF i T3WPDIF

Funkcije transformatorske diferencijalne zaštite, dvonamotajne (T2WPDIF) i tronamotajne (T3WPDIF) obezbeđene su interna sa korekcijom odnosa strujnih transformatora, kompenzacijom vektorske grupe i eliminacijom nulte komponente struje, u softveru.

Mogućnost podešenja aplikacije pokriva primenu diferencijalne zaštite na sve tipove energetskih transformatora i autotransformatora sa ili bez regulacione sklopke, kao i za odvodnike prenapona ili lokalne izvode u okviru trafo-stанице. Prilagodiva karakteristika stabilizacione struje je sadržana u zaštiti za slučaj velikih kvarova van štićene zone. Uključujući poziciju regulacione sklopke, pobuda diferencijalne zaštite može se podesiti na optimalnu osetljivost čime se pokrivaju kvarovi unutar zone i kada su

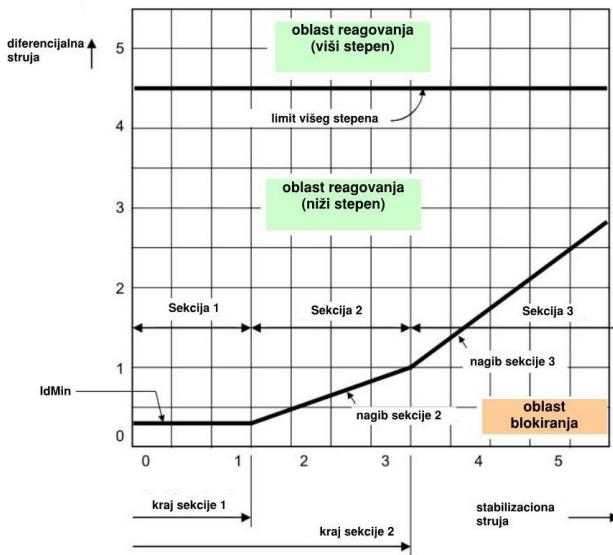
oni niskog nivoa. Stabilizacija zaštite postoji i za slučaj udarnih struja, odnosno za prepobuđenost. Prilagodiva stabilizacija je uključena i za udarne struje usled poremećaja u sistemu i usled zasićenosti strujnih transformatora kod spoljašnjih kvarova. Viši stepen diferencijalne zaštite postoji u slučaju velikih unutrašnjih kvarova kako bi zaštita veoma brzo odradila. Karakteristika osetljive diferencijalne zaštite, zasnovana na teoriji simetričnih komponenti, nudi najbolju moguću pokrivenost u slučaju međuzavojnih kvarova kod energetskog transformatora [3].

3.2. Niži i viši stepen diferencijalne zaštite

Diferencijalna zaštita energetskog transformatora koristi dva limita sa kojima se trenutne vrednosti 3 diferencijalne struje prvog harmonika porede u svakom izvršenju funkcije.

Viši stepen (ne zavisi od stabilizacione struje, trenutni) diferencijalne zaštite se koristi za vrlo velike diferencijalne struje koji, bez sumnje, znači da je kvar unutar štićene zone. Ovaj podesivi limit je konstantan (nije proporcionalan stabilizacionoj struci). Na njega ne utiču harmonijske, ni bilo koje druge interne blokade, tako da je njemu dozvoljeno da odmah da komandu za proradu zaštite.

Niži stepen (zavisan od stabilizacione struje) diferencijalne zaštite poredi proračunate diferencijalne struje i stabilizacione struje tako što ih postavlja na diferencijalno-stabilizacionu karakteristiku. Praktično, amplitude svake pojedinačne diferencijalne struje prvog harmonika porede se sa prilagodljivim limitom. Ovaj limit je prilagodljiv zato što je zavisan od amplitude stabilizacione struje. Ovaj limit se zove diferencijalno-stabilizaciona karakteristika (kriva). Karakteristika ima u principu 3 sekcije sa različitom proporcionalnošću proradne (diferencijalne) struje u odnosu na stabilizacionu struju i prikazana je na slici 3.



Slika 3. Opis karakteristika nižeg i višeg stepena zaštite

Pored nižeg i višeg stepena diferencijalne zaštite, u radu su opisane i ostale podfunkcije diferencijalne zaštite ovog mikroprocesorskog releja, a to su: automatska kompenzacija za poziciju regulacione sklopke, alarm diferencijalne struje, eliminacija nulte komponente, unutrašnji / spoljašnji diksriminator kvara, viši stepen diferencijalne

zaštite inverzne komponente struja, međuzavojna zaštita bazirana na osjetljivoj zaštiti inverzne komponente, harmonijska blokada, blokada talasnog oblika, unakrsno blokiranje između faza, uključenje transformatora pri kvaru i detekcija otvorenog strujnog transformatora.

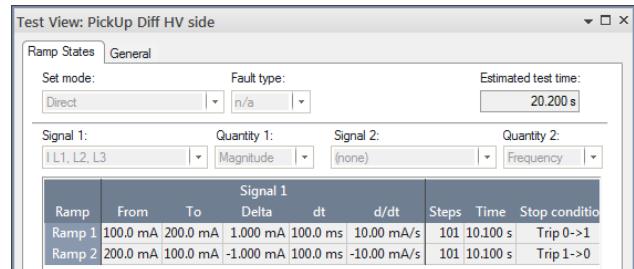
4. TESTIRANJE RADA RELEJA I NJEGOVIH ZAŠTITA

Ožičenje releja, pravljenje neophodne konfiguracije u softveru PCM600 (kroz alate *Application Configuration*, *Parameter Setting*, *Signal Matrix*) i ispitivanje njegovog rada izvršeno je u firmi „Albo Energy doo“ u Novom Sadu. Testiranje je izvršeno pomoću trofazne ispitne kutije, proizvođača Omicron, marke CMC356, koja ima mogućnost davanja istovremeno 6 struja različitih amplituda i faznih stavova. Takođe, kutija ima 10 digitalnih ulaza koji se koriste da bi primili digitalne informacije, najčešće od uređaja koji se testira.

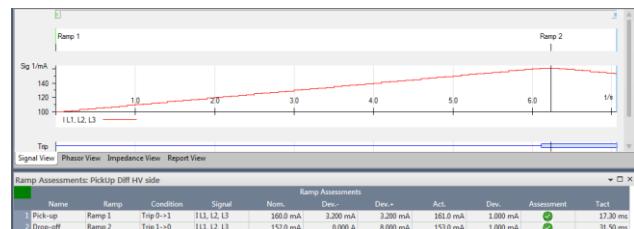
4.1. Test pobude diferencijalne zaštite (pick-up)

Ovim testom otkrivamo kolika je minimalna struja potrebna da bi odradila diferencijalna zaštita ako se struja dovodi na samo jedan namotaj transformatora, dok je na ostalim namotajima struja 0.

Test je prikazan na slikama 4 i 5 gde je korišćen *ramping module* u softveru *Test Universe* koji je pogodan za testiranje u sitnim koracima, u ovom slučaju u koracima od 1 mA. Na drugoj slici su upisane očekivane vrednosti, dopuštena odstupanja i dobijene vrednosti.



Slika 4. Ramping modul za trofazni pick-up test sa HV strane



Slika 5. Rezultat trofaznog pick-up testa sa HV strane

Pre samog testa, mora biti izvršen proračun očekivanih vrednosti za sve testove koji se rade da bi kasnije bilo moguće proveriti da li ti rezultati zadovoljavaju kriterijume sa odstupanjima uzetim u ubzir koja propisuje proizvođač opreme, u ovom slučaju releja.

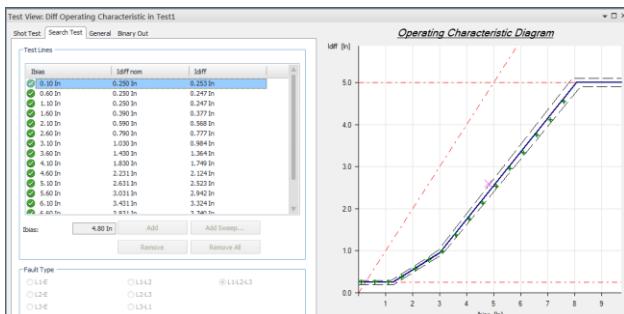
4.2. Automatizovani testovi rađeni u OCC-u

Kod testiranja u softveru *Test Universe*, postoji mogućnost da ručno testiramo sve odlike releja i njegovih zaštita kao i da to testiranje automatizujemo. Kada je u pitanju automatizovano testiranje koje je ovde urađeno, koristi se *OMICRON Control Center (OCC)*. *Control Center* testira

više funkcija objekta za testiranje sa jednim skupom testova definisanim u *Control Center* document (.occ document). U njemu se izračunavaju parametri pomoću kojih se izvršava test kao i očekivani ishodi. Zatim se ti ishodi (izlazi objekta koji se testira) mere, procenjuju i na kraju dokumentuju tako da se dobija jedan izveštaj na kome se nalaze svi automatski urađeni testovi i taj izveštaj se dalje može štampati i koristiti.

4.3. Test odredivanja diferencijalno – stabilizacione karakteristike

Test se vrši kako bi se otkrilo da li transformatorska diferencijalna zaštita ovog releja radi onako kako je zamišljeno i da li podešenja zaštite u softveru odgovaraju stvarnom radu releja, odnosno, da bi otkrili da li će zaštita odreagovati kada je to potrebno i hoće li ostati stabilna i ne odreagovati kada ne postoji kvar u štićenoj zoni. Granica za proradu zaštite je zapravo diferencijalno-stabilizaciona kriva, pa je ovim testom potrebno odrediti tu granicu, odnosno krivu. Test je prikazan na slici 6.

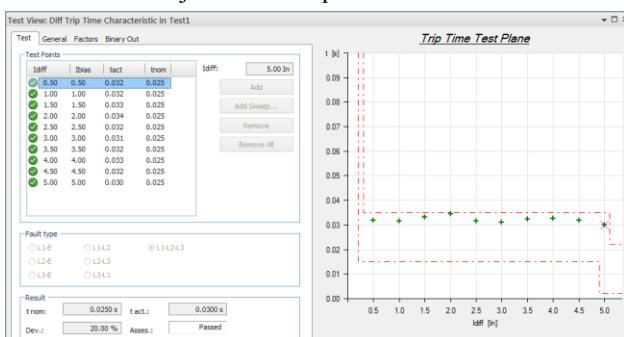


Slika 6. Traženje diferencijalno-stabilizacione krive

4.4. Test određivanja vremena delovanja zaštite

Ovaj test se vrši kako bi se odredilo da li će relej odreagovati za propisano vreme prilikom kvara, odnosno da li će poslati komandu isključenja za vreme koje je propisao proizvođač.

Na slici 7 prikazan je rezultat ovog testa. Za ovaj, kao i za ostale testove, moguće je izabrati tip kvara za koji će se vršiti test. Ovde je izabran tropolni kvar.



Slika 7. Test vremena delovanja zaštite

Kod ovakvih automatizovanih testova, u levom delu testa u prvoj koloni nalaze se izabrane vrednosti pri kojima se vrši test, u drugoj koloni očekivane vrednosti i dobijene vrednosti u trećoj. U desnem delu slike i testa grafički su prikazane očekivane i dobijene vrednosti.

Kao ishod testa dobija se zelena kvačica ako je test uspešan. Ako ishod testa ne zadovoljava očekivanja, dobija se crveni znak X.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazano je konfiguriranje i testiranje mikroprocesorskog releja ABB RET670 za zaštitu tro-namotajnih energetskih transformatora, odnosno njegove funkcije diferencijalne zaštite.

Za ova testiranja korišćen je odgovarajući testni alat koji je predstavljao trofazni izvor naizmenične struje i koji ima mogućnost generisanja struja različitih amplituda i faznih stavova u različitim režimima rada. Neki testovi su održeni na više različitih načina da bi se pokazalo da različiti načini testiranja treba da daju istovetne rezultate. Automatizovanim načinom testiranja se dosta jednostavnije dobijaju neophodni krajnji rezultati, dok se ručnim i postupnim testiranjem bolje razume problematika sistema i način rada zaštita.

S obzirom na to da su sve dobijene vrednosti u referentnom opsegu i da su svi testovi zadovoljili odgovarajuće kriterijume, izvodi se zaključak da ovaj relej radi absolutno ispravno i da bi se u realnom pogonu ponašao onako kako se to od njega i zahteva (pouzdano i sigurno). Na osnovu ovoga može se zaključiti da će ovako konfigurisan relej ispravno štititi transformator u pogonu.

6. LITERATURA

- [1] Petar Sarajčev, Robert Kosor, „Zaštita u elektroenergetskom sustavu“, Sveučilište u Splitu, 2012.
 - [2] ALSTOM, „Network protection & automation guide“, edition May 2011.
 - [3] ABB, „Transformer protection RET670 - Technical reference manual“, version 1.1.

Kratka biografija:



Nemanja Milovanović rođen je u Lozniči 1990. godine. 2011. godine upisao je Fakultet tehničih nauka, studijski program Energetika, elektronika i telekomunikacije. Na studijama se opredelio za smer Elektroenergetika – Energetska elektronika i električne mašine i diplomirao 2017. godine. Master studije upisao je 2017. godine.



Zoran N. Stojanović rođen je 22.07.1979. godine u Požarevcu. Doktorsku disertaciju pod nazivom "Usmereni releji bazirani na digitalnom faznom komparatoru" odbranio je 11.06.2012. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Oblasti naučnoistraživačkog rada kojima se do sada bavio su relejna zaštita, razvodna postrojenja i monitoring i dijagnostika visokonaponskih postrojenja.