

TUGAS AKHIR

ANALISA SENSITIVITAS ARUS INRUSH TERHADAP RELE DIFFERENSIAL PADA TRANSFORMATOR DAYA DI GARDU INDUK GLUGUR

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik (ST) Pada Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh:

M.YUDHA PRATAMA
1607220083



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2021**

HALAMAN PENGESAHAN

Proposal penelitian Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : M Yudha Pratama

NPM : 1607220083

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Analisa Sensitivitas Arus Inrush Terhadap Rele Differensial
Pada Transformator Daya Di Gardu Induk Glugur

Bidang ilmu : Sistem Kontrol

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai penelitian tugas akhir diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 21 Juni 2021

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Penguji I

Noorly Evalina, S.T., M.T.

Dosen Penguji II

Elvy Sahnur NST, S.T., M.Pd.

Dosen Pembimbing

Rohana, S.T., M.T.

Program Studi Teknik Elektro
Ketua,

Faisal Ihsan Nasaribu, S.T., M.T.



SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : M Yudha Pratama
Tempat /Tanggal Lahir: Medan / 02 Juli 1997
NPM : 1607220083
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

“Analisa Sensitivitas Arus Inrush Terhadap Rele Differensial Pada Transformator Daya Di Gardu Induk Glugur ”,

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 21 Juni 2021

Saya yang menyatakan,


M Yudha Pratama

ABSTRAK

Gardu induk merupakan gabungan dari transformer, sistem proteksi dan rangkaian *switchgear* yang tergabung dalam satu kesatuan. Salah satu sistem proteksi yang digunakan pada gardu induk adalah rele differensial. Dalam penelitian ini membahas tentang besarnya nilai *error mismatch* dan nilai arus *setting* differensial serta pengaruhnya terhadap arus *inrush* dan arus gangguan hubung singkat. Hasil perhitungan yang didapatkan pada rele differensial yaitu nilai *error mismatch* pada trafo arus gardu induk glugur masih dibawah batas maksimal yaitu 5% karena didapat hasil perhitungan masing-masing trafo arus baik pada sisi 150 kV sebesar 0,89 % dan sisi 20 kV sebesar 1,13 %. Dari hasil perhitungan didapatkan hasil arus *setting* sebesar 0,1 A. Sehingga, arus *setting* differensial yang terpasang adalah sebesar 0,3 A. Setelah dilakukan tes rele differensial terjadi *reenergize* transformator daya dan *reenergize* tersebut tidak mempengaruhi persentase kerja rele diferensial. Kondisi rele diferensial dengan *slope* yang diperoleh dari perhitungan sebesar 12 % dan id sebesar 0,1 A tidak *responsive* terhadap arus *inrush*. Dan batas arus maksimal yang diperbolehkan mengalir pada sisi 20 kV adalah sebesar 1862 A. Jika arus yang mengalir melebihi dari 1862 A, maka rele differensial akan bekerja ataupun jika arus yang mengalir tidak melebihi 1862 A maka rele differensial tidak akan bekerja.

Kata kunci : *Rele Differensial, Arus Inrush, Arus Gangguan Hubung Singkat, Error Mismatch, Arus Setting.*

ABSTRACT

The substation is a combination of transformers, protection systems and switchgear circuits that are combined in one unit. One of the protection systems used in substations is a differential relay. This research discusses the magnitude of the error mismatch value and the value of the differential setting current and its effect on the inrush current and the short circuit fault current. The calculation results obtained on the differential relay, namely the error mismatch value on the current transformer of the glugur substation is still below the maximum limit of 5% because the calculation results of each current transformer both on the 150 kV side are 0.89% and the 20 kV side is 1, 13%. From the calculation results, the setting current is 0.1 A. Thus, the installed differential setting current is 0.3 A. After the differential relay test is carried out, the power transformer re-energizes and the reenergization does not affect the working percentage of the differential relay. The differential relay condition with the slope obtained from the calculation of 12% and an id of 0.1 A is not responsive to inrush currents. And the maximum current limit allowed to flow on the 20 kV side is 1862 A. If the current flowing exceeds 1862 A, then the differential relay will work or if the current flowing does not exceed 1862 A then the differential relay will not work.

Keywords: *Differential Relay, Inrush Current, Short Circuit Current, Error Mismatch, Setting Current.*

KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini yang berjudul “Analisa Sensitivitas Arus Inrush Terhadap Rele Differensial Pada Transformator Daya Di Gardu Induk Glugur” sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terimakasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Orang tua penulis Irwanto dan Sri Nuryanti Astuti, yang telah bersusah payah membesarkan dan membiayai studi penulis.
2. Bapak Munawar Alfansury Siregar, ST., MT selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
4. Bapak Partaonan, S.T., MT, sebagai Sekretaris Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Ibu Rohana, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan ilmu keteknik elektroan kepada penulis.
7. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Kakak saya tersayang Nadya Aristantia, S.E., dan Abangda Bambang
9. Sahabat-sahabat penulis: Feri Arifin, Lutfhi Fazawi, Erman Syaputra, Darwanto, Agus Setiawan, Fahri Sanjaya, Fahrul Fauzi, Eko Prabowo dan

seluruh mahasiswa A3 Malam Teknik elektro stambuk 2016 yang tidak mungkin namanya disebut satu per satu.

Laporan Tugas Akhir ini tentunya masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis berharap kritik dan masukan yang konstruktif untuk menjadi bahan pembelajaran berkesinambungan penulis di masa depan. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi dunia kelistrikan teknik Elektro.

Medan, 21 Juni 2021



DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Ruang Lingkup	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tinjauan Pustaka <i>Relevan</i>	5
2.2 Landasan Teori	7
2.2.1 Gardu Induk.....	7
2.2.1.1 Fungsi Gardu Induk	8
2.2.1.2 Jenis Gardu Induk	8
2.2.1.3 Berdasarkan Pemasangan Peralatan.....	9
2.2.1.4 Berdasarkan Fungsinya.....	10
2.2.1.5 Berdasarkan Isolasi Yang digunakan.....	11
2.2.1.6 Berdasarkan Sistem Rel (Busbar)	11
2.2.2 Transformator Daya	12
2.2.2.1 Jenis-Jenis Transformator	13
2.3 Bagian-Bagian Transformator Daya	14
2.3.1 <i>Bushing</i>	16
2.3.2 Tangki Konservator.....	17

2.3.3 Pendingin Transformator Daya	20
2.3.4 <i>Tap Changer</i>	20
2.3.5 NGR (<i>Neutral Grounding Resistance</i>).....	21
2.4 Sistem Proteksi	22
2.5 Rele Proteksi	24
2.5.1 Rele Suhu	24
2.5.2 Rele Hubung Tanah.....	25
2.5.3 Rele Arus Lebih	25
2.6 Rele Differensial	29
2.6.1 Prinsip Kerja Rele Differensial	29
2.6.1.1 Rele differensial pada gangguan di luar proteksi.....	30
2.6.1.2 Rele differensial gangguan di dalam proteksi.....	31
2.6.2 Fungsi Rele Differensial.....	32
2.6.3 Persyaratan Pengaman Rele Differensial	32
2.6.4 Karakteristik Rele Differensial.....	32
2.6.5 Setting Kerja Rele Differensial	33
2.6.6 <i>Error Mismatch</i>	34
2.7 Gangguan Pada Transformator Daya	35
2.7.1 Gangguan <i>Internal</i> Daerah Pengaman	35
2.7.2 Gangguan <i>Eksternal</i> Daerah Pengaman.....	36
2.7.3 Gangguan Hubung Singkat	36
2.8 Arus <i>Inrush</i>	37
2.8.1 <i>Inrush Magnetisasi</i>	37
2.9 Penyebab Kegagalan Pengaman.....	37
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	39
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	39
3.2 Data Penelitian	39
3.3 Diagram Alir Penelitian	40
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Perhitungan Nilai <i>Setting</i> Rele Differensial	41
4.1.1 Arus Kerja Rele Differensial.....	45
4.1.2 Arus Tidak Seimbang.....	45
4.2 Perhitungan Gangguan Hubung Singkat Pada Transformator Daya..	46

BAB 5 PENUTUP	48
5.1 Kesimpulan.....	48
5.2 Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Rata-Rata Disipasi/Penghilang Panas	16
Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian.....	38
Tabel 3.2 Data Transformato.....	39
Tabel 3.3 Data Rele Differensial	39

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Transformator Daya	13
Gambar 2.2 Trafo Step Up	14
Gambar 2.3 Trafo Step Down	14
Gambar 2.4 Inti Besi	15
Gambar 2.5 Kumputan Transformator	16
Gambar 2.6 Bushing	17
Gambar 2.7 Konservator	18
Gambar 2.8 Tangki Jenis Sirip	18
Gambar 2.9 Tangki Jenis Radiator	19
Gambar 2.10 Silicagel	19
Gambar 2.11 Pendingin Transformator Daya	20
Gambar 2.12 Tap Changer	21
Gambar 2.13 NGR (<i>Neutral Grounding Resistance</i>)	22
Gambar 2.14 Karakteristik OCR <i>Inverse</i>	25
Gambar 2.15 Karakteristik OCR <i>Definite</i>	26
Gambar 2.16 Karakteristik OCR <i>Instantaneous</i>	26
Gambar 2.17 Rele Differensial	29
Gambar 2.18 Rele Differensial Keadaan Normal	30
Gambar 2.19 Rele Differensial Gangguan di Luar Proteksi	30
Gambar 2.20 Rele Differensial Gangguan di Dalam Proteksi	31
Gambar 2.21 Karakteristik Rele Differensial	32
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	40

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator merupakan perangkat listrik yang mengubah arus tegangan melalui induksi elektromagnetik menjadi satu atau lebih sistem arus bolak balik, tetapi memiliki nilai arus tegangan yang berbeda. Peran transformator dalam kelistrikan sangat penting karena memungkinkan produksi, transmisi, dan distribusi listrik yang efisien, andal, dan aman pada level tegangan yang sesuai.

Gardu Induk merupakan penyaluran dan pusat pengatur beban. Semakin berkembangnya teknologi saat ini, maka ketersediaan energi listrik harus terpenuhi dengan baik. Karena hampir semua kegiatan manusia sangat membutuhkan energi listrik. Gardu Induk (GI) juga pusat dari proteksi peralatan-peralatan sistem tenaga listrik, serta sebagai proses penormalan terhadap gangguan-gangguan yang ada sehingga dapat meminimalisir rugi rugi daya. Hal yang dapat dilakukan agar kerugian tersebut tidak berlangsung lama, maka pengoperasian transformator harus didampingi dengan pengaman sistem tenaga listrik yang handal dan dilengkapi dengan pengaman-pengaman sesuai kebutuhan.

Sistem proteksi adalah suatu sistem pengamanan terhadap peralatan listrik yang diakibatkan adanya gangguan teknis, gangguan alam, kesalahan operasi, dan penyebab lainnya. Fungsi proteksi adalah memisahkan bagian sistem yang terganggu sehingga bagian sistem lainnya dapat terus beroperasi. Cara kerja dari sistem proteksi yaitu mendeteksi adanya gangguan atau keadaan abnormal lainnya pada bagian sistem yang terganggu, melepaskan bagian sistem yang terganggu, memberitahu operator adanya gangguan dan lokasinya. Salah satu sistem proteksi yang digunakan transformator daya adalah rele differensial (Sistem Proteksi, Sugianto, 17 oktober 2015).

Rele differensial merupakan suatu rele yang prinsip kerjanya berdasarkan keseimbangan, yang membandingkan arus sekunder transformator pada terminal-terminal peralatan atau instalasi listrik yang diamankan. Rele differensial digunakan sebagai pengaman utama (*main protection*) pada busbar bila terjadi

suatu gangguan (Jiwantoro, 2012). Dalam pengoperasiannya rele differensial sering mengalami kesalahan kerja yang mengakibatkan transformator daya yang digunakan terjadi trip. Salah satu faktornya yaitu terjadi fenomena arus *inrush* sehingga mengganggu kinerja dari relay diferensial. Pada rele differensial dilengkapi dengan koil operating yang menghasilkan “*operating torque*” dan koil *restraining* yang menghasilkan “*restraining torque*” yang dapat menahan elemen differensial, sehingga selama keadaan transien *inrush* rele tidak akan bekerja.

Arus *inrush* merupakan arus transient dengan amplitude tinggi yang terjadi pada saat transformator daya diberikan power. Hal itu dikarenakan ketika arus eksitasi mengalir, transformator daya bekerja pada wilayah saturasi sehingga menyebabkan arus eksitasi tersebut menjadi besar dengan durasi waktu yang cukup panjang untuk mengaktifkan proteksi transformator.

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, penulis tertarik untuk mencoba menganalisis sistem rele differensial terhadap arus *inrush* pada transformator daya untuk mengetahui nilai arus *setting* rele differensial dan nilai *error mismatch* terhadap sensitivitas rele differensial dalam mengatasi gangguan yang terjadi pada transformator.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dibahas sebelumnya maka rumusan masalah pada skripsi ini sebagai berikut:

1. Berapa besar nilai *error mismatch* rele differensial terhadap sensitivitas rele differensial pada Gardu Induk Glugur ?
2. Berapa nilai arus *setting* terhadap sensitivitas rele differensial pada Gardu Induk Glugur?
3. Berapa besar arus gangguan hubung singkat pada transformator daya ?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas maka, Tujuan dari penelitian skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis nilai *error mismatch* dari rele differensial dan nilai arus *setting* terhadap sensitivitas rele differensial pada Gardu Induk Glugur

2. Menganalisis nilai arus *setting* dari rele differensial dan nilai arus *setting* terhadap sensitivitas rele differensial pada Gardu Induk Glugur
3. Menganalisis besar arus gangguan hubung singkat pada transformator daya

1.4 Ruang Lingkup

Untuk memudahkan penyusunan skripsi agar isinya tidak melebar dan lebih terarah, maka penulis membuat ruang lingkup untuk penulisan skripsi ini. Adapun yang menjadi ruang lingkup adalah sebagai berikut:

1. Pembahasan hanya menganalisa dari nilai *error mismatch* rele differensial dalam memproteksi gangguan.
2. Pembahasan hanya menganalisa dari nilai arus *setting* rele differensial dalam memproteksi gangguan.
3. Pembahasan hanya mengetahui besar arus gangguan hubung singkat pada transformator daya

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian skripsi ini adalah diharapkan dapat memberikan suatu penyelesaian masalah dan meningkatkan kualitas dari rele differensial :

a. Manfaat Bagi Universitas

Menambah bahan referensi dan bahan informasi dalam melakukan Analisa selanjutnya mengenai sensitivitas rele differensial pada transformator.

b. Manfaat Bagi Perusahaan

Memberikan pemecahan masalah bagi perusahaan dalam pengaturan proteksi rele differensial dalam memproteksi gangguan.

c. Manfaat Bagi Penulis

Menambah wawasan dan mengembangkan pengetahuan penulis mengenai sensitivitas rele differensial pada transformator.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah penulisan tugas akhir ini disusun berdasarkan sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang gambaran umum mengenai tugas akhir yang memuat latar belakang, rumusan masalah, tujuan penulisan, manfaat penulisan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas tentang gambaran umum teori transformator, serta landasan teori proteksi rele diferensial pada transformator daya.

BAB III METODE PENELITIAN

Melakukan riset di Gardu Induk Glugur yang berkaitan dengan data, membahas tentang prinsip kerja rele diferensial, dan membahas arus *setting* rele diferensial terhadap gangguan.

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang perhitungan nilai arus *setting* rele diferensial dan nilai *error mismatch* serta nilai gangguan hubung singkat untuk mengetahui kinerja rele diferensial dalam memproteksi gangguan dengan memasukkan data-data yang diperoleh.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari penulisan tugas akhir ini.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka *Relevan*

Ketersediaan energi listrik harus disertai sistem tenaga listrik yang handal, sistem tenaga listrik tersebut yaitu pusat pembangkit, sistem transmisi, dan sistem distribusi. Sistem transmisi merupakan proses penyaluran energi listrik dari pusat pembangkit yang memiliki level tegangan tertentu yang kemudian dinaikkan level yang lebih tinggi sebelum masuk ke gardu induk. Gardu induk memiliki beberapa komponen berupa transformator daya, pemisah, pemutus, busbar dan isolator, instrumen pengukuran, rele dan pengaman, sistem pentanahan dan lain lain. Untuk menjaga transformator tenaga dari gangguan diperlukan pengaman. Salah satu pengaman transformator tenaga adalah rele diferensial. Daerah pengamanannya dibatasi oleh transformator daya dimana relai diferensial dipasang sehingga rele diferensial tidak dapat dijadikan sebagai pengaman cadangan untuk daerah berikutnya. Proteksi rele diferensial bekerja dengan prinsip keseimbangan arus (*current balance*). Prinsip ini berdasarkan hukum kirchhoff yaitu membandingkan jumlah arus masuk ke primer (I_p) sama dengan jumlah arus yang keluar dari sekunder (I_S). (Kadarisman, No Year: 8-20).

Dalam pengoperasiannya transformator daya dapat mengalami 2 macam gangguan yaitu gangguan *internal* dan gangguan *eksternal*. Gangguan *internal* merupakan gangguan yang terjadi pada transformator itu sendiri. Sedangkan gangguan *eksternal* merupakan gangguan yang terjadi diluar transformator daya tetapi dapat menimbulkan gangguan pada transformator yang bersangkutan. Gangguan yang biasa terjadi pada transformator daya adalah hubung singkat pada kumparan transformator, hubung singkat diluar transformator yang menimbulkan gangguan pada trafo, beban lebih, sambaran petir dan gangguan sistem pendingin [1] (Endi Sopyandi, El-Bages, 2011) (Norria, Fitriani, 2017).

Gangguan-gangguan transformator daya sewaktu-waktu dapat terjadi, maka diperlukan pengamanan transformator daya yang memiliki kapasitas besar lebih kompleks dari pada transformator daya yang memiliki kapasitas yang lebih kecil. Pengaman tersebut dapat berupa rele proteksi, tujuan dari pemasangan rele

proteksi pada transformator daya adalah mengamankan peralatan/sistem sehingga kerugian akibat gangguan dapat dihindari atau dikurangi sekecil mungkin [1] (Ilmiah et al., 2017)(El-Bages, Endi Sopyandi 2011) (Norria, Fitriani, 2017).

Salah satu rele proteksi yang digunakan yaitu rele differensial. Rele differensial bekerja jika terjadi gangguan dalam daerah pengaman dan tidak bekerja jika terjadi gangguan luar pengamannya. Apabila rele bekerja saat gangguan luar daerah pengamannya, maka ini merupakan kejadian salah kerja yang dapat merusak peralatan. Rele differensial sangat berguna dalam mengamankan generator dan transformator, maka rele differensial harus dapat diandalkan dari gangguan-gangguan yang timbul. Prinsip kerja rele differensial tersebut juga didasarkan hukum kirchoff, dimana arus yang masuk harus sama dengan arus yang keluar [12] (Reza, Candra 2013).

Rele differensial salah satu pengaman dari transformator daya yang mampu bekerja seketika tanpa berkoordinasi dengan pengaman sekitarnya, sehingga waktu kerja rele differensial dapat disetting secepat mungkin [17] (E S Nasution, F I Pasaribu, Y Yusniati, M Arfianda, 2019). Untuk melakukan pengkoordinasian rele differensial pada transformator hendaknya terlebih dahulu mengetahui besarnya arus gangguan yang terjadi pada transformator, ini bertujuan untuk mendapatkan setting rele yang berbeda dari rele yang akan dikoordinasikan [9] (Fatra, Deni, 2014).

Manfaat sistem proteksi dan rele-rele pengaman adalah agar pemutus-pemutus daya yang tepat dioperasikan supaya hanya bagian yang terganggu saja yang dipisahkan secepatnya dari sistem, sehingga kerusakan peralatan listrik yang disebabkan oleh gangguan menjadi sekecil mungkin [26] (Liem Ek Bien, 2007).

Berdasarkan uraian diatas maka judul tugas akhir ini akan membahas tentang “ Analisa Sensitivitas Arus Inrush Terhadap Rele Differensial Pada Transformator Daya Di Gardu Induk Glugur “ yang dilakukan untuk mengetahui sensitivitas rele differensial sebagai rele proteksi pada transformator, serta mengetahui nilai arus setting rele differensial dalam mengantisipasi gangguan.

2.2 Landasan Teori

Transformator merupakan perangkat listrik yang mengubah arus tegangan melalui induksi elektromagnetik menjadi satu atau lebih sistem arus bolak balik, tetapi memiliki nilai arus tegangan yang berbeda. Peran transformator dalam kelistrikan sangat penting karena memungkinkan produksi, transmisi, dan distribusi listrik yang efisien, andal, dan aman pada level tegangan yang sesuai. Transformator adalah salah satu komponen ataupun peralatan yang terdapat didalam gardu induk.

Gardu induk disebut juga gardu unit pusat beban yang merupakan gabungan dari transformer dan rangkaian *switchgear* yang tergabung dalam satu kesatuan melalui sistem kontrol yang saling mendukung untuk keperluan operasional. Pada dasarnya gardu induk bekerja mengubah tegangan yang dibangkitkan oleh pusat pembangkit tenaga listrik menjadi tenaga listrik menjadi tegangan tinggi atau tegangan transmisi dan sebaliknya mengubah tegangan menengah atau tegangan distribusi.

2.2.1 Gardu Induk

Gardu Induk merupakan sub sistem dari sistem penyaluran (transmisi) tenaga listrik, atau merupakan satu kesatuan dari sistem penyaluran (transmisi), Penyaluran (transmisi) merupakan sub sistem dari sistem tenaga listrik. Berarti, gardu induk merupakan sub-sub sistem dari sistem tenaga listrik. Sebagai sub sistem dari sistem penyaluran (transmisi), gardu induk mempunyai peranan penting, dalam pengoperasiannya tidak dapat dipisahkan dari sistem penyaluran (transmisi) secara keseluruhan. Dalam pembahasan ini difokuskan pada masalah gardu induk yang pada umumnya terpasang di Indonesia, pembahasannya bersifat praktis (terapan) sesuai konstruksi yang terpasang di lapangan.

Tegangan yang dibangkitkan generator terbatas dalam belasan kilovolt, sedangkan transmisi membutuhkan tegangan dalam puluhan sampai ratusan kilovolt, sehingga diantara pembangkit dan transmisi dibutuhkan trafo daya *step up*. Oleh karena itu, semua peralatan yang terpasang di sisi sekunder trafo ini harus mampu memikul tegangan tinggi. Tegangan transmisi dalam puluhan sampai ratusan kilovolt sedangkan konsumen membutuhkan tegangan ratusan

sampai dua puluhan kilovolt, sehingga diantara transmisi dan konsumen dibutuhkan trafo daya *step down*. Semua perlengkapan yang terpasang di sisi primer trafo ini juga harus mampu memikul tegangan tinggi. Trafo - trafo daya ini bersama perlengkapan-perengkapannya disebut gardu induk.

2.2.1.1 Fungsi Gardu Induk

Fungsi gardu induk adalah untuk mentransformasikan daya listrik. Adapun transformasi daya listrik adalah sebagai berikut :

1. Dari tegangan ekstra tinggi ke tegangan tinggi (500 kV/150 kV).
2. Dari tegangan tinggi ke tegangan yang lebih rendah (150 kV/ 70 kV).
3. Dari tegangan tinggi ke tegangan menengah (150 kV/ 20 kV, 70 kV/20 kV).
4. Dengan frekuensi tetap (di Indonesia 50 Hertz).
5. Untuk pengukuran, pengawasan operasi serta pengamanan dari sistem tenaga listrik.
6. Pengaturan pelayanan beban ke gardu induk-gardu induk lain melalui tegangan tinggi dan ke gardu distribusi-gardu distribusi, setelah melalui proses penurunan tegangan melalui penyulang-penyulang (*feeder- feeder*) tegangan menengah yang ada di gardu induk.
7. Untuk sarana telekomunikasi (pada umumnya untuk internal PLN), yang kita kenal dengan istilah SCADA.

2.2.1.2 Jenis Gardu Induk

Jenis Gardu Induk bisa dibedakan menjadi beberapa bagian yaitu :

1. Berdasarkan besaran tegangannya.
2. Berdasarkan pemasangan peralatan
3. Berdasarkan fungsinya.
4. Berdasarkan isolasi yang digunakan.
5. Berdasarkan sistem (*busbar*).

Dilihat dari jenis komponen yang digunakan, secara umum antara GITET dengan GI mempunyai banyak kesamaan. Perbedaan mendasar adalah :

1. Pada GITET transformator daya yang digunakan berupa 3 buah transformator daya masing – masing 1 fasa (*bank transformer*) dan dilengkapi peralatan reaktor yang berfungsi mengkompensasikan daya reaktif jaringan.
2. Sedangkan pada GI (150 KV, 70 KV) menggunakan Transformator daya 3 fasa dan tidak ada peralatan reaktor.

Berdasarkan besaran tegangannya, terdiri dari :

1. Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 275 KV, 500 KV.
2. Gardu Induk Tegangan Tinggi (GI) 150 KV dan 70 KV.

2.2.1.3 Berdasarkan Pemasangan Peralatan

Gardu Induk Pasangan Luar adalah gardu induk yang sebagian besar komponennya di tempatkan di luar gedung, kecuali komponen kontrol, sistem proteksi dan sistem kendali serta komponen bantu lainnya, ada di dalam gedung. Gardu Induk semacam ini biasa disebut dengan gardu induk konvensional. Sebagian besar gardu induk di Indonesia adalah gardu induk konvensional. Untuk daerah-daerah yang padat pemukiman dan di kota-kota besar di Pulau Jawa, sebagian menggunakan gardu induk pasangan dalam, yang disebut *Gas Insulated Substation* atau *Gas Insulated Switchgear* (GIS).

Gardu Induk Pasangan Dalam adalah gardu induk yang hampir semua komponennya (*switchgear, busbar, isolator, komponen kontrol, komponen kendali, cubicle, dan lain-lain*) dipasang di dalam gedung. Kecuali transformator daya, pada umumnya dipasang di luar gedung. Gardu Induk semacam ini biasa disebut *Gas Insulated Substation* (GIS). GIS merupakan bentuk pengembangan gardu induk, yang pada umumnya dibangun di daerah perkotaan atau padat pemukiman yang sulit untuk mendapatkan lahan.

Beberapa keunggulan GIS dibanding GI konvensional :

1. Hanya membutuhkan lahan seluas ± 3.000 meter persegi atau $\pm 6\%$ dari luas lahan GI konvensional.
2. Mampu menghasilkan kapasitas daya (*power capacity*) sebesar 3 x 60 MVA bahkan bisa ditingkatkan sampai dengan 3 x 100 MVA.
3. Jumlah penyulang keluaran (*output feeder*) sebanyak 24 penyulang (*feeder*) dengan tegangan kerja masing-masing 20 KV.

4. Bisa dipasang di tengah kota yang padat pemukiman.
5. Keunggulan dari segi estetika dan arsitektural, karena bangunan bisa didesain sesuai kondisi disekitarnya.

Gardu Induk kombinasi pasangan luar dan pasangan dalam adalah gardu induk yang komponen *switchgear*-nya ditempatkan di dalam gedung dan sebagian komponen *switchgear* ditempatkan di luar gedung, misalnya *gantry (tie line)* dan saluran udara tegangan tinggi (SUTT) sebelum masuk ke dalam *switchgear*. Transformator daya juga ditempatkan di luar gedung.

2.2.1.4 Berdasarkan Fungsinya

Gardu Induk Penaik Tegangan mempunyai karakteristik yaitu :

1. Gardu induk yang berfungsi untuk menaikkan tegangan, yaitu tegangan pembangkit (*generator*) dinaikkan menjadi tegangan sistem.
2. Gardu Induk ini berada di lokasi pembangkit tenaga listrik. Karena *output voltage* yang dihasilkan pembangkit listrik kecil dan harus disalurkan pada jarak yang jauh, maka dengan pertimbangan efisiensi, tegangannya dinaikkan menjadi tegangan ekstra tinggi atau tegangan tinggi.

Gardu Induk Penurun Tegangan :

1. Gardu induk yang berfungsi untuk menurunkan tegangan, dari tegangan tinggi menjadi tegangan tinggi yang lebih rendah dan menengah atau tegangan distribusi.
2. Gardu Induk terletak di daerah pusat-pusat beban, karena di gardu induk inilah pelanggan (beban) dilayani.

Gardu Induk Pengatur Tegangan :

1. Pada umumnya gardu induk jenis ini terletak jauh dari pembangkit tenaga listrik.
2. Karena listrik disalurkan sangat jauh, maka terjadi tegangan jatuh (*voltage drop*) transmisi yang cukup besar.
3. Oleh karena diperlukan alat penaik tegangan, seperti *bank capacitor*, sehingga tegangan kembali dalam keadaan normal.

Gardu Induk Pengatur Beban :

1. Berfungsi untuk mengatur beban.

2. Pada gardu induk ini terpasang beban motor, yang pada saat tertentu menjadi pembangkit tenaga listrik, motor berubah menjadi generator dan suatu saat generator menjadi motor atau menjadi beban, dengan generator berubah menjadi motor yang memompakan air kembali ke kolam utama.

Gardu Induk Distribusi :

1. Gardu induk yang menyalurkan tenaga listrik dari tegangan sistem ke tegangan distribusi.
2. Gardu induk ini terletak di dekat pusat-pusat beban.

2.2.1.5 Berdasarkan Isolasi Yang digunakan

Gardu Induk yang menggunakan isolasi udara :

1. Adalah gardu induk yang menggunakan isolasi udara antara bagian yang bertegangan yang satu dengan bagian yang bertegangan lainnya.
2. Gardu Induk ini berupa gardu induk konvensional, memerlukan tempat terbuka yang cukup luas.

Gardu Induk yang menggunakan isolasi gas SF 6 :

1. Gardu induk yang menggunakan gas SF 6 sebagai isolasi antara bagian yang bertegangan yang satu dengan bagian lain yang bertegangan, maupun antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan.
2. Gardu induk ini disebut *Gas Insulated Substation* atau *Gas Insulated Switchgear* (GIS), yang memerlukan tempat yang sempit.

2.2.1.6 Berdasarkan Sistem Rel (*Busbar*)

Rel (*busbar*) merupakan titik hubungan pertemuan (*connecting*) antara transformator daya, SUTT/ SKTT dengan komponen listrik lainnya, untuk menerima dan menyalurkan tenaga listrik. Berdasarkan sistem rel (*busbar*), Gardu Induk dibagi menjadi beberapa jenis yaitu Gardu Induk sistem *ring busbar*, Gardu Induk sistem *single busbar*, Gardu Induk sistem satu setengah (*on half*) busbar, Gardu Induk sistem *double busbar* sebagaimana tersebut di bawah ini :

1. Gardu Induk sistem *ring busbar*

Gardu Induk sistem *ring busbar* adalah gardu induk yang busbarnya berbentuk *ring*. Pada gardu induk jenis ini, semua rel (*busbar*) yang ada, tersambung (terhubung) satu dengan lainnya dan membentuk *ring* (cincin).

2. Gardu Induk sistem *single busbar*

Gardu Induk sistem *single busbar* adalah gardu induk yang mempunyai satu (*single*) *busbar*. Pada umumnya gardu dengan sistem ini adalah gardu induk yang berada pada ujung (akhir) dari suatu sistem transmisi.

3. Gardu Induk sistem *double busbar*

Gardu Induk sistem *double busbar* adalah gardu induk yang mempunyai dua (*double*) *busbar*. Gardu induk sistem *double busbar* sangat efektif untuk mengurangi terjadinya pemadaman beban, khususnya pada saat melakukan perubahan sistem (*manuver sistem*). Jenis gardu induk ini pada umumnya yang banyak digunakan.

4. Gardu Induk sistem satu setengah (*on half*) busbar

Gardu Induk sistem satu setengah (*on half*) busbar Gardu induk yang mempunyai dua (*on half*) busbar. Pada umumnya gardu induk jenis ini dipasang pada gardu induk di pembangkit tenaga listrik atau gardu induk yang berkapasitas besar. Dalam segi operasional, gardu induk ini sangat efektif, karena dapat mengurangi pemadaman beban pada saat dilakukan perubahan sistem (*manuver sistem*). Sistem ini menggunakan 3 buah PMT dalam satu diagonal yang terpasang secara deret (seri).

2.2.2 Transformator Daya

Transformator daya adalah transformator yang biasa digunakan di Gardu Induk (GI), baik itu di GI Pembangkit dan GI Distribusi dimana transformator tersebut memiliki kapasitas daya yang sangat besar. Gardu Induk Pembangkit digunakan untuk menaikkan tegangan rendah ketegangan transmisi tinggi (150/500 kV). Sedangkan di GI Distribusi, Transformator Daya digunakan untuk menurunkan tegangan transmisi ke tegangan menengah/rendah (11,6/20 kV).

Dalam bentuknya transformator terdiri atas dua kumparan yaitu, kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan primer yaitu kumparan yang menerima daya, sedangkan kumparan sekunder yaitu kumparan yang tersambung pada

beban. Kedua kumparan dibelit pada suatu inti yang terdiri atas material *magnetic* berlaminasi. Landasan fisik transformator adalah induktansi mutual antara kedua rangkaian yang dihubungkan oleh suatu fluks *magnetic* yang melewati jalur dengan reluktansi rendah. Kedua kumparan memiliki induktansi mutual yang tinggi. Pada saat kumparan primer dihubungkan dengan tegangan, maka disaat itu pula mengalir arus bolak balik pada kumparan tersebut. Arus bolak balik yang mengalir menimbulkan fluks magnet yang berubah-ubah pada intinya. Hasil adanya fluks magnet yang berubah-ubah pada kumparan primer akan menimbulkan GGL [2] (Putra Dwi, 2015).



Gambar 2.1 Transformator Daya (GI PLN Glugur)

2.2.2.1 Jenis-Jenis Transformator

Pengklasifikasian transformator pada dasarnya tergantung pada rasio jumlah gulungan kumparan primer dengan jumlah kumparan sekundernya. Jenis transformator berdasarkan level tegangan diantaranya Transformator *Step Up* dan Transformator *Step Down*.

1. Transformator *Step Up*

Transformator *Step Up* yaitu transformator yang digunakan untuk menaikkan level tegangan dari yang rendah menuju ke tegangan yang lebih tinggi. Dengan cara memperbanyak jumlah lilitan sekundernya daripada jumlah

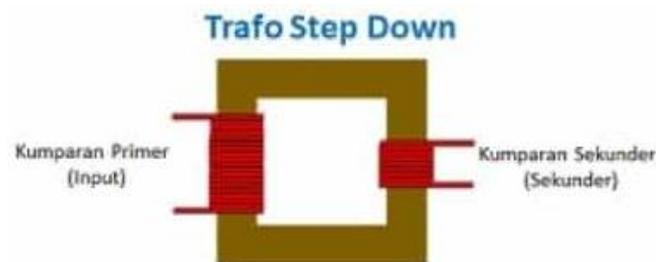
lilitan primernya. Pada pembangkit, transformator ini digunakan sebagai penghubung trafo generator ke grid.



Gambar 2.2 Trafo *Step Up*

2. Transformator *Step Down*

Transformator *Step Down* yaitu transformator yang digunakan untuk menurunkan level tegangan dari yang tinggi ke tegangan yang lebih rendah. Dengan cara memperbanyak lilitan primernya daripada jumlah lilitan sekundernya. Di jaringan distribusi, transformator *step down* biasanya digunakan untuk mengubah tegangan grid yang tinggi menjadi tegangan rendah yang dapat digunakan untuk peralatan rumah tangga.



Gambar 2.3 Trafo *Step Down*

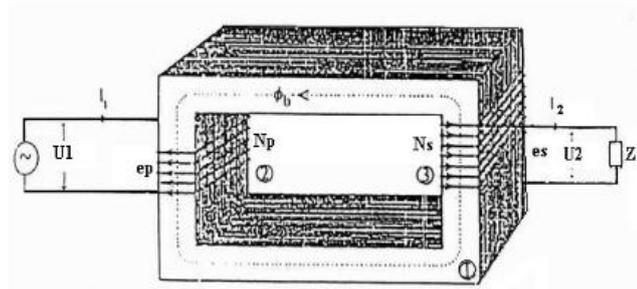
2.3 Bagian-Bagian Transformator Daya

Transformator daya memiliki beberapa bagian-bagian yang paling penting diantaranya :

1. Inti besi

Inti besi merupakan kumpulan beberapa lempengan besi tipis yang terisolasi dan disusun berlapis-lapis untuk mempermudah jalannya fluks magnet, serta

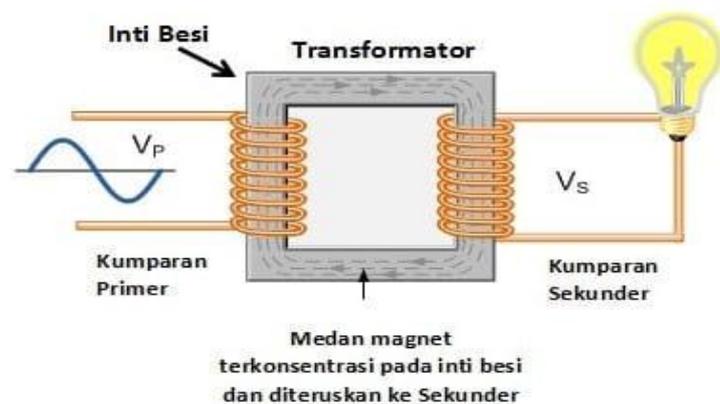
untuk mengurangi panas yang ditimbulkan dan mengurangi rugi-rugi daya.
 [3] (Ilmiah et al., 2017)(IR. Arjana Dyana I Gede.MT, 2016)



Gambar 2.4 Inti besi

2. Kumbaran transformator

Kumbaran transformator merupakan beberapa lilitan kumbaran yang terisolasi dan terdiri dari kumbaran primer serta kumbaran sekunder. Banyaknya lilitan akan menentukan besar tegangan dan arus yang ada pada sisi sekunder. Transformator juga memiliki kumbaran tertier yang diperlukan untuk memperoleh tegangan tertier atau kebutuhan lain. Kumbaran tertier selalu terhubung delta, kumbaran tertier juga untuk penyambungan peralatan bantu seperti kondensator *sychrone*, kapasitor *shunt*, dan *reactor shunt*. Untuk trafo dengan daya besar lilitan dimasukkan dalam minyak trafo sebagai media pendingin.



Gambar 2.5 Kumbaran Transformator

3. Minyak Transformator

Minyak transformator berfungsi sebagai media pemindah panas, serta juga berfungsi sebagai media isolasi kumparan-kumparan dan intinya [1] (Ilmiah et al., 2017). Supaya maksimal minyak trafo harus memenuhi beberapa persyaratan yaitu:

1. Kekuatan isolasi tinggi
2. Penyalur panas yang baik berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat
3. Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik
4. Titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan
5. Tidak merusak bahan isolasi padat
6. Sifat kimia yang stabil
7. Pengujian tegangan tembus oli, Pengujian tegangan oli dimaksudkan untuk mengetahui kemampuan dielektrik oli. Hal ini dilakukan karna selain berfungsi sebagai pendingin dari trafo, oli juga berfungsi sebagai isolasi.

Tabel 2.1 Rata-Rata *Disipasi/Penghilang Panas*

<i>Oil Natural Colling</i>	<i>Oil Natural Air Forced</i>	<i>Oil Forced Air Forced</i>
450W/m ²	750W/m ²	1000W/m ²

Persyaratan yang ditentukan sesuai dengan standard SPLN 49-1 : 1982, IEC 158 dan IEC 296 yaitu [4] (Christine Widyastuti., Oktaria Handayani., Tasdik Darmana., 2018):

1. 30 kV/2,5 mm sebelum *purifying*
2. 50 kV/2,5 mm setelah *purifying*

2.3.1 *Bushing*

Bushing merupakan penghubung antara kumparan kumparan transformator dan jaringan luar, serta sebagai penyekat antara konduktor dengan transformator.

Tujuan utama dari bushing adalah untuk menyalurkan daya elektrik keluar masuk dari *circuit breakers*, *reaktor shunt* dan juga kapasitor daya. Konduktor *bushing* biasanya dapat berbentuk konduktor yang menjadi satu bagian dengan bushing atau bisa juga terpisah yang diletakkan pada tengah bushing.



Gambar 2.6 Bushing (GI PLN Glugur)

Isolator pada bushing dikatakan baik apabila isolator tersebut mempunyai kekuatan dielektrik sehingga dapat menahan beban potensial listrik dan medan listrik yang mengenainya tanpa menjadikan cacat atau rusak, tetapi kondisi suhu, kontaminasi dan kondisi fisik isolator tersebut dapat mempengaruhi kemampuan dielektrik isolator. Bushing dapat diklasifikasikan menjadi [5] (Ilmiah et al., 2017)(Yogatama, Muhammad Reza, 2016) :

1. Media isolasi pada bagian bawah bushing
2. Kontruksi bushing
3. Media isolasi pada bagian dalam bushing

2.3.2 Tangki Konservator

Tangki konservator merupakan penampung minyak cadangan dan uap akibat pemanasan trafo karena arus beban. Untuk menjaga agar minyak tidak tercampur dengan air, ujung masuk udara dilengkapi media penyerap udara. Cara manual dapat dilengkapi peralatan untuk mempercepat sirkulasi media dengan pompa-

pompa sirkulasi minyak, udara dan air, cara ini disebut dengan pendingin paksa (*forced*).



Gambar 2.7 Konservator (GI PLN Glugur)

Ada 2 jenis tangki diantaranya:

a. Tangki Jenis Sirip

Tangki ini terbuat dari plat baja yang dibuat bergelombang yang ditebuk sesuai ukuran dengan mengalami proses pengelasan menyerupai tangki bersirip, dan siripnya itu berfungsi sebagai pendingin.



Gambar 2.8 Tangki Jenis Sirip (GI PLN Glugur)

b. Tangki jenis radiator

Tangki jenis ini terdiri dari badan tangki dan tutup yang terbuat dari *mild steel plate* yang ditebuk dan dilas sesuai dimensi yang diinginkan. (Ilmiah et al., 2017) (Pahrudin , 2017).



Gambar 2.9 Tangki Jenis Radiator (GI PLN Glugur)

Dengan naik turunnya volume minyak konservator akibat pemuain dan penyusutan minyak, volume udara di dalam konservator akan bertambah dan berkurang. Penambahan dan pembuangan udara didalam konservator akan berhubungan dengan udara diluar.



Gambar 2.10 *Silicagel* (GI PLN Glugur)

Supaya minyak isolasi transformator tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar maka udara yang masuk akan masuk kedalam konservator akan difilter *silicagel*.

2.3.3 Pendingin Transformator Daya

Transformator daya berkapasitas sangat besar tidak efektif jika hanya mengandalkan sistem secara alami, sehingga perlu dilakukan sistem pendinginan dengan alat bantu seperti oli dan kipas angin. Penggabungan dari sistem pendingin dipengaruhi oleh kapasitas daya, ukuran transformator, dan kondisi lingkungan sekitar.



Gambar 2.11 Pendingin Transformator Daya (GI PLN Glugur)

2.3.4 Tap Changer

Tap changer merupakan perbandingan transformator untuk mendapatkan tegangan operasi yang diinginkan dari tegangan primer yang berubah ubah. *Tap changer* dapat dilakukan dalam keadaan berbeban ataupun dalam keadaan tidak berbeban. Ada 2 cara untuk mengubah tegangan transformator dalam keadaan berbeban:

- a. Memasang pengaturan tegangan berbeban (*On Load Voltage Regulator*) secara seri dan terpisah dari transformator utama
- b. Memasang transformator dengan pengubah tap (*On Load Tap Changer*)



Gambar 2.12 Tap Changer (GI PLN Glugur)

Transformator yang terpasang di gardu induk pada umumnya menggunakan tap changer yang dapat dioperasikan dalam keadaan trafo berbeban dan dipasang di sisi primer, sedangkan transformator penaik tegangan dipembangkit atau pada trafo kapasitas kecil umumnya menggunakan *tap changer* dioperasikan hanya pada saat trafo tanpa beban [7][8] (Tomy Parandangi) (Sadewa Aji Waskitha, Triyogo, Subkhan Prasetyo 2014). Terdapat berbagai masalah yang timbul dengan pemakaian tap changer, yaitu :

1. Saklar pengalih yang melaksanakan tugas perpindahan hubungan dalam minyak menyebabkan minyak cepat memburuk. Solusinya minyak *tap changer* dipisahkan dari minyak transformator.
2. Seringnya saklar pengalih bekerja, maka keausan kontak perlu menjadi perhatian, dan memerlukan penggantian, namun penggantian kontak hanya sekali dalam beberapa tahun. Untuk itu perlu pengujian mekanis dan pengujian listrik dari keadaan minyak.

2.3.5 NGR (*Neutral Grounding Resistance*)

NGR merupakan tahanan yang dipasang antara titik netral trafo dengan pentanahan, dimana berfungsi untuk memperkecil arus gangguan. *Resistance* dipasang pada titik netral trafo yang dihubungkan Y ketika ada gangguan maka NGR akan meredam gangguan tersebut dan menganalisa besar arus gangguan serta mengirimkan sinyal melalui *current transformer* ke *ground fault relay* yang akan memutuskan sirkuit *breaker* bila arus gangguannya melebihi standart.



Gambar 2.13 NGR (*Neutral Grounding Resistance*)

Ada dua jenis NGR, yaitu :

- a. *Liquid*, yaitu resistornya menggunakan larutan air murni yang ditampung dalam bejana dan ditambahkan garam (NaCl) untuk mendapatkan nilai resistansi yang diinginkan
- b. *Solid*, yaitu NGR jenis padat yang terbuat dari *stainless steel*, *FeCrAl*, *Cast iron*, *Copper Nickel* atau *Nichrome* yang diatur s
- c. sesuai nilai tahanannya.

2.4 Sistem Proteksi

Secara umum rele proteksi harus bekerja sesuai dengan yang diharapkan dengan waktu yang cepat sehingga tidak akan mengakibatkan kerusakan, ataupun kalau suatu peralatan terjadi kerusakan secara dini telah diketahui, atau walaupun terjadi gangguan tidak menimbulkan pemadaman bagi konsumen.

Rele proteksi adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidaknormalan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik dan secara otomatis memberi perintah untuk membuka pemutus tenaga untuk memisahkan peralatan atau bagian dari sistem yang terganggu dan memberi isyarat berupa lampu atau bel. Rele proteksi dapat merasakan atau melihat adanya gangguan pada peralatan yang diamankan dengan mengukur atau membandingkan besaran-besaran yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fase, frekuensi, impedansi dan sebagainya, dengan besaran yang telah ditentukan, kemudian mengambil

keputusan untuk seketika ataupun dengan perlambatan waktu membuka pemutus tenaga. Pemutus tenaga umumnya dipasang pada generator, transformator daya, saluran transmisi, saluran distribusi dan sebagainya supaya dapat dipisahkan sedemikian rupa sehingga sistem lainnya tetap dapat beroperasi secara normal.

Dari uraian di atas maka rele proteksi pada sistem tenaga listrik berfungsi untuk :

1. Merasakan, mengukur dan menentukan bagian sistem yang terganggu serta memisahkan secepatnya sehingga sistem lain yang tidak terganggu dapat beroperasi secara normal.
2. Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu.
3. Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem yang lain yang tidak terganggu di dalam sistem tersebut serta mencegah meluasnya gangguan.
4. Memperkecil bahaya bagi manusia.

Untuk melaksanakan fungsi diatas maka rele pengaman harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. Dapat diandalkan (*reliable*)
2. Selektif
3. Waktu kerja rele cepat
4. Peka (sensitif)
5. Ekonomis dan sederhana

Untuk mendapatkan penyetelan yang memenuhi semua kriteria diatas adakalanya sulit dicapai, yaitu terutama antara selektif dan cepat, sehingga adakalanya harus diadakan kompromi koordinasi. Kita sadari pula bahwa sistem proteksi tidak dapat sempurna walaupun sudah diusahakan pemilihan jenis rele yang baik, tetapi adakalanya masih gagal bekerja.

Hal yang menimbulkan kegagalan pengaman dapat dikelompokkan sebagai berikut :

1. Kegagalan pada rele sendiri.
2. Kegagalan suplai arus atau tegangan ke rele tegangannya rangkaian suplai ke rele dari trafo tersebut terbuka atau terhubung singkat.

3. Kegagalan sistem suplai arus searah untuk *tripping* pemutus tenaga. Hal ini dapat disebabkan baterai lemah karena kurang perawatan, terbukanya atau terhubung singkat rangkaian arus searah.
4. Kegagalan pada pemutus tenaga. Kegagalan ini dapat disebabkan karena kumparan *trip* tidak menerima suplai, kerusakan mekanis ataupun kegagalan pemutusan arus karena besarnya arus hubung singkat melampaui kemampuan dari pemutus tenaganya.

Karena adanya kemungkinan kegagalan pada sistem pengaman maka harus dapat diatasi yaitu dengan penggunaan pengaman cadangan (*Back up Protection*). Dengan demikian pengamanan menurut fungsinya dapat dikelompokkan menjadi :

1. Pengaman utama yang pada umumnya selektif dan cepat, dan malah jenis tertentu mempunyai sifat selektif mutlak misalnya rele diferensial.
2. Pengaman cadangan, umumnya mempunyai perlambatan waktu hal ini untuk memberikan kesempatan kepada pengaman utama bekerja lebih dahulu, dan jika pengaman utama gagal, baru pengaman cadangan bekerja dan rele ini tidak seselektif pengaman utama.

2.5 Rele Proteksi

Rele proteksi merupakan sistem pengaman pada peralatan-peralatan yang terpasang pada system tenaga listrik, seperti transformator, generator, busbar, saluran kabel bawah tanah, saluran udara tegangan tinggi dan lain-lain. Yang berfungsi untuk mendeteksi atau merasakan adanya gangguan pada peralatan atau bagian sistem tenaga listrik. Dalam beberapa hal rele hanya memberi tanda adanya gangguan atau kerusakan [12] (Reza, Candra, 2013). Terdapat beberapa rele proteksi pengaman transformator daya diantaranya rele suhu, rele hubung tanah, rele arus lebih.

2.5.1 Rele Suhu

Rele suhu berfungsi untuk mendeteksi suhu minyak trafo dan kumparan secara langsung yang akan menyembunyikan alarm serta mentriapkan *circuit breaker*.

2.5.2 Rele Hubung Tanah

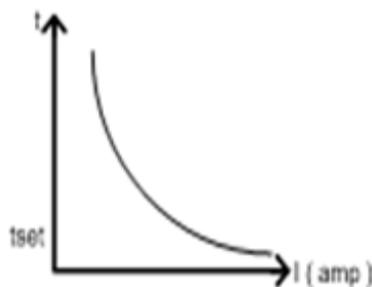
Rele gangguan tanah terbatas atau *Restricted Earth Fault (REF)* berfungsi untuk mengamankan transformator bila ada gangguan satu fasa ketanah didekat titik netral transformator yang tidak dirasakan oleh rele differensial.

2.5.3 Rele Arus Lebih

Rele arus lebih atau OCR yaitu rele yang beroperasi berdasarkan adanya kenaikan arus yang melebihi suatu nilai pengaman tertentu dalam jangka waktu tertentu, sehingga rele dapat dipakai sebagai pengaman arus lebih. OCR berfungsi sebagai proteksi peralatan listrik terhadap arus lebih yang disebabkan oleh gangguan arus hubung singkat. OCR dapat dibedakan menjadi beberapa diantaranya :

1. *Over Current Relay (OCR) Inverse*

Rele jenis ini bekerja tergantung dari arus gangguan, rele ini akan memberi perintah ke PMT pada saat terjadi gangguan bila besar gangguannya melampaui arus penyetelannya. Sifat atau karakteristik dari rele ini adalah rele baru bekerja bila yang mengalir pada rele tersebut melebihi besarnya arus setting yang telah ditentukan [13] (Moh Madani, Titiok Suheta, Tjahja Odianto, 2019).



Gambar 2.14 Karakteristik *OCR Inverse*

2. *Over Current Relay (OCR) Definite*

OCR Definite yang waktu kerjanya tidak tergantung dari arus gangguan, rele ini memberikan perintah ke PMT pada saat terjadi gangguan bila besar gangguannya melampaui arus penyetelannya. Sifat atau karakteristik dari rele

definite adalah rele baru akan bekerja bila arus yang mengalir pada rele tersebut melebihi besarnya arus setting yang telah ditentukan.

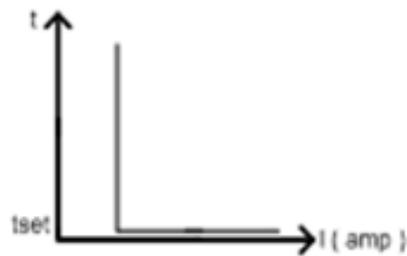


Gambar 2.15 Karakteristik OCR *Definite*

3. *Over Current Relay (OCR) Instantaneous*

Rele ini bekerja tanpa waktu tunda, rele ini juga akan memberikan perintah ke PMT pada saat terjadi gangguan bila besar arus gangguannya melampaui arus penyetelannya. Karena rele ini tanpa perlambatan, maka koordinasi untuk mendapatkan selektifitas didasarkan tingkat beda arus. Adapun jangkauan rele ini karena bekerjanya seketika atau tanpa perlambatan waktu, supaya selektif maka tidak boleh menjangkau pada keadaan arus gangguan maksimum [13] (Ilmiah et al., 2017)(Moh Madani, Titiiek Suheta, Tjahja Odianto, 2019). Berikut merupakan beberapa fungsi dari rele proteksi :

- a) Mengurangi kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang terganggu.
- b) Mengurangi pengaruh gangguan terhadap bagian sistem yang lain sehingga tidak meluasnya gangguan.
- c) Melepaskan bagian yang terganggu secepat mungkin, sehingga dibatasi seminimum mungkin sistem lainnya dapat beroperasi
- d) Memberikan pengaman cadangan bagi instalasi lainnya
- e) Memberikan pelayanan keandalan dan mutu listrik yang terbaik kepada konsumen
- f) Memperkecil bahaya terhadap manusia



Gambar 2.16 Karakteristik *Instantaneous*

Supaya rele proteksi dapat bekerja dengan baik, rele pengaman harus memenuhi beberapa persyaratan berikut :

1. Handal

Pada kondisi normal rele tidak bekerja. Jika terjadi gangguan maka rele tidak boleh mengalami kegagalan dalam mengatasi gangguan. Kegagalan kerja rele dapat mengakibatkan alat yang diamankan rusak berat sehingga daerah yang mengalami pemadaman semakin luas. Keandalan rele pengaman ditentukan dari rancangan, beban yang digunakan, dan perawatannya.

2. Selektif

Selektifitas berarti rele harus mempunyai daya beda, sehingga mampu membedakan bagian yang terganggu. Kemudian rele bertugas mengamankan peralatan. Rele yang mendeteksi adanya gangguan dan memberikan perintah untuk membuka pemutus tenaga dan memisahkan bagian yang terganggu.

3. Waktu kerja rele cepat

Rele pengaman harus bekerja sangat cepat, misalnya isolasi bocor akibat adanya gangguan tegangan lebih terlalu lama sehingga peralatan listrik mengalami kerusakan. Disamping itu rele tidak boleh melampaui waktu penyelesaian kritis.

4. Sensitivitas

Rele harus memiliki tingkat sensitivitas yang sangat tinggi, serta rele harus dapat bekerja pada awalnya terjadi gangguan. Hal ini memberikan keuntungan dimana kerusakan peralatan yang harus diamankan menjadi kecil. Tetapi, rele harus tetap stabil.

5. Ekonomis dan sederhana

Rele yang digunakan dalam sistem tenaga listrik harus mempunyai kualitas yang baik dan harganya lebih ekonomis.

Berdasarkan konsep dasar rele, rele dapat dibagi atas dua jenis, yaitu rele statik elektronik dan rele elektromekanik. Rele proteksi jenis statis adalah rele proteksi yang bekerja dengan menggunakan komponen–komponen elektronik seperti : transistor, dioda dan *thyristor*. Rele statik memiliki sejumlah kelebihan dibandingkan rele elektromekanik, yaitu :

1. Trafo arus dan trafo tegangan memiliki beban yang rendah dikarenakan daya yang dibutuhkan rele kecil.
2. Tidak memiliki kelembaman mekanik dan kontak yang melayang serta tahan terhadap guncangan dan getaran.
3. Mudah dilakukan penguatan sinyal sehingga dapat menghasilkan sensitivitas yang lebih tinggi.
4. Karakteristik yang ideal dapat diperoleh dengan menggunakan rangkaian semi konduktor.
5. Energi yang dibutuhkan dalam rangkaian pengukuran sangat rendah sehingga memungkinkan modul rele sangat kecil.

Pada kontruksi rele statik banyak digunakan rangkaian-rangkaian logik yang secara garis besar dapat diklasifikasikan menjadi :

1. Unit *logic* perasa (*sensing unit*) dan unit pemroses data (*processing unit*) yang pada dasarnya merupakan rangkaian pembanding fasa.
2. Unit *logic* penguat (*amplification logic unit*) untuk memperkuat sinyal sinyal sesuai dengan kebutuhan rele.
3. Unit *logic* tambahan (*auxiliary logic unit*) yang dapat berupa logik perlambatan waktu ataupun unit yang mengirim sinyal ke rangkaian PMT.

Rele elektromagnetik merupakan rele dapat bekerja menggunakan sumber bolak balik atau sumber arus searah sebagai penginduksi kumparan untuk membentuk magnet pada kumparan yang fungsinya untuk menggerakkan anak kontak untuk memutuskan rangkaian.

2.6 Rele Differensial

Rele differensial yaitu rele yang prinsip kerjanya berdasarkan keseimbangan, yang membandingkan arus-arus yang terpasang pada terminal-terminal peralatan listrik. Rele differensial sering digunakan sebagai pengaman utama pada rele pengaman generator, transformator daya, bushbar, dan saluran transmisi. Rele ini sangat selektif dan sistem kerjanya sangat cepat.



Gambar 2.17 Rele Differensial (GI PLN Glugur)

Rele differensial pada transformator daya tiga fasa mulai dari 5000 KVA keatas, sedangkan berdasarkan standart PLN No.51 bagian C, rele ini digunakan mulai kapasitas 30 MVA ke atas. Pada keadaan normal arus yang mengalir pada sisi sekunder transformator arus CT_1 dan CT_2 sama besar dan masing-masing mengalir sesuai dengan arah I_A untuk arus I_1 , dan I_B arus I_2 maka dapat didefinisikan melalui persamaan :

$$I_D = (I_1 - I_2)$$

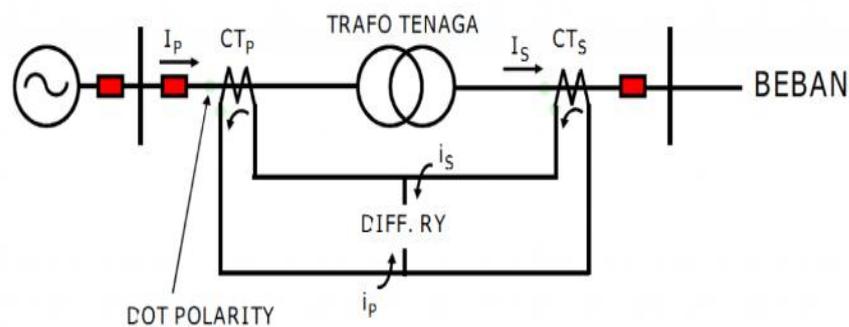
$$I_D = 0$$

2.6.1 Prinsip Kerja Rele Differensial

Menurut Mason “ Rele differensial merupakan suatu rele yang bekerja bila ada perbedaan vektor dari dua besaran listrik atau lebih, yang melebihi besaran yang ditentukan (Ilmiah et al., 2017). Seperti yang telah dijelaskan diatas, rele differensial merupakan salah satu rele proteksi yang sangat cepat kerjanya dan sangat selektif berdasarkan keseimbangan yaitu perbandingan arus yang mengalir

pada kedua sisi trafo daya melalui perantara yaitu trafo arus. Arus-arus sekunder transformator daya, yaitu I_1 dan I_2 bersikulasi melalui I_A . Jika rele pengaman dipasang antara terminal 1 dan 2, maka dalam kondisi normal tidak akan ada arus yang mengalir melaluinya.

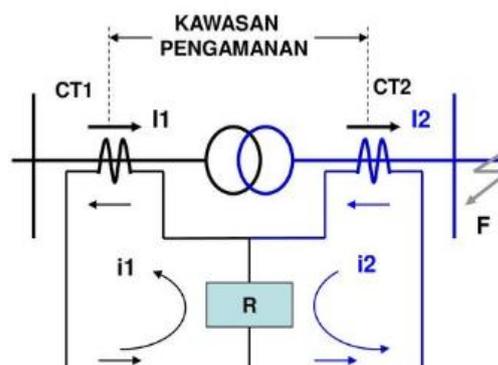
Pada waktu terjadi gangguan di daerah pengaman I_1 dan I_2 tidak sama perbandingan serta sudut fasanya berubah dari keadaan normal disini rele akan bekerja. Rele differensial ini kerjanya berdasarkan hukum kirchoff I yang bunyinya “arus yang masuk pada suatu titik sama dengan arus yang keluar pada titik tersebut”. [14] (Marsudi Djiteng, 2011)



Gambar 2.18 Rele Differensial Keadaan Normal [15] (Alief Rakhman, 2013)

2.6.1.1 Rele differensial pada gangguan di luar proteksi

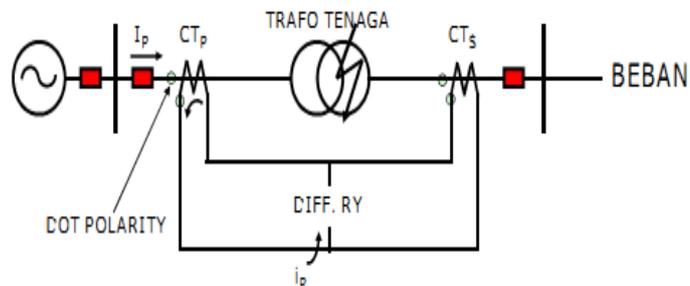
Pada saat terjadi gangguan di luar daerah proteksi, maka arus yang mengalir akan bertambah besar, akan tetapi sirkulasi akan tetap sama dengan kondisi normal dan rele differensial tidak akan beroperasi [16][17] (Paliwal, Nikhil., & Trivedi, A.) (E S Nasution, F I Pasaribu, Y Yusniati, M Arfianda, 2019).



Gambar 2.19 Rele Differensial Gangguan Luar Proteksi

2.6.1.2 Rele differensial gangguan di dalam proteksi

Pada saat terjadi gangguan didalam daerah yang diproteksi, maka arah sirkulasi arus disalah satu sisi akan terbalik, akibatnya arus I_d akan mengalir melalui rele differensial dari terminal 1 ke terminal 2. Pada saat itu pula terjadi selisih arus didalam rele, selanjutnya rele akan memutuskan CB [16][17] (Paliwal, Nikhil., & Trivedi, A.) (E S Nasution, F I Pasaribu, Y Yusniati, M Arfianda, 2019).



Gambar 2.20 Rele Differensial Gangguan didalam Proteksi [15]

Jadi, prinsip kerja rele differensial adalah membandingkan dua vektor arus atau lebih yang masuk ke rele, apabila pada sisi primer transformator arus (CT_1) dialiri arus I_1 maka pada sisi primer transformator arus (CT_2) akan dialiri arus I_2 , pada saat yang sama sisi sekunder kedua transformator akan mengalir arus I_1 dan I_2 yang besarnya tergantung dari rasio yang terpasang, jika besarnya $i_1 = i_2$ maka rele tidak bekerja karna tidak ada selisih arus, tetapi jika besarnya arus $i_1 \neq i_2$ maka rele akan bekerja karna adanya selisih arus. Arus inilah yang menjadi dasar bekerjanya rele differensial, jadi dapat disimpulkan :

$$I_{diferensial} = I_2 - I_1 \quad (2.0)$$

Dimana :

- I_d = arus differensial (A)
- I_1 = arus sisi primer (A)
- I_2 = arus sisi sekunder (A)

2.6.2 Fungsi Rele Differensial

Pengaman rele differensial merupakan alat pengaman utama untuk mengamankan transformator daya terhadap hubung singkat salah satunya yang terjadi dalam kumparan fasa. Rele differensial mempunyai sistem rangkaian sendiri-sendiri, diantaranya adalah pengaman rele longitudinal yang digunakan untuk mengamankan transformator daya terhadap hubung singkat antara kumparan yang satu dengan kumparan yang lainnya. Pengaman rele differensial untuk masing-masing lilitan longitudinal merupakan sistem yang paling banyak di jumpai dilapangan. Karena sulitnya pengaman rele differensial ini hanya dapat di pasang di transformator daya berkapasitas besar.

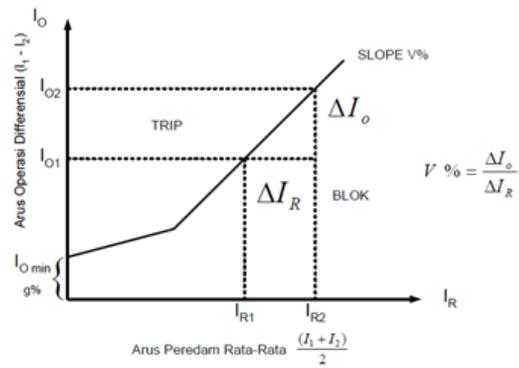
2.6.3 Persyaratan Pengaman Rele Differensial

Rele differensial sendiri mempunyai beberapa persyaratan yang harus dipenuhi sebagai pengaman [17] (Yudha, Hendra Marta, 2008) diantaranya :

1. *Current transformer* (CT) yang digunakan harus mempunyai ratio perbandingan yang sama serta sambungan dan polaritas CT_1 dan CT_2 sama.
2. Pemasangan *Auxiliary Current Transformer* yang terhubung Y karena harus membandingkan arus pada dua sisi tanpa perbedaan fasa
3. Karakteristik kejenuhan CT_1 dan CT_2 harus sama.

2.6.4 Karakteristik Rele Differensial

Rele differensial merupakan suatu rele yang karakteristik kerjanya berdasarkan keseimbangan yang membandingkan arus-arus sekunder transformator dengan yang pada terminal-terminal arus terpasang pada terminal-terminal peralatan atau instalasi listrik yang diamankan.



Gambar 2.21 Karakteristik Rele Differensial

2.6.5 Setting Kerja Rele Differensial

Menurut Komari. S. Sukarto. Wirawa, 1995, pada keadaan tertentu rele differensial hanya sensitif mengamankan gangguan internal sebagian kumparan trafo $\pm 40\%$ dan selebihnya $\pm 60\%$ kurang. Rele differensial pada umumnya mempunyai beberapa penyetelan kecuraman. Tujuan dari kecuraman adalah untuk mencegah salah kerja karna adanya ketidakseimbangan arus sisi sekunder dari trafo arusnya pada saat terjadi gangguan diluar daerah pengamannya. Kecuraman tersebut dipengaruhi oleh beberapa hal [18] (Komari. S. Sukarto. Wirawa) :

- Kesalahan sadapan transformator $\pm 12\%$
- Kesalahan transformator arcs $\pm 5\%$
- Mismatch relay* $\pm 2\%$
- Arus eksitasi trafo $\pm 2\%$
- Faktor keamanan $\pm 5\%$

Dijumlahkan menjadi $\pm 26\%$, kecuraman setting rele differensial dihitung mengacu pada persamaan :

$$g = 10 + \frac{I_{max} - I_{mean}}{I_{mean}} \times 100\% \quad (2.1)$$

Arus nominal pada transformator daya dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

Arus nominal pada sisi primer

$$I_{n1} = \frac{S}{V_p \cdot \sqrt{3}} \quad (2.2)$$

Arus nominal pada sisi sekunder

$$I_{n2} = \frac{S}{V_s \cdot \sqrt{3}} \quad (2.3)$$

Dimana :

- I_{n_1} = arus nominal pada sisi primer (A)
- I_{N_2} = arus nominal pada sisi sekunder (A)
- S = tegangan pada transformator daya (V)
- V_p = tegangan pada sisi primer (V)
- V_s = tegangan pada sisi sekunder (V)

Slope adalah karakteristik (kecuraman/ lengkungan) yang didapat dari membagi antara komponen arus differensial (I_d) dengan arus penahan / *restrain* (I_r).

$$I_r = I_{restrain} = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (2.4)$$

Untuk besaran setting :

$$\% \text{ Slope} = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \quad (2.5)$$

Untuk menghitung besarnya nilai arus *setting* differensial menggunakan rumus sebagai berikut :

$$I_{set} = \% \text{ slope} \times I_r \quad (2.6)$$

Dimana :

- I_r = arus penahan/ *restrain* (A)
- I_1 = arus primer (A)
- I_2 = arus sekunder (A)

2.6.6 Error Mismatch

Error Mismatch adalah perhitungan yang dapat ditentukan dengan membandingkan CT yang dipilih dengan rasio CT ideal yang di tentukan dari nilai pabrikan. Perbandingan kedua CT tersebut tidak boleh dilakukan lebih dari 5% besarnya nilai rasio yang akan digunakan. Untuk nilai CT ideal diambil dari nilai CT sisi sekunder.

$$i_{sek} CT = \frac{1}{I_{rasio CT}} \times In \text{ trafo} \quad (\text{Wijanarko, 2018}) \quad (2.7)$$

$$\text{Sehingga error mismatch} = \frac{CT \text{ ideal}}{CT \text{ terpasang}} \% \quad (2.8)$$

Dimana :

CT_{150} : rasio transformator arus CT_1 dari sisi primer transformator daya

CT_{20} : rasio transformator arus CT_2 dari sisi sekunder transformator daya

$I_{\text{sek CT}}$: Arus sekunder CT (A)

I_n : arus nominal (A)

2.7 Gangguan Pada Transformator Daya

Gangguan yang berpengaruh terhadap kerusakan transformator tidak hanya adanya gangguan *internal* transformator atau di dalam daerah pengaman transformator tetapi juga adanya gangguan *eksternal* daerah pengaman. Kerusakan transformator cenderung terjadi karena terlalu seringnya gangguan eksternal daerah pengaman. Pada dasarnya suatu gangguan ialah setiap keadaan suatu sistem yang tidak normal. Gangguan yang terjadi apabila dibiarkan terlalu lama pada suatu sistem daya akan menimbulkan pengaruh yang tidak diinginkan, yaitu :

1. Menginterupsi kontinuitas pelayanan pada konsumen bila gangguan tersebut menyebabkan terputusnya suatu rangkaian.
2. Penurunan tegangan yang cukup tinggi mengakibatkan rendahnya kualitas tenaga listrik dan menghalangi kerja normal pada peralatan konsumen.
3. Pengurangan stabilitas sistem dan menyebabkan jatuhnya generator
4. Merusak peralatan pada daerah yang terjadi gangguan.

2.7.1 Gangguan *Internal* Daerah Pengaman

Gangguan *internal* sangatlah serius dan selalu ada resiko kebakaran, gangguan internal dapat disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya[9][10] (Fatra, Deni, 2014) (Putra, Yosi Dwi, 2015):

1. Hubung singkat antar kumparan sisi primer dengan kumparan sekunder.
2. Hubung singkat antar kumparan sisi sekunder dengan kumparan primer.
3. Hubungan singkat antar kumparan dengan bodi transformator.
4. Spesifikasi alat yang tidak sesuai.
5. Umur peralatan.
6. Peralatan yang dioperasikan melebihi kapasitas normalnya.
7. Suhu.

Dari beberapa faktor penyebab gangguan internal diatas, maka terdapat beberapa gangguan antara lain :

1. Terjadi percikan api yang kecil dan pemanas yang disebabkan oleh cara penyambungan yang tidak baik, kerusakan isolasi antara inti baut, dll.
2. Gangguan pada sistem pendingin transformator daya.
3. Arus sirkulasi pada transformator daya yang bekerja parallel.

2.7.2 Gangguan *Eksternal* Daerah Pengaman

Gangguan ini mempunyai pengaruh terhadap transformator, sehingga transformator harus dilepaskan bila terjadi gangguan. Untuk kondisi gangguan eksternal antara lain [9][10] (Fatra, Deni, 2014) (Putra, Yosi Dwi, 2015):

1. Hubung singkat diluar transformator daya. Misalnya, hubung singkat di bus, hubung singkat di feeder dan hubung singkat di sistem. Gangguan ini dapat dideteksi karna timbulnya arus yang sangat besar mencapai beberapa ratus kali arus nominalnya.
2. Beban luar (*overload*), misalnya beban yang dilayani lebih dari 100% kapasitas transformator daya. Kondisi ini akan menimbulkan kerusakan pada transformator daya dan megakibatkan umur isolasi semakin pendek.

2.7.3 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat (*short circuit*) merupakan gangguan yang disebabkan karena adanya konduksi sengaja atau tidak sengaja melalui impedansi yang cukup rendah antara dua atau lebih titik yang dalam keadaan normalnya mempunyai beda potensial. Hubung singkat terbagi menjadi tiga jenis yaitu hubung singkat satu fasa ke tanah, hubung singkat dua fasa ke tanah, dan hubung singkat tiga fasa ke tanah. Gangguan hubung singkat tersebut dapat dihitung menggunakan hukum ohm yaitu [11] (Anaa Istimaroh, Nasrun Harianto, Syahrial. 2013):

$$I = \frac{V}{Z} \quad (2.9)$$

Dimana :

- I = Arus hubung singkat (Ampere)
 V = Tegangan sumber (Volt)

Z = Ekvivalen seluruh impedansi sumber sampai titik gangguan (Ohm)

Penyebab hubung singkat diantaranya adalah :

1. Hubungan kontak langsung dengan konduktor bertegangan
2. Temperature berlebihan karena adanya arus lebih
3. Pelepasan electron yang merusak karena tegangan berlebih

Busur / arcing karena pengembunan dengan udara terutama pada isolator

2.8 Arus *Inrush*

Arus *inrush* transformator daya adalah arus yang muncul ketika dilakukan penghubungan transformator dengan sumber tegangan untuk pertama kalinya. Besarnya arus *inrush* dapat mencapai 6-12 kali arus nominal beban penuh saat *energize*. Maka dalam jangka pendek arus *inrush* dapat menyebabkan sistem proteksi pada transformator akan mengalami kesalahan kerja dan penurunan kualitas daya dari sistem tenaga listrik, sedangkan dalam jangka panjang akan memperpendek umur transformator karena arus *inrush* mempengaruhi isolasi dari belitan trafo. Arus *inrush* dapat diminimalisir dengan memasang resistor yang terkontrol, *switch* yang terkontrol, *inrush* thermistor, mengurangi remanen dan *soft starter* [19][20] (B Riyanto, T Suheta, 2009) (Pramono, Wahyudi Budi, Ir. T. Haryono, M.Sc., C.Eng., MIET).

2.8.1 *Inrush* Magnetisasi

Pada saat transformator tidak berbeban pertama kali tegangan akan mengalir arus magnetisasi atau arus eksitasi secara transien. Arus *inrush* menyebabkan arus tidak seimbang dan dianggap sebagai *internal fault* oleh rele differensial serta menyebabkan rele salah kerja, maka sensitivitas arus *inrush* harus dikurangi agar dapat dibedakan antara gangguan arus hubung singkat dan arus *inrush*.

2.9 Penyebab Kegagalan Pengaman

Walaupun pemilihan jenis rele yang baik dan penyetelan yang baik, tetapi masih terjadi kegagalan. Berikut hal-hal yang menyebabkan kegagalan pengaman yaitu :

1. Kegagalan pada rele sendiri
2. Kegagalan suplai tegangan ke rele tegangannya rangkaian suplai ke rele dari trafo terbuka atau hubung singkat
3. Kegagalan sistem suplai arus searah untuk pemutus tenaga, hal ini dapat disebabkan baterai lemah kurangnya perawatan, terbukanya atau hubung singkat rangkaian arus searah
4. Kegagalan pada pemutus tenaga, kegagalan ini dapat disebabkan oleh kumparan trip tidak menerima suplai, kerusakan mekanis ataupun kegagalan pemutusan arus karena besarnya arus hubung singkat melampaui kemampuan dari pemutus tenaganya (Napitupulu Eden, 2015).

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan pengambilan data langsung di PT. PLN (PERSERO) Gardu Induk Glugur Medan Jalan K.L Yos Sudarso Lor. 12 Medan.

Waktu pelaksanaan penelitian ini yaitu dimulai dari Mei 2020 s/d November 2020

3.2 Data Penelitian

Data penelitian adalah segala fakta yang dikumpulkan dari subjek atau objek penelitian untuk diolah dan dianalisis menjadi kesimpulan atau hasil penelitian. Berikut untuk menunjang penyusunan skripsi saya mengambil data transformator daya dan data rele differensial dari Gardu Induk GLUGUR.

Tabel 3.2 Data Transformator Daya

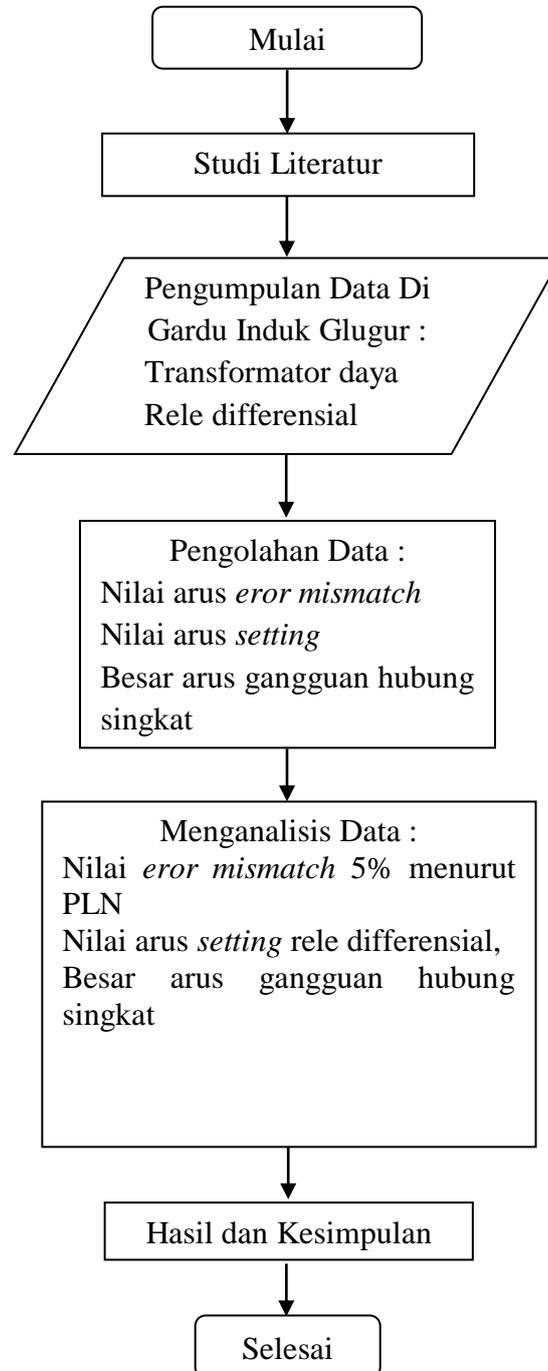
Data Transformator Daya	
Merk/ Type	UNINDO
No.Serial	P060LE676
Pabrik	Indonesia
Kapasitas Trafo	60 MVA
Tegangan Sisi Primer	150 KV
Tegangan Sisi Sekunder	20KV
Frekuensi	50 Hz
Impedansi	13,70 %
Tahun Buatan	2011
Tahun Operasional	2012
Minyak	IEC 60076
Pendingin	ONAN/ ONAF

Tabel 3.3 Data Rele Differensial

Merk	: SCHNEIDER	Ratio CT 150 kV	: 300 : 5
Type	: P632	Ratio CT 20 kV	: 2000 : 5
Rating	: 5A	Proteksi	: 150 / 20 kV Trafo 3
Tanggal	: 20 November 2020	Lokasi	: GI Glugur

3.3 Diagram Alir Penelitian

Adapun proses berlangsungnya pelaksanaan penelitian ini akan dijelaskan dalam bentuk alur diagram alir penelitian berikut ini :



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Nilai *Setting Rele Differensial*

Sebelum mengetahui atau menentukan besar rasio CT, terlebih dahulu menghitung besarnya arus nominal dan arus *rating* yang terdapat pada trafo tenaga. Adapun perhitungan arus nominal dan arus *rating* pada trafo tenaga adalah sebagai berikut :

- a. Arus nominal transformator tenaga merupakan banyaknya jumlah maksimum arus trafo yang diterima transformator tenaga. Untuk mendapatkan nilai arus nominal diperlukan parameter yaitu daya semu (VA) dan tegangan input (Volt) pada sebuah transformator. Transformator di Gardu induk Glugur menggunakan transformator daya sebesar 60 MVA atau 60.000.000 VA dengan tegangan input 150 Volt dan 20 kV Untuk mendapatkan nilai arus nominal pada transformator tenaga dapat menggunakan perhitungan pada persamaan 2-9. (Suhadi, 2008)

$$I_n = \frac{S}{V \sqrt{3}}$$

Arus nominal trafo sisi 150 kV :

$$\begin{aligned} I_{n150} &= \frac{60000000 \text{ VA}}{150000 \text{ V} \sqrt{3}} \\ &= \frac{60000000 \text{ VA}}{259.8 \text{ V}} \\ &= 230,94 \text{ A} \end{aligned}$$

Arus nominal trafo sisi 20 kV :

$$\begin{aligned} I_{n20} &= \frac{60000000 \text{ VA}}{20000 \text{ V} \sqrt{3}} \\ &= \frac{60000000 \text{ VA}}{34641,01 \text{ V}} \\ &= 1,732 \text{ A} \end{aligned}$$

- b. *Rating* arus dari sebuah transformator dibatasi oleh besarnya suhu atau temperatur operasional transformator tersebut yang masih dapat ditolerir oleh bahan isolasinya. Kapasitas sebuah tranformator dapat ditingkatkan dengan cara mengurangi rugi - rugi yang terjadi pada inti dan belitan

tembaga pada transformator tersebut *rating* arus transformator dapat diperoleh dengan mengalikan arus dengan tegangan

b. *Rating* arus trafo tenaga

Rating arus trafo sisi 150 kV :

$$I_{rat} = 110 \% \times I_{nominal}$$

$$\begin{aligned} I_{rat} &= 110 \% \times 230,94 \text{ A} \\ &= 254,03 \text{ A} \end{aligned}$$

Rating arus trafo sisi 20 kV :

$$I_{rat} = 110 \% \times I_{nominal}$$

$$\begin{aligned} I_{rat} &= 110 \% \times 1,732 \text{ A} \\ &= 1,9052 \text{ A} \end{aligned}$$

Hasil yang didapatkan dari perhitungan mencari arus nominal trafo tenaga pada sisi 150 kV adalah sebesar 230,94 A, dan pada sisi 20 kV adalah sebesar 1,732 A. Sedangkan hasil perhitungan untuk arus *rating* pada sisi 150 kV adalah sebesar 254,03 A, dan pada sisi 20 kV adalah sebesar 1,9052 A. Sesuai dengan perhitungan arus *rating* tersebut, maka rasio CT yang terpasang pada trafo tenaga sisi 150 kV adalah sebesar 300 : 5 dan pada trafo tenaga sisi 20 kV adalah sebesar 2000 : 5.

Kemudian akan menghitung *error mismatch*, nilai arus sekunder, nilai arus differensial, nilai arus penahan, *slope*, serta nilai arus setting yang terdapat pada CT. Adapun perhitungannya adalah sebagai berikut :

1. *Error Mismatch* adalah perhitungan yang dapat ditentukan dengan membandingkan CT yang dipilih dengan rasio CT ideal yang di tentukan dari nilai pabrikan. *Error Mismatch* dapat dihitung dengan rumus :

$$Error\ mismatch = \frac{CT\ Ideal}{CT\ Terpasang} \%$$

a. *Error mismatch* pada trafo tenaga sisi 150 kV

$$Error\ mismatch = \frac{CT\ Ideal}{CT\ Terpasang} \%$$

$$\begin{aligned} CT_1\ (ideal) &= CT_2 \times \frac{V_2}{V_1} \\ &= 2000 \times \frac{20000V}{150000V} \\ &= 2000 \times 0,133 \\ &= 266,67 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error mismatch} &= \frac{266,67}{300} \% \\ &= 0,88 \% \end{aligned}$$

b. *Error mismatch* pada trafo tenaga sisi 20 kV

$$\text{Error mismatch} = \frac{CT \text{ Ideal}}{CT \text{ Terpasang}} \%$$

$$\begin{aligned} CT_2 \text{ (ideal)} &= CT_1 \times \frac{V_2}{V_1} \\ &= 300 \times \frac{150}{20} \\ &= 300 \times 7,5 \\ &= 2250 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Error mismatch} &= \frac{2250}{2000} \% \\ &= 1,13 \% \end{aligned}$$

Hasil dari perhitungan yang telah dilakukan dari rumus diatas, maka memperoleh nilai *error mismatch* pada CT₁ sebesar 0,88 % serta arus CT₁ (ideal) sebesar 266,67 A. Sedangkan nilai *error mismatch* pada CT₂ sebesar 1,13 % serta arus CT₂ (ideal) sebesar 2250 A. Adapun perhitungan dalam mencari nilai arus sekunder CT adalah sebagai berikut :

2. Nilai arus sekunder CT

$$\begin{aligned} i_{sek} CT_{150} &= \frac{1}{I_{rasio CT}} \times In \text{ trafo} \\ &= \frac{1}{300} \times 230,94 \text{ A} \\ &= 0,77 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_{sek} CT_{20} &= \frac{1}{I_{rasio CT}} \times In \text{ trafo} \\ &= \frac{1}{2000} \times 1,732 \text{ A} \\ &= 0,87 \text{ A} \end{aligned}$$

Hasil yang diperoleh dalam menghitung besar nilai arus sekunder pada CT sisi 150 kV adalah sebesar 0,77 A. Sedangkan pada CT sisi 20 kV adalah sebesar 0,87 A. Kemudian melakukan perhitungan untuk mencari besarnya nilai arus differensial. Adapun perhitungannya adalah sebagai berikut :

3. $I_{dif} = I_2 - I_1$

$$I_{dif} = 0,87\text{A} - 0,77\text{A}$$

$$I_{dif} = 0,10 \text{ A}$$

Nilai arus differensial merupakan nilai arus selisih antara arus sekunder CT sisi tegangan tinggi terhadap arus sekunder CT sisi tegangan rendah. Hasil yang diperoleh dalam menghitung besar nilai arus differensial adalah sebesar 0,10 A. Dan nilai tersebut merupakan nilai pembanding dengan nilai arus *setting* differensial. Dalam hal ini arus *restrain* harus diketahui besarnya. Adapun perhitungan arus *restrain* adalah sebagai berikut :

4. Nilai arus *restrain*

Nilai arus *restrain* merupakan hasil dari penjumlahan besarnya nilai arus pada CT₁ dan CT₂ kemudian dibagi 2

$$I_r = \frac{I_1 + I_2}{2}$$

$$I_r = \frac{0,77 + 0,87}{2}$$

$$I_r = 0,82 \text{ A}$$

Maka, hasil yang diperoleh dari perhitungan nilai arus *restrain* diatas adalah sebesar 0,82 A.

Slope terbagi atas dua yaitu *slope* 1 dan *slope* 2. Dan besar nilai *slope* juga harus ditentukan. Adapun perhitungan untuk mencari besarnya nilai *slope* adalah sebagai berikut :

5. *Slope*

Nilai *slope* merupakan pembagian antara nilai arus differensial terhadap nilai arus *restrain*. Dapat dihitung dengan rumus :

$$\text{Slope 1} = \frac{I_d}{I_r} \times 100 \%$$

a. *Slope* 1

$$\text{Slope 1} = \frac{I_d}{I_r} \times 100 \%$$

$$\text{Slope 1} = \frac{0,10}{0,82} \times 100 \%$$

$$\text{Slope 1} = 0,12 \times 100 \%$$

$$\text{Slope 1} = 12 \%$$

b. *Slope* 2

$$\text{Slope 2} = \frac{I_d}{(I_r \times 2)} \times 100 \%$$

$$\text{Slope 2} = \left(\frac{0,10}{0,82} \times 2 \right) \times 100 \%$$

$$\text{Slope 2} = 0,24 \times 100 \%$$

$$\text{Slope 2} = 24 \%$$

Hasil dari perhitungan diatas maka diperoleh besarnya nilai *slope* 1 adalah 12 % dan *slope* 2 adalah 24 %. Setelah diketahui nilai *slope*, selanjutnya akan dihitung besar nilai arus differensial. Adapun perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$6. I_{set} = \% \text{ slope} \times I_r$$

$$I_{set} = 12 \% \times 0,82 \text{ A}$$

$$I_{set} = 0,12 \times 0,82 \text{ A}$$

$$I_{set} = 0,1 \text{ A}$$

Hasil dari perhitungan nilai arus *setting* differensial pada trafo tenaga yang diperoleh adalah sebesar 0,1 A. Akan tetapi, pada *setting* rele differensial yang dibuat adalah sebesar 0,3 A.

4.1.1 Arus Kerja Rele Differensial

Dari hasil analisa pengujian arus kerja dengan menggunakan tes *plug* dan Omicron cmc 356, bertujuan untuk mengetahui apakah rele masih bekerja dengan baik. Mula-mula *setting* sebesar 1A pada sisi sekunder, kemudian injeksikan arus dari nilai 0-1,61 A dan 1,63 A pada fasa R, kemudian paada fasa S injeksikan arus dari 0-1,65 A, dan pada fasa T injeksikan arus dari 0-1,69 A. pada masing-masing test *plug* timbul arus pick up yang berbeda-beda, arus pick up ini merupakan arus dimana rele mulai bekerja dengan indikator bunyi alarm serta lampu indikator pada rele menyala warna hijau.

Setelah mendapatkan nilai arus *pick up* kemudian dilakukan penurunan arus sehingga didapat arus drop off yang menunjukkan rele direset kembali dan bunyi alarm serta lampu indikator merah.

4.1.2 Arus Tidak Seimbang

Salah satu penyebab timbulnya arus tidak seimbang ini adalah adanya magnetizing inrush. Arus ini dapat menyebabkan kerja rele differensial walaupun pada daerah pengaman tidak terjadi kesalahan. Berdasarkan arus *magnetizing* sendiri disebabkan oleh :

1. Fluks permanen yang terperangkap pada inti besi transformator daya.
2. Kondisi gelombang tegangan pada saat *switching* terjadi.
3. Pemberian tegangan pada trafo daya yang sudah *deenergize* tetap akan timbul gejala inrush tetapi magnetisasinya tidak sebesar waktu trafo pertama di *energize*.
4. Tegangan inrush terjadi pada gangguan hubung singkat tiga fasa dimana tegangan turun hingga nol dan 35 kembali secara mendadak setelah gangguan dipisahkan. Kejadian ini dapat menimbulkan inrush tetapi tidak sebesar *inrush* awal.

Untuk mengatasi masalah arus tidak seimbang ini rele differensial dibuat sejalan dengan arus tak seimbang sehingga dapat menghindari terjadinya kesalahan kerja. Kesulitan dapat diatasi dengan cara menambah kumparan yang akan menahan kerja rele differensial akibat arus tidak seimbang. Kumparan ini disebut *restaining coil* atau rele differensial tipe bias.

4.2 Perhitungan Gangguan Hubung Singkat Pada Transformator Daya

Gardu induk glugur pernah mengalami gangguan hubung singkat pada sisi 20 kV dengan arus gangguan sebesar 13846 A dan 3597,53 A yang menyebabkan rele diferensial bekerja. Adapun perhitungan arus gangguannya sebagai berikut :

- a. Arus gangguan pada sisi 20 kV sebesar 13846 A :

$$\begin{aligned} I_{f\ rele} &= I_f \times CT_2 \\ &= 13846 \times \frac{1}{2000} \\ &= 6,93 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{2\ fault} &= \frac{I_{f\ rele}}{I_2} \\ &= \frac{6,93}{0,87} \\ &= 7,97 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_d &= I_{2\ fault} - I_1 \\ &= 7,97 - 0,77 \\ &= 7,2 \text{ A} \end{aligned}$$

Arus gangguan di sisi 20 kV adalah 13846 A dan menghasilkan arus sekunder di CT₂ sebesar 7,97 A serta arus differensial sebesar 7,2 A. Oleh karena

itu, rele differensial akan aktif dan memerintahkan PMT agar trip sebab arus differensial melebihi arus *setting* rele.

- b. Arus gangguan pada sisi 20 kV sebesar 3597,53 A :

$$\begin{aligned} I_{f\ rele} &= I_f \times CT_2 \\ &= 3597,53 \times \frac{1}{2000} \\ &= 1,79 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{2\ fault} &= \frac{I_{f\ rele}}{I_2} \\ &= \frac{1,79}{0,87} \\ &= 2,06 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_d &= I_{2\ fault} - I_1 \\ &= 2,06 - 0,77 \\ &= 1,29 \text{ A} \end{aligned}$$

Arus gangguan di sisi 20 kV adalah 3597,53 A dan menghasilkan arus sekunder di CT₂ sebesar 1,79 A serta arus differensial sebesar 1,29 A. Oleh karena itu, rele differensial akan aktif dan memerintahkan PMT agar trip sebab arus differensial melebihi arus *setting* rele.

- c. Arus gangguan hubung singkat yang dapat menyebabkan Id menjadi 0,3

$$\begin{aligned} I_{2\ fault} &= I_1 + I_d \\ &= 0,77 + 0,3 \\ &= 1,07 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{f\ rele} &= I_{2\ fault} \times I_2 \\ &= 1,07 \times 0,87 \\ &= 0,931 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_f &= I_{f\ rele} \times CT_2 \\ &= 0,931 \times \frac{2000}{1} \\ &= 1862 \text{ A} \end{aligned}$$

Pada saat Id sebesar 0,3 A maka arus maksimal yang mengalir pada sisi 20 kV adalah sebesar 1862 A, artinya batas arus yang diperbolehkan mengalir pada sisi tersebut adalah 1862 A. Sehingga, rele differensial akan bekerja jika arus yang mengalir melebihi dari 1862 A.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang dilakukan pada penelitian ini, maka penulis mengambil beberapa kesimpulan bahwa:

1. Perhitungan setting relay differensial sangat diperlukan guna mencegah arus gangguan yang dapat menyebabkan kerusakan peralatan dan kontinuitas penyaluran tenaga listrik yang stabil. *Error mismatch* pada trafo arus gardu induk Glugur masih dibawah batas maksimal yaitu 5% karena didapat hasil perhitungan masing-masing trafo baik pada sisi 150 kV sebesar 0,89 % dan sisi 20 kV sebesar 1,13 %. Dari hasil perhitungan didapatkan hasil arus *setting* sebesar 0,1 A.
2. Arus *setting* differensial yang terpasang adalah sebesar 0,3 A. Setelah dilakukan tes rele differensial terjadi *reenergize* transformator daya dan *reenergize* tersebut tidak mempengaruhi persentase kerja rele differensial. Kondisi rele differensial dengan *slope* yang diperoleh dari perhitungan sebesar 12 % dan id sebesar 0,1 A tidak *responsive* terhadap arus inrush.
3. Batas arus maksimal yang diperbolehkan mengalir pada sisi 20 kV adalah sebesar 1862 A. Jika arus yang mengalir melebihi dari 1862 A, maka rele differensial akan bekerja ataupun jika arus yang mengalir tidak melebihi 1862 A maka rele differensial tidak akan bekerja.

5.2 Saran

Untuk menghindari kemungkinan gangguan yang tidak diinginkan maka disarankan untuk melakukan pemeliharaan dengan baik terhadap rele pengaman utama maupun rele pengaman cadangan beserta peralatan bantu lainnya. Tidak hanya pemeliharaan saja namun ada baiknya bila rele tersebut di uji coba dalam jangka waktu yang ditentukan untuk mengetahui apakah rele tersebut benar-benar bekerja dengan baik bila terjadi gangguan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Endi Sopyandi., El Bages. (2011) Norria, Fitriani. (2017). *Analisis penggunaan rele diferensial sebagai proteksi pada transformator daya 16 mva di gardu induk jajar*, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [2] Putra Dwi., (2015) Cahyo Juli Saputra. (2018). *Studi setting rele differential pada transformator tenaga di pt pertamina refinery unit IV Cilacap*, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [3] IR. Arjana Dyana I Gede.MT., (2016). *Koordinasi sistem pengaman transformator daya pada gardu induk padang sambian*. Universitas Udayana.
- [4] Christine Widyastuti., Oktaria Handayani., Tasdik Darmana., (2018). *Pengaruh kadar air terhadap tegangan tembus minyak transformator distribusi*, Sekolah Tinggi Teknik PLN Teknik Elektro.
- [5] Yogatama, Muhammad Reza., (2016). *Analisis Distribusi Medan Listrik Pada Bushing Trafo Menggunakan CST Studio Suite*. Institut Teknologi Sepuluh November.
- [6] Pahrudin., (2017). *Jenis-jenis transformator daya dan spesifikasi*.
- [7] Tomy Parandangi., *Bab I transformator daya*. Universitas Hasanudin.
- [8] Sadewa Aji Waskitha., Triyogo., Subkhan Prasetyo., (2014). *Sistem proteksi pada transformator*. Universitas Negeri Yogyakarta Fakultas Teknik Elektro.
- [9] Fatra, Deni, (2014). *Studi penggunaan rele diferensial sebagai proteksi transformator daya di gardu induk bukit siguntang tragi boom baru upt Palembang pt.pln(persero)*. Politeknik Negeri Sriwijaya.
- [10] Putra, Yosi Dwi, (2015) *Penyetelan rele diferensial tipe mbch12 sebagai pengaman transformator daya 60 MVA 1 di gardu induk simpang tiga*. Other thesis, Politeknik Negeri Sriwijaya.
- [11] Anaa Istimaroh, Nasrun Harianto, Syahrial. (2013) *Penentuan setting rele arus lebih generator dan rele diferensial transformator unit 4 PLTA Cirata II*. Institut Teknologi Nasional (Itenas) Bandung, Jurusan Teknik Elektro.
- [12] Reza, Candra (2013). *Teknik proteksi diferensial pada transformator daya tiga fasa dengan menggunakan transformasi wavalet*. S1 thesis, Universitas Pendidikan Indonesia.
- [13] Moh Madani, Titiek Suheta, Tjahja Odianto, (2019), *Analisa setting over current relay (Ocr) dan ground fault relay (GFR) pada trafo 60 MVA di*

GIS 150 KV, Simpang, Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan 1 (1), 683-690.

- [14] Marsudi, Djiteng (2011). *Pembangkitan energi listrik*. Jakarta : Erlangga.
- [15] Rakhman, Alief, 2013, *Sistem proteksi*, [Online], (<https://www.slideshare.net/afifzuhri/sistem-proteksi-alief-rakhman/>), Diakses pada : 12 Mei 2020).
- [16] Paliwal, Nikhil., & Trivedi, A. (2014). *Analysis of Modern Digital Differential Protection for Power Transformer*. *International Journal of Interdisciplinary Research and Innovations*. 2, 46-53.
- [17] E S Nasution, F I Pasaribu, Y Yusniati, M Arfianda, (2019), *Rele diferensial sebagai proteksi pada transformator daya pada gardu induk.* Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
- [18] Yudha, Hendra Marta, (2008), *Proteksi rele prinsip dan aplikasi.*, Universitas Sriwijaya Palembang.
- [19] Komari. S. Sukarto. Wirawa (1995), *Proteksi sistem tenaga listrik*, Jasdik PT. PLN, 1983.
- [20] B Riyanto, T Suheta, (2009), *Studi perhitungan nilai keandalan tegangan 150 kV dan 70 kV di gardu induk sekar putih.*, Jurnal Sains dan Teknologi Universitas Hang Tuah.
- [21] Pramono, Wahyudi Budi, Ir. T. Haryono, M.Sc., C.Eng., MIET, (2008)., *Pengaruh sudut fase tegangan sumber pada besarnya arus inrush transformator daya*, Universitas Gajah Mada, **Tesis S2 Teknik Elektro**.
- [22] Napitupulu, Eden. (2015), *Relay Proteksi*. PT. PLN (Persero) Pembangkit Jabar Jaya.
- [23] Wijanarko, Danang. (2018). *Analisa Penggunaan Rele Differensial Sebagai Proteksi Pada Transformator 60 MVA Di Gardu Induk Palur*. UMS. Surakarta.
- [24] PT. PLN (Persero). Buku Petunjuk Transformator Tenaga.