

TUGAS AKHIR

**DESIGN RANGKAIAN SERIAL KONTAK ALARM DAN KONTAK TRIP PADA
PROTEKSI TEMPERATUR TRANSFORMATOR 2 – 30 MVA GARDU INDUK
BLORA**



Disusun oleh:

ADITYAKTA NUGRAHA

30601800074

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “DESIGN RANGKAIAN SERIAL KONTAK ALARM DAN KONTAK TRIP PADA PROTEKSI TEMPERATUR TRANSFORMATOR 2 – 30 MVA GARDU INDUK BLORA” ini disusun oleh :

Nama : Adityakta Nugraha

NIM : 30601800074

Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan oleh dosen pembimbing pada :

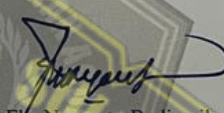
Hari : Selasa

Tanggal : 31 Januari 2023

Pembimbing 1

Pembimbing 2


Dedi Nugroho, S.T., M.T.
NIDN. 0617126602


Dr. Eka Nurvanto Budisusila, S.T., M.T.
NIDN. 0619107301

Mengetahui

Ketua Program Studi Teknik Elektro


Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.
NIDN. 0607018501

UNISSULA

جامعة سلطان أبوبوع الإسلامية

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**DESIGN RANGKAIAN SERIAL KONTAK ALARM DAN KONTAK TRIP PADA PROTEKSI TEMPERATUR TRANSFORMATOR 2 – 30 MVA GARDU INDUK BLORA**” ini telah dipertahankan di depan Dosen Penguji Tugas Akhir pada :

Hari : Jumat

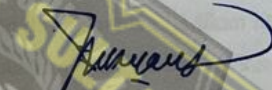
Tanggal : 24 Februari 2023

TIM PENGUJI

Anggota I

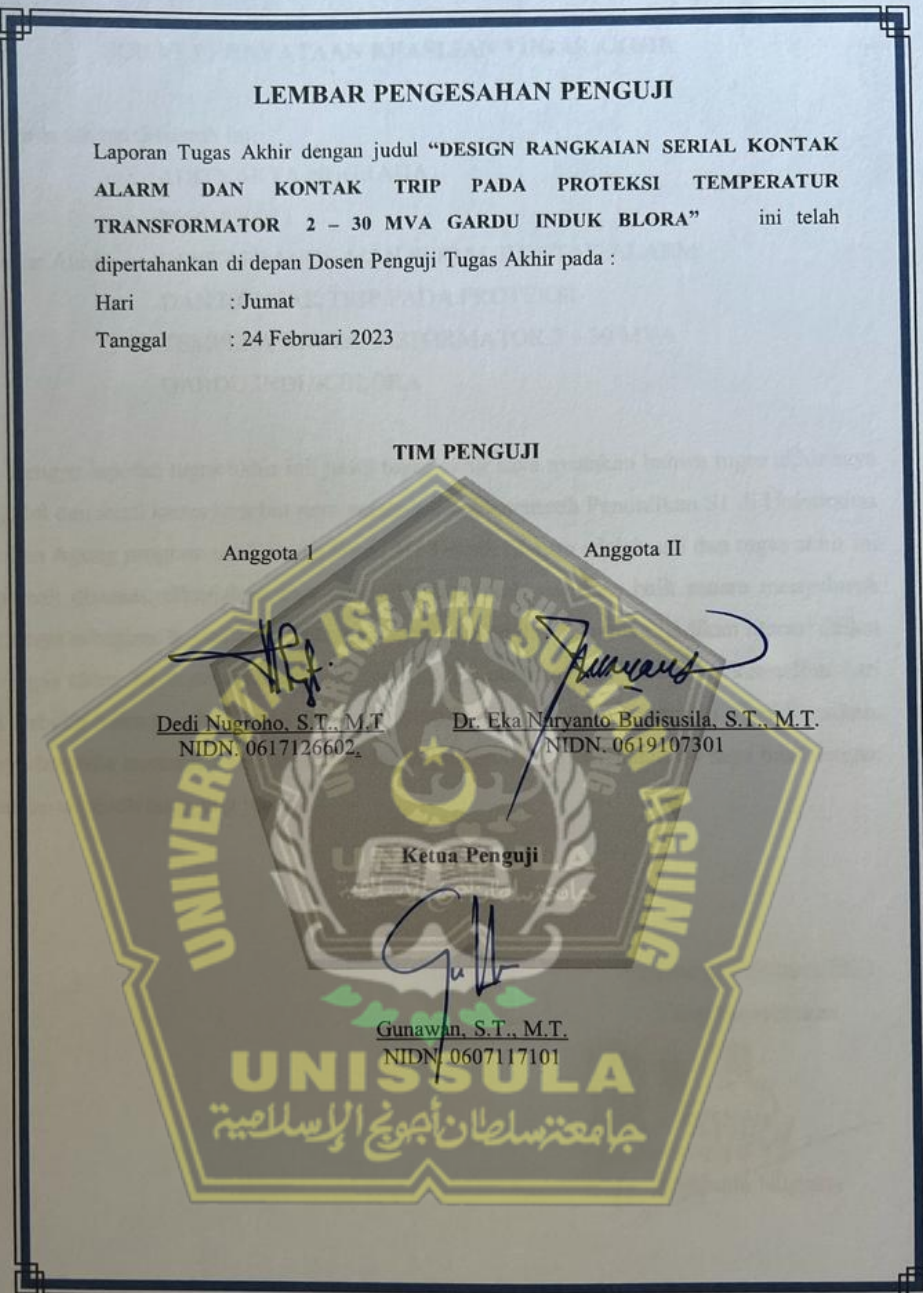
Anggota II


Dedi Nugroho, S.T., M.T.
NIDN. 0617126602


Dr. Eka Nuryanto Budisusila, S.T., M.T.
NIDN. 0619107301

Ketua Penguji


Gunawan, S.T., M.T.
NIDN. 0607117101



PERNYATAAN PERSETUJUAN UNGGAH KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : ADITYAKTA NUGRAHA
NIM : 30601800074
Program Studi : TEKNIK ELEKTRO
Fakultas : TEKNIK INDUSTRI

Dengan ini menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir/Skripsi/Tesis/Disertasi* dengan judul :

**DESIGN RANGKAIAN SERIAL KONTAK ALARM DAN KONTAK TRIP PADA
PROTEKSI TEMPERATUR TRANSFORMATOR 2 – 30 MVA GARDU INDUK BLORA**

dan menyetujuinya menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif untuk disimpan, dialihmediakan, dikelola dalam pangkalan data, dan dipublikasikannya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung.

Semarang, 10 Maret 2023
Yang menyatakan,



(Adityakta Nugraha)

*Coret yang tidak perlu

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : ADITYAKTA NUGRAHA
NIM : 30601800074
Judul Tugas Akhir : DESIGN RANGKAIAN SERIAL KONTAK ALARM
DAN KONTAK TRIP PADA PROTEKSI
TEMPERATUR TRANSFORMATOR 2 – 30 MVA
GARDU INDUK BLORA

Dengan laporan tugas akhir ini, judul tugas akhir saya nyatakan bahwa tugas akhir saya dengan judul dan studi kasus tersebut saya susun untuk menempuh Pendidikan S1 di Universitas Islam Sultan Agung program studi Strata Satu (S1) Teknik Elektro adalah asli dan tugas akhir ini belum pernah disusun, dikerjakan atau dipublikasikan oleh siapapun baik secara menyeluruh ataupun hanya sebagian. Kecuali jika beberapa sumber yang ditulis untuk dijadikan literasi dalam laporan tugas akhir ini serta dicantumkan pada daftar pustaka, dan jika pada kemudian hari ternyata terbukti bahwa judul Tugas Akhir ini pernah disusun, ditulis maupun dipublikasikan, maka saya bersedia menerima sanksi akademis. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran serta penuh tanggung jawab.

Semarang, 10 Maret 2023

Yang Menyatakan



Adityakta Nugraha

ABSTRAK

Pada gardu induk terdapat transformator tenaga yang berfungsi menurunkan tegangan tinggi ke tegangan menengah. Transformator tenaga memiliki sistem proteksi berupa relai elektrik dan mekanik sebagai pengaman pada transformator. Salah satu proteksi mekanik transformator tenaga yaitu proteksi temperatur dengan pengaman berupa relai termal yang kerjanya dipengaruhi suhu minyak maupun suhu belitan. Pada proteksi termal ini memiliki potensi yang cukup tinggi terhadap gangguan nonsistem bay trafo. Maka dilakukan modifikasi rangkaian alarm dan trip pada relai termal untuk mencegah terjadinya gangguan nonsistem bay trafo. Tugas akhir ini membahas mengenai modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur Transformator 2 Gardu Induk Blora dengan penambahan auxiliary relay untuk mengamankan jalur tripping. Penambahan auxiliary relay tersebut dimaksudkan untuk memutus arus yang menuju ke jalur tripping agar tidak mengerjakan kontak trip apabila terjadi short terminal maupun kerusakan pada relai bantu. Dalam penerapannya modifikasi ini memiliki manfaat dari segi finansial terkait keefektifan biaya apabila terjadi gangguan dan dari segi non finansial dapat mengurangi potensi gangguan pada transformator akibat gangguan nonsistem bay trafo, serta dapat menambah keandalan transformator dalam menyalurkan energi listrik.

Kata kunci : Modifikasi, Relai Termal, Transformator, Gangguan Nonsistem



ABSTRACT

At the substation there is a power transformer that has functions to reduce high voltage to medium voltage. The power transformer has a protection system there are electrical relays and mechanical relays as a safety for the transformer. One of the mechanical protection of power transformers is temperature protection that is thermal relay whose work influenced by oil temperature and winding temperature. This thermal protection has a high potential against Non System Fault (NSF) of the transformer bay. Then modification of the alarm and trip circuit on the thermal relay is carried out to prevent Non System Fault (NSF) of the transformer bay. This final project discusses about the modification of the alarm and trip circuit on the temperature protection of Transformer II at the Blora Substation with the addition of auxiliary relays to secure the tripping line. The addition of the auxiliary relays is intended to cut off the current leading to the tripping line so as not to triggering the trip contacts when there is a short terminal or there is a broken auxiliary relay. In its application, this modification has benefits, from a financial point of view related to cost effectiveness in the event of a disturbance and from a non-financial perspective it can reduce the potential for disturbance to the transformer due to Non System Fault (NSF) of the transformer bay and can increase the reliability of the transformer in distributing electrical energy.

Key words: Modification, Thermal Relay, Transformer, Non System Fault



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR ISTILAH, SIMBOL, DAN SINGKATAN	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Manfaat.....	3
1.4 Tujuan Penulisan.....	4
1.5 Pembatasan Masalah	4
1.6 Metode Penulisan	4
1.7 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.2 Sistem Transmisi Tenaga Listrik.....	9
2.2.1 Saluran Transmisi.....	9
2.2.2 Gardu Induk.....	12
2.2.3 Sistem Proteksi.....	16
2.3 Gangguan Sistem Tenaga Listrik	18
2.4 Transformator Tenaga	20
2.5 Proteksi Transformator Tenaga	23
2.5.1 Relai Elektrik.....	23
2.5.2 Relai Mekanik	26
2.6 Teori Termal Transformator.....	29
2.7 Pendinginan Transformator.....	29
2.8 Minyak Transformator	31
2.9 Suhu Lingkungan (<i>Ambeient</i>).....	31
2.10 Isolasi pada Transformator.....	32

2.11	TROF dan TROD	33
2.11.1	<i>Transformer Outage Frequency (TROF)</i>	33
2.11.2	<i>Transformer Outage Duration (TROD)</i>	33
BAB III METODE PENELITIAN		36
3.1	Flow Chart	36
3.2	Model Penelitian	37
3.3	Data Spesifikasi Transformator	39
3.4	Root Cause Problem Solving	40
3.5	Alat dan Material yang Digunakan	41
3.6	Langkah Pelaksanaan	45
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		49
4.1	Hasil penelitian	49
4.1.1	Prinsip Kerja Rangkaian Sebelum dan Sesudah Modifikasi	49
4.1.2	Manfaat Modifikasi Rangkaian Alarm dan Trip Proteksi Temperatur Transformator	54
4.2	Hasil Pengujian Transformator Terkait Relay Termal	57
4.3	Pengaruh Modifikasi Rangkaian Alarm dan Trip Terhadap Nilai TROF dan TROD	59
BAB V PENUTUP		63
5.1	Kesimpulan	63
5.2	Saran	63
DAFTAR PUSTAKA		64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik.....	7
Gambar 2.2 Saluran Listrik Udara Tegangan Tinggi.....	10
Gambar 2.3 Saluran Listrik Bawah Tanah.....	10
Gambar 2.4 Saluran Listrik Isolasi Gas	11
Gambar 2.5 Gardu Induk Sistem <i>Ring Busbar</i>	13
Gambar 2.6 Gardu Induk Sistem <i>Single Busbar</i>	13
Gambar 2.7 Gardu Induk Sistem <i>Double Busbar</i>	14
Gambar 2.8 Gardu Induk Sistem <i>One Half Busbar</i>	14
Gambar 2.9 Zona Proteksi	17
Gambar 2.10 Transformator Tenaga.....	20
Gambar 2. 11 Komponen Transformator Tenaga	21
Gambar 2.12 Relai Elektrik Tipe RET 670.....	24
Gambar 2.13 Relai Bucholz	26
Gambar 2.14 Relai Jansen.....	27
Gambar 2.15 Relai <i>Sudden Pressure</i>	27
Gambar 2.16 Relai <i>Thermal</i> (OTI/WTI).....	28
Gambar 3. 1 <i>Single Line Diagram</i> Gardu Induk Blora.....	38
Gambar 3.2 Hubungan Belitan Transformator.....	40
Gambar 3.3 Bagan RCPS (Root Cause Problem Solving).....	40
Gambar 3.4 <i>Wiring</i> Internal Trafo	42
Gambar 3.5 <i>Wiring</i> Panel Kontrol Eksisting	43
Gambar 3.6 <i>Wiring</i> Modifikasi Panel Kontrol.....	44
Gambar 3.7 Diagram Blok Pengujian Kalibrasi Relai Termal	46
Gambar 3.8 Rangkaian Alat Uji Tahanan Isolasi.....	47
Gambar 3.9 Diagram Blok Pengujian Tegangan Tembus (BDV)	48
Gambar 4.1 Rangkaian Logic OTI Sebelum Modifikasi	50
Gambar 4.2 Rangkaian Logic WTI Sebelum Modifikasi	50
Gambar 4.3 Prinsip Kerja Relai Termal Sebelum Modifikasi	51
Gambar 4.4 Rangkaian Logic OTI Setelah Modifikasi	52
Gambar 4.5 Rangkaian Logic WTI Setelah Modifikasi.....	52
Gambar 4 6 Prinsip Kerja Relai Termal Setelah Modifikasi Saat Suhu Normal	53
Gambar 4.7 Prinsip Kerja Relai Termal Setelah Modifikasi Saat Memenuhi Suhu Setting	54
Gambar 4.8 Grafik Nilai TROF dan TROD UPT Semarang Tahun 2018-2020.....	60

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Transformator 2 Gardu Induk Blora.....	39
Tabel 4.1 Data Rekap Beban Tertinggi Tahun 2022.....	55
Tabel 4.2 Daftar Biaya Modifikasi	56
Tabel 4. 3 Data Hasil Pengujian Tahanan Isolasi Kontak Relai Termal	57
Tabel 4.4 Hasil Penghitungan Kalibrasi Relai Termal.....	58
Tabel 4.5 Data Hasil Pengujian Tegangan Tembus.....	58
Tabel 4. 6 Data Hasil Pengujian Fungsi Relai Termal.....	59
Tabel 4.7 Kontrak Manajemen Terkait TROF dan TROD UPT Semarang Tahun 2022..	61



DAFTAR ISTILAH, SIMBOL, DAN SINGKATAN

	: PMT atau Pemutus Tenaga
	: PMS atau Pemisah
	: Transformator Tenaga
	: LA atau <i>Lightning Arrester</i>
	: PT atau <i>Potensial Transformer</i>
	: CT atau <i>Current Transformer</i>
	: Kontak NO atau <i>Normaly Open</i>
	: BI atau <i>Binary Input</i>
	: Kontak <i>Auxiliary Relay</i>
NSF	: <i>Non System Fault</i>
TROF	: <i>Transformer Outage Frequency</i> atau nilai kali gangguan transformator dalam satu unit
TROD	: <i>Transformer Outage Duration</i> atau nilai durasi gangguan transformator dalam satu unit
Zona	: Daerah yang dibatasi PMT
FOIS	: <i>Forced Outage Information System</i>
OTI	: <i>Oil Thermal Indicator</i>
WTI	: <i>Winding Thermal Indicator</i>
<i>Thermocouple</i>	: Sensor suhu pada relai OTI/WTI
<i>Wiring</i>	: Rangkaian pengawatan
<i>Tripping</i>	: Istilah yang berhubungan dengan trip PMT
<i>Energize</i>	: Beroperasi atau menghasilkan energi
ENS	: <i>Energy Not Supplied</i>
UITJBT	: Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Tengah
UPT	: Unit Pelaksana Transmisi
ULTG	: Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Surat Perintah Modifikasi Jalur Trip Relai OTI/WTI dari UITJBT
- Lampiran 2 Berita Acara Modifikasi Jalur Trip Relai OTI/WTI Transformator 2 Gardu Induk Blora
- Lampiran 3 Hasil Pengujian pada Transformator 2 Gardu Induk Blora Tahun 2022
- Lampiran 4 Kontrak Manajemen 2022 antara MUPT Semarang dengan MULTG Rembang
- Lampiran 5 Dokumentasi



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semakin berkembangnya zaman serta kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi, kebutuhan manusia semakin meningkat pula. Bukan hanya kebutuhan pokok saja, tetapi manusia membutuhkan teknologi atau alat-alat pendukung untuk menunjang kesehariannya, di mana teknologi dan peralatan tersebut erat kaitannya dengan energi listrik. Sehingga, energi listrik memiliki peran yang signifikan dalam mendukung berkembangnya zaman. Secara umum, sistem tenaga listrik terdiri dari pembangkit, transmisi, dan distribusi yang saling terhubung untuk membangkitkan, mentransmisikan, dan mendistribusikan tenaga listrik untuk sampai ke konsumen.

Sistem transmisi tenaga listrik merupakan sistem yang sangat diperlukan dalam penyaluran tenaga listrik. Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkit tenaga listrik (*Power Plant*) hingga substation distribution sehingga dapat disalurkan sampai pada konsumen pengguna listrik melalui suatu bahan konduktor (Joko Pramono, 2010). Standar tegangan tinggi yang berlaku di Indonesia adalah 70 kV dan 150 kV yang mana sistem 70 kV sendiri hanya terdapat di wilayah Jawa Barat. Sedangkan untuk standar tegangan ekstra tinggi yang berlaku di Indonesia yaitu 275 kV yang dikembangkan di Pulau Sumatera dan 500 kV di Pulau Jawa. Untuk pemanfaatannya sendiri selain digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari pembangkit menuju jaringan distribusi, saluran transmisi dapat digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik ke konsumen tegangan tinggi seperti salah satu contohnya yaitu PT Semen Indonesia di wilayah Rembang, Jawa Tengah.

Dalam hal penyaluran tenaga listrik ke konsumen, PT PLN (Persero) sebagai perusahaan yang mengelola kelistrikan negara menjadi tumpuan bagi masyarakat untuk meningkatkan keandalan dalam penyaluran energi listrik dengan melakukan berbagai upaya agar dalam penyalurannya tidak terjadi gangguan. Oleh sebab itu, diperlukan proteksi sistem tenaga listrik untuk meminimalisir adanya gangguan

sehingga penyaluran tenaga listrik stabil dan kontinuitas pelayanan kepada konsumen dapat dipertahankan.

Salah satu proteksi sistem tenaga listrik yang dibutuhkan untuk menjaga keandalan dalam penyaluran energi listrik yaitu proteksi pada transformator tenaga. Transformator tenaga sendiri merupakan komponen utama dalam penyaluran energi listrik yang harus bekerja secara terus-menerus. Mengingat kerja keras transformator yang hampir kontinu maka pengoperasiannya perlu diperhatikan. Pembebanan transformator, suhu kumparan, suhu minyak transformator dan suhu sekitar menjadi faktor yang harus diperhatikan dan diperhitungkan agar transformator bisa bekerja optimal dan mencegah susut umur dari transformator itu sendiri.

Untuk proteksi transformator tenaga sendiri menggunakan dua jenis relai yaitu relai elektrik dan relai mekanik. Relai elektrik meliputi relai diferensial dan relai *Restricted Earth Fault* (REF) sebagai proteksi utama, serta *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) sebagai proteksi cadangan di sisi 150 kV dan sebagai pengaman utama di sisi 20 kV. Sedangkan relai mekanik sebagai proteksi internal meliputi relai bucholz, relai jansen, relai *sudden pressure*, dan relai termal. Seiring berjalannya waktu di Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Tengah (UITJBT) terjadi 8 kali gangguan nonsistem transformator pada tahun 2016 sampai 2018 yang diakibatkan *wiring Oil Thermal Indicator* (OTI) dan *Winding Thermal Indicator* (WTI). Gangguan ini disebut gangguan *Non System Fault* (NSF) bay trafo di mana PMT trip tanpa adanya alarm terlebih dahulu, sehingga menimbulkan adanya inovasi untuk memodifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur transformator. Untuk wilayah ULTG Rembang sendiri pada tanggal 22 Februari 2019 juga terjadi gangguan NSF bay trafo di Gardu Induk 150 kV Blora. Berdasarkan banyaknya gangguan yang terjadi, pada 17 Juli 2018 dikeluarkan surat 0100/KON.02.04/ TRANS-JBT / 2018 perihal modifikasi rangkaian alarm dan trip untuk dijadikan acuan bagi gardu induk lainnya termasuk Gardu Induk 150 kV Rembang sebagai tindakan preventif dalam mencegah gangguan NSF. Pada Tahun 2019 di wilayah UITJBT secara keseluruhan sudah menerapkan modifikasi ini.

Oleh karena itu, dilakukan modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi transformator yang dimaksudkan untuk mengurangi maupun mencegah terjadinya gangguan pada transformator yang dapat mengakibatkan kerugian finansial bagi perusahaan maupun pelanggan. Berdasarkan hal tersebut, maka penulis dengan ini akan membahas dan membuat Tugas Akhir dengan judul **“DESIGN RANGKAIAN SERIAL KONTAK ALARM dan KONTAK TRIP pada PROTEKSI TEMPERATUR TRANSFORMATOR 2 – 30 MVA GARDU INDUK BLORA”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang penulis paparkan di atas, maka penulis dapat merumuskan masalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana memodifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur transformator 2 30 MVA Gardu Induk 150 kV Blora?
- b. Bagaimana cara menguji transformator setelah dilakukan modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur transformator 2 30 MVA Gardu Induk 150 kV Blora?
- c. Bagaimana pengaruh terhadap nilai *Transformer Outage Frequency* (TROF) dan *Transformer Outage Duration* (TROD) sebelum dan setelah dilakukan modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur transformator?

1.3 Manfaat

Adapun manfaat yang dapat dimbil dari Tugas Akhir ini sebagai berikut:

- a. Bagi penulis, sebagai bentuk pengaplikasian ilmu yang diperoleh selama perkuliahan dalam bentuk studi kasus.
- b. Bagi Politeknik Negeri Semarang khususnya Program Studi Teknik Listrik dapat menjadi referensi bagi mahasiswa mengenai modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur transformator untuk pencegahan gangguan nonsistem *bay* trafo.
- c. Bagi PT. PLN (Persero), dapat meningkatkan keandalan Transformator 2 30 MVA Gardu Induk 150 kV Blora.
- d. Bagi masyarakat, sebagai media ilmu dan pembelajaran guna menambah wawasan.

1.4 Tujuan Penulisan

Penulisan tugas akhir ini bertujuan:

- a. Menjelaskan modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur transformator 2 30 MVA Gardu Induk 150 kV Blora.
- b. Mengetahui cara dan hasil pengujian transformator setelah dilakukan modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur transformator 2 30 MVA Gardu Induk 150 kV Blora.
- c. Mengetahui pengaruh terhadap nilai *Transformer Outage Frequency* (TROF) dan *Transformer Outage Duration* (TROD) sebelum dan setelah dilakukan modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur transformator.

1.5 Pembatasan Masalah

Dalam pembuatan tugas akhir ini untuk menjaga agar topik masalah tidak keluar dari permasalahan maka perlu adanya batasan-batasan masalah yang akan diuraikan, antara lain :

- a. Pembatasan masalah pada wilayah PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Transmisi (UPT) Semarang ULTG Rembang.
- b. Pembahasan mengenai modifikasi rangkaian alarm dan trip dan sistem proteksi relai mekanik transformator tenaga pada Transformator 2 30 MVA Gardu Induk 150 kV Blora.
- c. Hasil pengujian terbatas pada pembahasan mengenai cara pengujian dan kaitannya dengan relai termal.
- d. Pengambilan data yang dilakukan yaitu meliputi perbandingan nilai TROF dan TROD sebelum dan setelah dilakukan perbaikan rangkaian alarm dan trip transformator di PT PLN (Persero) UPT Semarang.
- e. Pembahasan mengenai keandalan Transformator 2 30 MVA Gardu Induk 150 kV Blora.

1.6 Metode Penulisan

Metode yang digunakan pada penyusunan tugas akhir ini adalah:

- a. Studi Pustaka

Metode ini dilakukan dengan cara mencari data baik dari buku SOP yang tersedia di PT PLN (Persero) Gardu Induk 150 kV Blora, buku lainnya,

maupun artikel yang diperoleh melalui internet yang berkaitan dengan materi tugas akhir ini, yaitu tentang transformator tenaga dan pemeliharaan proteksi transformator tenaga.

b. Bimbingan

Metode ini dilakukan dengan cara meminta pengarahan dan petunjuk dari dosen pembimbing I, dosen pembimbing II, serta manajemen PLN UPT Semarang, ULTG Rembang.

c. Observasi

Metode observasi adalah metode mengumpulkan data dengan cara mencari data dari UPT Semarang, ULTG Rembang, dan Gardu Induk 150 kV Blora, serta melakukan pengamatan secara langsung terhadap hasil modifikasi rangkaian alarm dan trip pada Transformator 30 MVA pada Gardu Induk 150 kV Blora dengan memperhatikan Standar Operasional Prosedur. Untuk itu penyusun melakukan pengamatan secara langsung di tempat saat pelaksanaan Kerja Praktik di PT PLN (Persero) ULTG Rembang dengan memanfaatkan fasilitas yang ada untuk mendukung penyusunan laporan Tugas Akhir.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika yang digunakan dalam penyusunan laporan proyek akhir ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini merupakan isi keseluruhan pokok informasi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, pembatasan masalah, metode dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori – teori dasar yang mendukung pembuatan tugas akhir, khususnya teori mengenai sistem tenaga listrik, sistem transmisi tenaga listrik, gangguan sistem tenaga listrik, transformator tenaga, proteksi transformator tenaga, teori termal transformator, pendinginan transformator, minyak transformator, suhu lingkungan, isolasi pada transformator, serta TROF dan TROD.

BAB III SISTEM PROTEKSI DAN DATA KINERJA TRANSFORMATOR 2 30 MVA GARDU INDUK 150 kV BLORA

Bab ini menjelaskan mengenai *single line diagram* Gardu Induk 150 kV Blora, spesifikasi transformator, proteksi internal transformator, *wiring* eksisting relai termal, *wiring* modifikasi eksisting relai termal, referensi termal transformator, data beban dan suhu dari transformator, hasil pengujian terkait relai termal dan standarnya, serta data TROF dan TROD sebelum dan sesudah adanya modifikasi rangkaian.

BAB IV MODIFIKASI RANGKAIAN ALARM DAN TRIP TRANSFORMATOR DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan tentang modifikasi rangkaian alarm dan trip pada Transformator 2 30 MVA Gardu Induk 150 kV BLora, analisis hasil pengujian transformator terkait relai termal, analisis pengaruh terhadap nilai TROF dan TROD sebelum dan setelah dilakukan perbaikan rangkaian alarm dan trip pada transformator.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang dapat diambil serta saran



BAB II

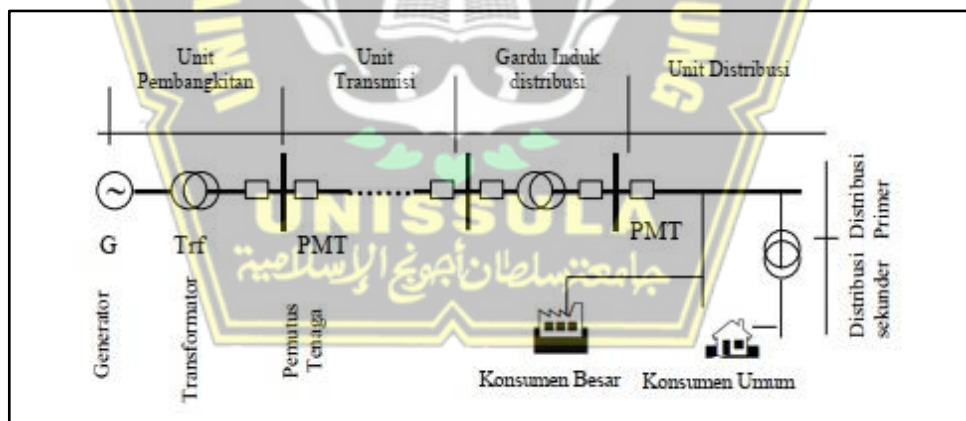
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Secara umum sistem tenaga listrik dapat dikatakan terdiri dari tiga bagian utama, yaitu:

- Pembangkit tenaga listrik,
- Penyaluran tenaga listrik
- Distribusi tenaga listrik.

Sistem tenaga listrik modern merupakan sistem yang kompleks yang terdiri dari pusat pembangkit, saluran transmisi dan jaringan distribusi yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Untuk memenuhi tujuan operasi sistem tenaga listrik, ketiga bagian yaitu pembangkit, penyaluran dan distribusi tersebut satu dengan yang lainnya tidak dapat dipisahkan seperti terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik

Tenaga Listrik dibangkitkan di Pusat-pusat Tenaga Listrik seperti PLTA, PLTU, PLTG, PLTGU, PLTP dan PLTD kemudian disalurkan melalui saluran transmisi setelah terlebih dahulu dinaikkan tegangannya oleh transformator penaik tegangan (*step up transformer*) yang ada di Pusat Listrik. Saluran tenaga listrik yang menghubungkan pembangkitan dengan gardu induk (GI) dikatakan sebagai saluran

transmisi karena saluran ini memakai standar tegangan tinggi dikatakan sebagai saluran transmisi tegangan tinggi yang sering disebut dengan singkatan SUTT. Di lingkungan operasional PLN saluran transmisi terdapat dua macam nilai tegangan yaitu saluran transmisi yang bertegangan 70 kV dan saluran transmisi yang bertegangan 150 kV dimana SUTT 150 kV lebih banyak digunakan daripada SUTT 70 kV. Khusus untuk tegangan 500 kV dalam praktek saat ini disebut sebagai tegangan ekstra tinggi yang disingkat dengan nama SUTET. Setelah tenaga listrik disalurkan melalui saluran transmisi maka sampailah tenaga listrik di Gardu Induk (GI) sebagai pusat beban untuk diturunkan tegangannya melalui transformator penurun tegangan (*step down transformer*) menjadi tegangan menengah atau yang juga disebut sebagai tegangan distribusi primer. Tegangan distribusi primer yang dipakai PLN adalah 20 kV, 12 kV dan 6 kV. Kecenderungan saat ini menunjukkan bahwa tegangan distribusi primer PLN yang berkembang adalah 20 kV atau disebut Jaringan Tegangan Menengah (JTM). Setelah tenaga listrik disalurkan melalui jaringan distribusi primer kemudian tenaga listrik diturunkan tegangannya dengan menggunakan trafo distribusi (*step down transformer*) tegangan standar 380/220 V atau disebut Jaringan Tegangan Rendah (JTR) untuk disalurkan ke konsumen PLN melalui Sambungan Rumah (SR). (Marsudi, 2006)

Sistem tenaga listrik sering pula hanya disebut dengan sistem tenaga, bahkan kadangkala cukup hanya dengan sistem. Penamaan suatu sistem tenaga listrik biasanya menggunakan daerah cakupan yang dilistriki, misalnya Sistem Tenaga Listrik Jawa Bali (STLJB) atau Sistem Jawa Bali (SJB) berarti sistem tenaga listrik yang mencakup Pulau Jawa, Madura dan Bali. Dalam mencapai tujuan dari operasi sistem tenaga listrik maka perlu diperhatikan tiga hal berikut ini, yaitu :

a. Ekonomi (*economy*)

Ekonomi (*economy*) berarti listrik harus dioperasikan secara ekonomis, tetapi dengan tetap memperhatikan keandalan dan kualitasnya.

b. Keandalan (*security*)

Keandalan (*security*) merupakan tingkat keamanan sistem terhadap kemungkinan terjadinya gangguan. Sedapat mungkin gangguan di pembangkit maupun transmisi dapat diatasi tanpa mengakibatkan pemadaman di sisi konsumen.

c. Kualitas (*quality*)

Kualitas (*quality*) tenaga listrik yang diukur dengan kualitas tegangan dan frekuensi yang dijaga sedemikian rupa sehingga tetap pada kisaran yang ditetapkan.

Di dalam pelaksanaan pengendalian operasi sistem tenaga listrik, urutan prioritas dari sasaran di atas bisa berubah-ubah tergantung pada kondisi *real time*. Pada saat terjadi gangguan, maka keamanan adalah prioritas utama sedangkan mutu dan ekonomi bukanlah hal yang utama. Demikian juga pada saat keamanan dan mutu sudah bagus, maka selanjutnya ekonomi harus diprioritaskan.

2.2 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Sistem transmisi merupakan sistem yang berfungsi untuk mengalirkan energi listrik dari pembangkit ke gardu listrik utama (*main substation*). Berikut merupakan bagian dari sistem transmisi tenaga listrik:

1. Saluran transmisi
2. Gardu Induk
3. Sistem proteksi

Ketiga bagian tersebut memiliki peranannya masing-masing untuk menyalurkan energi listrik secara andal menuju ke sistem distribusi tenaga listrik. (Joko Pramono, 2010)

2.2.1 Saluran Transmisi

Berdasarkan pemasangannya, saluran transmisi dibagi menjadi tiga kategori, yaitu:

a. Saluran Udara (*Overhead Lines*)

Saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada isolator antara menara atau tiang transmisi. Keuntungan dari saluran transmisi udara antara lain :

1. Mudah dalam perbaikan
2. Mudah dalam perawatan
3. Mudah dalam mengetahui letak gangguan
4. Lebih murah

Kerugian :

1. Rawan terhadap cuaca
2. Kurang dalam segi estetika



Gambar 2.2 Saluran Listrik Udara Tegangan Tinggi

(PT. PLN (Persero), 2014f)

Saluran kabel bawah tanah (*Underground Cable*)

Saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kabel yang dipendam di dalam tanah. Kategori saluran seperti ini adalah favorit untuk pemasangan di dalam kota, karena berada di dalam tanah maka tidak mengganggu keindahan kota dan juga tidak mudah terjadi gangguan akibat kondisi cuaca atau kondisi alam. Namun tetap memiliki kekurangan, antara lain mahal dalam instalasi dan investasi serta sulitnya menentukan titik gangguan dan perbaikannya.



Gambar 2.3 Saluran Listrik Bawah Tanah

((PT. PLN (Persero), 2014a))

b. Saluran Isolasi Gas

Saluran Isolasi Gas (*Gas Insulated Line/GIL*) adalah Saluran yang diisolasi dengan gas, misalnya: gas SF₆, seperti gambar Karena mahal dan resiko terhadap lingkungan sangat tinggi maka saluran ini jarang digunakan.



Gambar 2.4 Saluran Listrik Isolasi Gas
((PT. PLN (Persero), 2014c))

Berdasarkan kapasitas yang disalurkan, saluran transmisi dibagi menjadi 3 bagian (PT. PLN (Persero), 2014b), yaitu :

a. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET)

Pada umumnya saluran transmisi di Indonesia digunakan pada pembangkit dengan kapasitas 200 kV - 500 kV. Dimana tujuannya adalah agar drop tegangan dari penampang kawat dapat direduksi secara maksimal, sehingga diperoleh operasional yang efektif dan efisien. Akan tetapi terdapat permasalahan mendasar dalam pembangunan SUTET ialah konstruksi tiang (tower) yang besar dan tinggi, memerlukan tanah yang luas, memerlukan isolator yang banyak, sehingga memerlukan biaya besar. Masalah lain yang timbul dalam pembangunan SUTET adalah masalah sosial, yang akhirnya berdampak pada masalah pembiayaan.

b. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT)

Pada saluran transmisi ini memiliki tegangan operasi antara 30 kV – 150 kV. Konfigurasi jaringan pada umumnya single atau doble sirkuit, dimana 1 sirkuit terdiri dari 3 fasa dengan 3 atau 4 kawat. Biasanya hanya 3 kawat dan

penghantar netralnya diganti oleh tanah sebagai saluran kembali. Apabila kapasitas daya yang disalurkan besar, maka penghantar pada masing-masing fasa terdiri dari dua atau empat kawat (*Double* atau *Quadrupole*) dan Berkas konduktor disebut *Bundle Conductor*.

c. Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT)

Saluran kabel bawah tanah (*underground cable*), saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kabel yang dipendam di dalam tanah dengan tegangan operasi 30 kV – 150 kV. Kategori saluran seperti ini adalah favorit untuk pemasangan di dalam kota, karena berada di dalam tanah maka tidak mengganggu keindahan kota dan juga tidak mudah terjadi gangguan akibat kondisi cuaca atau kondisi alam. Namun tetap memiliki kekurangan, antara lain mahal dalam instalasi dan investasi serta sulitnya menentukan titik gangguan dan perbaikannya. (PT. PLN (Persero), 2014e)

2.2.2 Gardu Induk

Gardu Induk adalah sub sistem dari sistem transmisi atau penyaluran tenaga listrik. Sebagai subsistem dari sistem transmisi tenaga listrik, peranan Gardu Induk sangat besar. Jadi, pengoperasian Gardu Induk ini tidak bisa dipisahkan sama sekali dari sistem transmisi listrik. Gardu Induk juga bisa diibaratkan sebagai terminal atau stasiun transmisi, di mana tegangan listrik bisa diatur apabila tegangan turun. Gardu Induk merupakan komponen penting dalam penyaluran listrik sampai kepada konsumen. Gardu induk berdasar pemasangan peralatan dibagi menjadi dua jenis yaitu :

1. Gardu Induk Pasang Luar

Sebagian gardu induk di Indonesia adalah gardu induk pasang luar atau gardu induk konvensional. Gardu induk ini Sebagian besar komponennya ditempatkan di luar Gedung kecuali sistem proteksi dan sistem kendali serta komponen lainnya ada di dalam gedung.

2. Gardu Induk Pasang Dalam (PT. PLN (Persero), 2014g)

Gardu Induk pasang dalam juga biasa disebut dengan Gas Insulated Substation (GIS). Hampir semua komponennya dipasang di dalam gedung kecuali transformator daya pada umumnya dipasang diluar gedung.

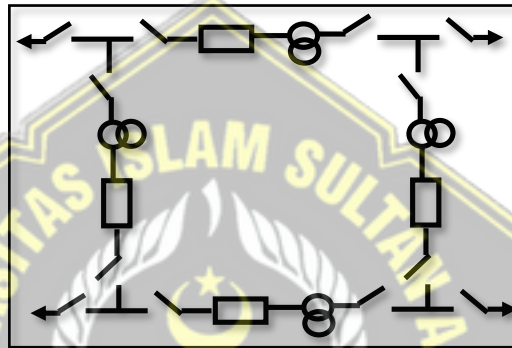
3. Gardu Induk Kombinasi

Gardu induk kombinasi adalah Gardu Induk yang beberapa komponen Switchgear diletakkan di dalam gedung dan di luar gedung, sedangkan transformatornya diletakkan di luar gedung.

Berdasarkan sistem rel (busbar), Gardu Induk di bagi menjadi beberapa jenis yaitu:

1. Gardu Induk Sistem *Ring Busbar*

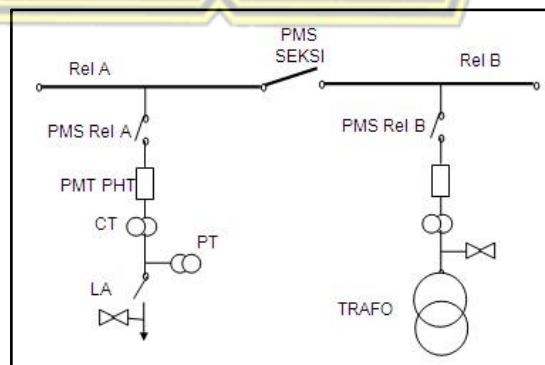
Gardu induk sistem ring busbar adalah gardu induk yang busbarnya berbentuk ring. Pada gardu induk jenis ini semua rel atau busbar yang ada, tersambung (terhubung) satu dengan yang lainnya dan membentuk ring (Cincin).



Gambar 2.5 Gardu Induk Sistem *Ring Busbar*
((Aslimeri, 2008))

2. Gardu Induk Sistem *Single Busbar*

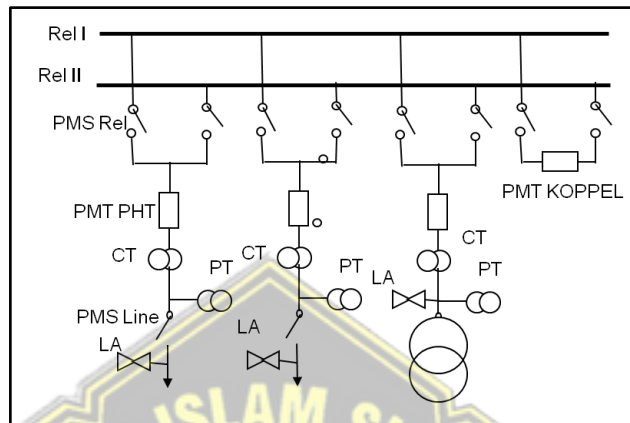
Gardu induk sistem single busbar adalah gardu induk yang mempunyai satu (*single*) busbar. Pada umumnya gardu dengan sistem ini adalah gardu induk yang berada pada ujung (akhir) dari suatu sistem transmisi.



Gambar 2.6 Gardu Induk Sistem *Single Busbar*
((Aslimeri, 2008))

3. Gardu Induk Sistem *Double Busbar*

Gardu induk sistem *double busbar* adalah gardu induk yang mempunyai dua (*double*) busbar. Gardu induk *double busbar* efektif untuk mengurangi terjadinya pemadaman beban, saat manuver sistem. Jenis gardu induk ini yang banyak digunakan.

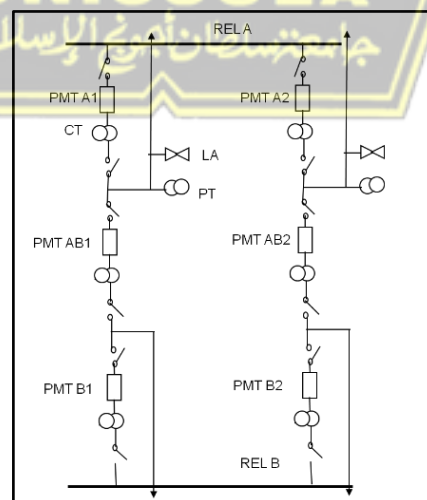


Gambar 2.7 Gardu Induk Sistem *Double Busbar*

((Aslimeri, 2008))

4. Gardu Induk Sistem *On Half Busbar*

Gardu induk sistem satu setengah (*on half*) busbar pada umumnya gardu induk jenis ini dipasang pada gardu induk di pembangkit tenaga listrik atau gardu induk yang berkapasitas besar. Gardu induk ini efektif karena dapat mengurangi pemadaman beban pada saat dilakukan manuver sistem. Sistem ini menggunakan tiga buah PMT dalam satu diagonal yang terpasang secara seri.



Gambar 2.8 Gardu Induk Sistem *One Half Busbar*

((Aslimeri, 2008))

Pada Gardu Induk terdapat peralatan yang terpasang di dalamnya. Berikut merupakan peralatan-peralatan pada Gardu Induk:

1. Busbar atau Rel merupakan titik pertemuan/hubungan antara trafo-trafo tenaga, Saluran Udara TT, Saluran Kabel TT dan peralatan listrik lainnya untuk menerima dan menyalurkan tenaga listrik/daya listrik.
2. *Ligthing Arrester*, biasa disebut dengan Arrester dan berfungsi sebagai pengaman instalasi (peralatan listrik pada instalasi Gardu Induk) dari gangguan tegangan lebih akibat sambaran petir (*ligthing surge*). (PT. PLN (Persero), 2014a)
3. Transformator instrument atau Transformator ukur, Untuk proses pengukuran terdapat beberapa jenis antara lain :
 - a. Transformator Tegangan, adalah trafo satu fasa yang menurunkan tegangan tinggi menjadi tegangan rendah yang dapat diukur dengan Voltmeter yang berguna untuk indikator, relai dan alat sinkronisasi.
 - b. Transformator arus, digunakan untuk pengukuran arus yang besarnya ratusan amper lebih yang mengalir pada jaringan tegangan tinggi. Di samping itu trafo arus berfungsi juga untuk pengukuran daya dan energi, pengukuran jarak jauh dan rele proteksi. (PT. PLN (Persero), n.d.)
 - c. Transformator Bantu (*Auxilliary Transformator*), trafo yang digunakan untuk membantu beroperasinya secara keseluruhan gardu induk tersebut.
4. Sakelar Pemisah (PMS) atau *Disconnecting Switch* (DS) merupakan peralatan yang berfungsi untuk mengisolasi peralatan listrik dari peralatan lain atau instalasi lain yang bertegangan.
5. Sakelar Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB), Berfungsi untuk menghubungkan dan memutuskan rangkaian pada saat berbeban (pada kondisi arus beban normal atau pada saat terjadi arus gangguan). (PT. PLN (Persero), 2014b)
6. Sakelar Pentanahan, Sakelar ini untuk menghubungkan kawat konduktor dengan tanah / bumi yang berfungsi untuk menghilangkan/mentanahkan tegangan induksi pada konduktor pada saat akan dilakukan perawatan atau pengisolasian suatu sistem.

7. Kompensator, alat pengubah fasa yang dipakai untuk mengatur jatuh tegangan pada saluran transmisi atau transformator. SVC (*Static Var Compensator*) berfungsi sebagai pemelihara kestabilan.
8. Peralatan SCADA dan Telekomunikasi, (*Supervisory Control And Data Acquisition*) berfungsi sebagai sarana komunikasi suara dan komunikasi data serta tele proteksi dengan memanfaatkan penghantarnya.
9. Rele Proteksi, alat yang bekerja secara otomatis untuk mengamankan suatu peralatan listrik saat terjadi gangguan, menghindari atau mengurangi terjadinya kerusakan peralatan akibat gangguan.

2.2.3 Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah pengaturan dari satu atau lebih peralatan proteksi, dan peralatan lain yang dimaksudkan untuk melakukan satu atau lebih fungsi proteksi tertentu. Suatu sistem proteksi yang terdiri dari satu atau lebih peralatan proteksi, transformator pengukuran, pengawatan, rangkaian tripping, catu daya dan sistem komunikasi bila tersedia. (PT. PLN (Persero), 2014d)

Tujuan utama sistem proteksi adalah sebagai berikut :

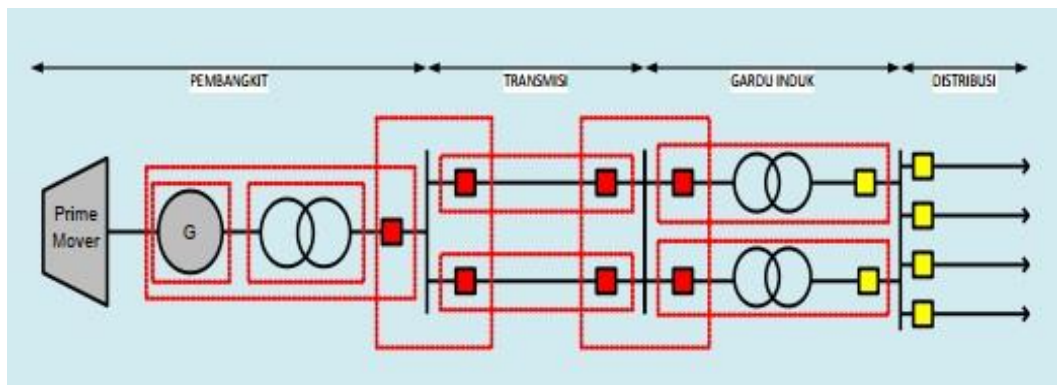
- a. Mendeteksi kondisi abnormal pada sistem tenaga listrik
- b. Memerintahkan trip pada PMT dan memisahkan peralatan yang terganggu dari sistem yang sehat, sehingga sistem dapat terus berfungsi.

Dasar pemilihan proteksi sistem tenaga listrik dan sistem proteksi adalah sebagai berikut : (Karyana, 2013)

- a. Mengurangi kerusakan pada peralatan yang terganggu dan peralatan yang berdekatan dengan titik gangguan.
- b. Mengurangi gangguan meluas
- c. Meminimalisasi durasi gangguan
- d. Meminimalisasi bahaya pada manusia
- e. Memaksimalkan ketersediaan listrik untuk konsumen

Untuk membatasi luasnya sistem tenaga listrik yang terputus saat terjadi gangguan, maka sistem proteksi dibagi dalam zona-zona proteksi. Pada zona perbatasan, zona proteksi harus tumpang tindih (*overlap*) sehingga tidak ada bagian dari sistem yang

tidak terproteksi. Tipikal proteksi dan zona proteksinya ditunjukkan seperti Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Zona Proteksi

((Karyana, 2013))

Masing-masing daerah memiliki satu atau beberapa komponen sistem daya di samping dua buah pemutus rangkaian. Setiap pemutus dimasukkan ke dalam dua daerah proteksi berdekatan. Batas setiap daerah menunjukkan bagian sistem yang bertanggung jawab untuk memisahkan gangguan yang terjadi di daerah tersebut dengan sistem lainnya. Pembagian daerah proteksi ini bertujuan agar daerah yang tidak mengalami gangguan tetap dapat beroperasi dengan baik sehingga dapat mengurangi daerah terjadinya pemadaman.

Dalam menjalankan tugasnya, sistem proteksi harus memenuhi persyaratan desain yang digunakan sebagai dasar untuk mempertimbangkan tipe peralatan atau komponen sistem tenaga listrik yang akan diproteksi. Sistem proteksi harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

a. Sensitif

Sistem proteksi harus mampu mendeteksi sekecil apapun ketidaknormalan sistem dan beroperasi dibawah nilai minimum gangguan. Studi koordinasi sistem proteksi harus dilakukan untuk menentukan sensitivitas seting dan memastikan relai bekerja dengan benar.

b. Selektif

Sistem proteksi harus mampu menentukan daerah kerjanya dan atau fasa yang terganggu secara tepat. Peralatan dan sistem proteksi hanya memisahkan bagian dari jaringan yang sedang terganggu. Zona proteksi harus tepat dan memadai

untuk memastikan bahwa hanya bagian yang terganggu yang dipisahkan dari sistem pada saat terjadi gangguan atau kondisi abnormal.

c. Andal

Kemungkinan suatu sistem proteksi dapat bekerja benar sesuai fungsi yang diinginkan dalam kondisi dan jangka waktu tertentu (IEV 448-12-05). Proteksi diharapkan bekerja pada saat kondisi yang diharapkan terpenuhi dan tidak boleh bekerja pada kondisi yang tidak diharapkan. (SPLN T5.002-1: 2010)

d. Cepat

Elemen sistem proteksi harus mampu memberikan respon sesuai dengan kebutuhan peralatan yang dilindungi untuk meminimalisasi terjadinya gangguan meluas, lama gangguan dan gangguan pada stabilitas sistem. Desain sistem proteksi harus mempertimbangkan kecepatan pemutusan gangguan untuk memisahkan sumber gangguan. Waktu pemutusan gangguan harus memenuhi nilai yang disyaratkan oleh PLN P3B Jawa Bali yang mempertimbangkan waktu kerja relai dan sinyal pembawa (FO/ PLC), waktu kerja PMT dan faktor keamanan.

2.3 Gangguan Sistem Tenaga Listrik

Gangguan dalam sistem tenaga listrik adalah keadaan tidak normal dimana keadaan ini dapat mengakibatkan terganggunya kontinuitas pelayanan tenaga listrik. Sebuah gangguan (*electrical fault*) dapat didefinisikan antara lain :

1. *Electrical flashover*
2. Kegagalan peralatan utama
3. Deviasi parameter elektrik (tegangan, arus, frekuensi, daya) dari batasan nilai normal operasi

Secara umum klasifikasi gangguan pada system tenaga listrik disebabkan oleh 2 faktor, yaitu:

1. Gangguan yang berasal dari sistem (*System Fault*)

Penyebab gangguan dari sistem dibagi menjadi 2 yaitu :

- a. *System Fault Active* yang disebabkan oleh petir, crane, kegagalan isolasi, CT/CVT meledak, gangguan trafo dll
- b. *System Fault Passive* yang disebabkan oleh *over/under frequency*, *power swing*, *overvoltage*, dan *overloading*

2. Gangguan yang berasal dari luar sistem (*Non System Fault*)

Penyebab gangguan yang berasal dari luar sistem antara lain kegagalan sistem proteksi (relai mal operasi, CB *low pressure*, teleproteksi mal operasi dan gangguan DC *ground*), pengaruh lingkungan seperti pohon, binatang dan benda-benda asing serta akibat kecerobohan manusia, Gangguan-gangguan mekanis karena pekerjaan galian saluran lain. Gangguan ini terjadi untuk sistem kelistrikan bawah tanah serta pengaruh cuaca seperti hujan, angin, serta surja petir.

Bila ditinjau dari segi lamanya waktu gangguan, maka dapat dikelompokkan menjadi :

1. Gangguan yang bersifat temporer (*Temporer Fault*)

Gangguan ini merupakan gangguan yang dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya. Gangguan sementara jika tidak dapat hilang dengan segera, baik hilang dengan sendirinya maupun karena bekerjanya alat pengaman dapat berubah menjadi gangguan permanen.

2. Gangguan yang bersifat permanen (*Permanent Fault*)

Gangguan ini untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan dan atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut. Untuk gangguan yang bersifat sementara setelah arus gangguannya terputus misalnya karena terbukanya *circuit breaker* oleh relai pengamannya, peralatan atau saluran yang terganggu tersebut siap dioperasikan kembali. Sedangkan pada gangguan permanen terjadi kerusakan yang bersifat permanen sehingga baru bisa dioperasikan kembali setelah bagian yang rusak diperbaiki atau diganti. Pada saat terjadi gangguan akan mengalir arus yang sangat besar pada fasa yang terganggu menuju titik gangguan, di mana arus gangguan tersebut mempunyai harga yang jauh lebih besar dari rating arus maksimum yang diizinkan, sehingga terjadi kenaikan temperatur yang dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan listrik yang digunakan.

2.4 Transformator Tenaga

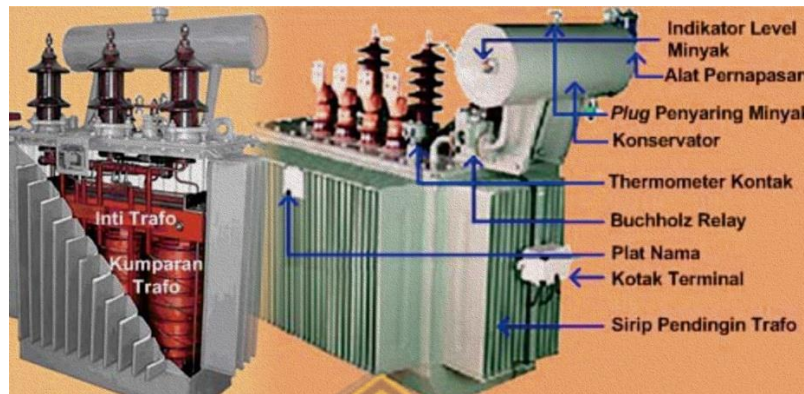
Trafo merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari 2 atau lebih belitan, secara induksi elektromagnetik, mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076 -1 tahun 2011). Trafo menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum ampere dan induksi faraday, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet / fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi. Berdasarkan fungsinya trafo tenaga dapat dibedakan menjadi trafo pembangkit, trafo gardu induk/penyaluran, dan trafo distribusi. (Sumardjati, 2008)

Pada sistem penyaluran atau transmisi transformator tenaga merupakan komponen utama yang harus ada dalam gardu induk karena fungsi gardu induk yang utama adalah untuk menurunkan dan menaikkan tegangan. Transformator tenaga berfungsi mentransformasikan daya listrik, dengan merubah besaran tegangannya, sedangkan frekuensinya tetap. Transformator tenaga juga berfungsi untuk pengaturan tegangan. Transformator tenaga dalam menjalankan fungsinya dilengkapi dengan trafo pentanahan yang berfungsi untuk mendapatkan titik neutral dari trafo daya. Peralatan ini disebut *Neutral Current Transformer* (NCT). Berikut merupakan gambar transformator tenaga yang ada pada gardu induk. (Sumardjati, 2008)



Gambar 2.10 Transformator Tenaga
((PT. PLN (Persero), 2014e))

Suatu transformator tenaga terdiri atas beberapa komponen dalam menjalankan pengoperasiannya. Di mana setiap komponen tersebut memiliki fungsinya masing-masing.



Gambar 2.11 Komponen Transformator Tenaga

((PT. PLN (Persero), 2014e))

Berikut merupakan penjelasan dari fungsi komponen-komponen transformator tenaga:

1. Inti Besi

Inti trafo atau inti besi adalah komponen yang berfungsi untuk memudahkan jalan fluksi magnetik yang timbul akibat arus listrik melalui kumparan. Inti besi ini sendiri terbuat dari lempengan besi pipih yang memainkan peran sebagai isolator untuk mengurangi panas.

2. Kumparan Trafo

Kumparan trafo merupakan komponen yang berbentuk lilitan kawat dengan fungsi isolasi yang membentuk gulungan atau kumparan. Kumparan itu sendiri terdiri dari kumparan primer dan juga kumparan sekunder yang pada praktiknya dilakukan mekanisme isolasi baik itu terhadap inti besi maupun antar kumparan dengan isolasi bentuk padat seperti pertinak, karton dan lain sebagainya.

3. Minyak trafo

Minyak trafo merupakan salah satu komponen paling butuh perhatian karena minyak trafo merupakan bahan isolasi cair yang dimaksudkan untuk pendingin pada trafo. Minyak trafo ini memiliki senyawa hidrokarbon di dalamnya yang antara lain hidrokarbon aromatik, naftenik dan juga parafinik.

4. Bushing

Bushing trafo merupakan komponen yang menjadi penghubung antara kumparan trafo dengan jaringan luarnya, selain itu bushing juga menjadi penyekat antara konduktor tadi dengan tangki trafo. Terdapat fasilitas pada bushing yang dapat digunakan untuk menguji kondisi bushing yang kerap disebut sebagai *center tap*.

5. Tangki konservator

Fungsi dari tangki yang satu ini adalah untuk menampung minyak serta uap yang diakibatkan dari pemanasan trafo. Relai bucholz dipasangkan diantara tangki dengan trafo agar gas produksi yang diakibatkan kerusakan minyak dapat terserap. Supaya minyak tidak terkontaminasi dengan air maka ujung masuk dari saluran udara yang melalui saluran pelepasan dilengkapi pula dengan media penyerap yang biasa disebut silica gel bagian ini biasa juga disebut plug penyaring minyak. Pada tangki konservator juga terdapat indikator level minyak untuk melihat level minyak yang ada pada transformator agar dapat dipantau secara visual oleh petugas.

6. Tap changer

Tap changer merupakan alat yang satu ini dirancang untuk mengatur tegangan supaya tegangan selalu dalam kondisi yang baik, stabil dan berkelanjutan. Sebab kadang kala kualitas suatu operasi tenaga listrik di awal seting sesuai dengan apa yang ditentukan namun kerap kali terjadi penurunan tegangan sehingga kualitasnya lambat laun menurun.

7. Dehydrating Breather

Dehydrating Breather merupakan alat pernapasan transformator. Naik turunnya beban transformator dan suhu udara sekeliling transformator, mengakibatkan suhu minyak berubah ubah mengikuti perubahan tersebut. Bila suhu minyak naik, minyak memuai dan mendesak udara diatas permukaan minyak keluar dari tangki dan bila suhu turun sebaliknya udara akan masuk. Keadaan ini merupakan proses pernapasan transformator. Tetapi udara luar yang lembab akan menurunkan nilai tegangan tembus minyak. Untuk mencegah hal itu transformator dilengkapi dengan alat pernapasan yang berupa tabung berisi zat higroskopis, seperti kristal silikagel.

8. Indikator

Terdapat beberapa indikator dalam trafo seperti indikator permukaan minyak, termometer dan beberapa indikator lain yang bertujuan untuk mengetahui kondisi baik permukaan minyak maupun suhu yang ada di trafo untuk memudahkan petugas dalam melakukan inspeksi visual.

9. Peralatan Proteksi

Untuk mendukung mekanisme kerja trafo maka trafo pun dilengkapi peralatan proteksi internal yang meliputi relai bucholz, relai jansen, relai *sudden pressure*, dan relai termal.

10. Alat tambahan

Alat tambahan ini misalnya pemadam kebakaran yang dapat digunakan pada keadaan-keadaan darurat, alat ini biasanya disebut dengan sergi.

2.5 Proteksi Transformator Tenaga

Pada transformator tenaga terdapat dua jenis proteksi, yakni proteksi dengan relai elektrik dan proteksi dengan relai mekanik. Berikut merupakan proteksi yang terdapat pada transformator tenaga. (PT. PLN (Persero), 2014d)

2.5.1 Relai Elektrik

Relai elektrik merupakan relai proteksi pada *bay* transformator yang digunakan sebagai proteksi utama maupun proteksi cadangan. Relai elektrik ini terletak di satu panel kontrol dengan dengan proteksi utama atau *main protection* yang terdiri atas satu relai tetapi disetting untuk dua fungsi yaitu relai diferensial dan relai *Restricted Earth Fault* yang memiliki prinsip kerja dengan membandingkan arus antar *Current Transformer* (CT) dan mengamankan daerah kerjanya tersebut, di mana relai diferensial berfungsi untuk mengamankan dari gangguan antar fasa dan relai REF untuk mengamankan gangguan fasa ke tanah. Sedangkan untuk proteksi cadangannya digunakan pula satu relai yang disetting untuk dua fungsi yaitu *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) yang memiliki prinsip kerja membaca arus gangguan pada *bay* tersebut dan bekerja saat melebihi settingnya, di mana OCR berfungsi untuk mengamankan dari gangguan antar fasa dan relai GFR untuk mengamankan gangguan fasa ke tanah. Tampilan dari relai elektrik dapat dilihat pada gambar 2.12. (samaulah, 2004)



Keterangan:

1. Kontak untuk memasukan test plug
2. Keypad
3. Indikasi Rele

Gambar 2.12 Relai Elektrik Tipe RET 670

Berikut penjabaran dari relai elektrik yang merupakan salah satu jenis pengaman pada *bay* transformator (PT. PLN (Persero), 2014d):

a. Relai Diferensial

Mengamankan transformator dari gangguan hubung singkat yang terjadi di dalam, antara lain hubung singkat antara kumparan dengan kumparan atau antara kumparan dengan tangki. Relai diferensial merupakan suatu relai yang bekerjanya berdasarkan perbedaan arus (besaran dan sudut) yang melalui daerah pengamanan. Relai bekerja jika terjadi gangguan di daerah pengamanan, dan tidak boleh bekerja dalam keadaan normal atau gangguan di luar daerah pengamanan. Parameter diferensial yang umumnya dipergunakan adalah:

1. Nilai arus kerja minimum, merupakan setelan arus minimal yang akan mengerjakan relai pada nilai arus restrain = 0
2. Nilai arus kerja high set, merupakan setelan arus kerja *high set* untuk arus gangguan yang besar (bila dilengkapi).
3. Nilai *slope*, merupakan perbandingan pertambahan nilai arus diferensial terhadap pertambahan nilai arus restraint.
4. 2nd *harmonic restraint*, merupakan nilai minimal harmonisa ke-2 yang akan memblok kerja diferensial relai. Harmonisa ke-2 ini merupakan parameter ada tidaknya *inrush current*. Karena sifatnya memblok kerja diferensial maka, harus diperhatikan nilai setelan akan memblok kerja diferensial ketika terjadi gangguan.

5. 5th *harmonic restraint*, merupakan nilai minimal harmonisa ke-5 yang akan memblok kerja diferensial relai. Harmonisa ke-5 ini merupakan parameter ada tidaknya *over* eksitasi pada transformator.

b. *Restricted Earth Fault* (REF)

Merupakan salah satu proteksi utama transformator atau reaktor yang prinsip kerjanya sama dengan relai diferensial, perbedaannya REF dipergunakan untuk pengamanan transformator atau reaktor terhadap gangguan fasa – tanah, khususnya yang dekat dengan titik bintang transformator atau reaktor. REF dipasang pada belitan transformator atau reaktor dengan konfigurasi Y yang ditanahkan. REF terdiri dari 2 jenis, yaitu:

1. REF jenis *low impedance*, parameter kerjanya adalah arus minimum.
2. REF jenis *high impedance*, parameter kerjanya adalah tegangan minimum ataupun arus minimum. (Karyana, 2013)

c. Relai Arus Lebih (OCR) dan Relai Gangguan ke Tanah (GFR)

Merupakan proteksi cadangan transformator atau reaktor tetapi dapat menjadi proteksi utama pada proteksi kapasitor. Relai arus lebih bekerja jika terjadi gangguan hubung singkat antar fasa baik internal maupun eksternal pada transformator dan harus dikoordinasikan dengan pengaman sistem (arus dan waktunya). Sedangkan relai gangguan tanah yaitu relai yang bekerja saat terjadi gangguan hubung singkat fasa - tanah baik internal maupun eksternal pada transformator dan harus dikoordinasikan dengan pengaman sistem (arus dan waktunya). Parameter OCR/GFR umumnya adalah: (PT. PLN (Persero), 2014c)

1. Nilai arus kerja minimum, merupakan setelan arus minimal yang akan mengerjakan relai,
2. Nilai arus *reset/drop off*, merupakan besaran arus yang menyebabkan relai reset setelah mengalami *pick up*.
3. Nilai arus kerja *high set*, merupakan setelan arus kerja *high set* untuk arus gangguan yang besar.
4. Karakteristik waktu kerja, merupakan parameter pemilihan kurva waktu kerja.

5. Nilai waktu kerja, merupakan setelan waktu kerja relai berdasarkan karakteristik yang telah ditentukan yaitu karakteristik *long time inverse*, *standard inverse*, *very inverse*, *extremly inverse* dan *definite*.

2.5.2 Relai Mekanik

Relai mekanik merupakan relai yang berfungsi sebagai pengaman internal pada transformator tenaga. Relai ini terdapat beberapa jenis yang kerjanya dipengaruhi oleh minyak transformator maupun dipengaruhi oleh suhu baik suhu minyak maupun belitan. Berikut merupakan jenis relai mekanik pada transformator tenaga.

a. Relai Bucholz

Pada saat trafo mengalami gangguan internal yang berdampak kepada suhu yang sangat tinggi dan pergerakan mekanis di dalam trafo, maka akan timbul tekanan aliran minyak yang besar dan pembentukan gelembung gas yang mudah terbakar. Tekanan atau gelembung gas tersebut akan naik ke konservator melalui pipa penghubung dan relai bucholz. Tekanan minyak maupun gelembung gas ini akan dideteksi oleh relai bucholz sebagai indikasi telah terjadinya gangguan internal. Relai bucholz mengindikasikan Alarm saat gas yang terbentuk terjebak di rongga relai bucholz dengan mengaktifkan satu pelampung dan mengindikasikan trip saat saat muncul tekanan minyak yang tinggi ke arah konservator.



Gambar 2.13 Relai Bucholz

((PT. PLN (Persero), 2014e))

b. Relai Jansen

Sama halnya seperti relai bucholz yang memanfaatkan tekanan minyak dan gas yang terbentuk sebagai indikasi adanya ketidaknormalan atau gangguan, hanya saja relai ini digunakan untuk memproteksi kompartemen OLTC. Relai ini juga

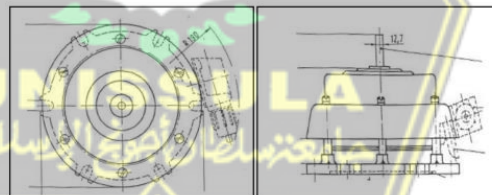
dipasang pada pipa saluran yang menghubungkan kompartemen OLTC dengan konservator.



Gambar 2.14 Relai Jansen
((PT. PLN (Persero), 2014e))

c. Relai *Sudden Pressure*

Relai *sudden pressure* ini didesain sebagai titik terlemah saat tekanan di dalam trafo muncul akibat gangguan. Dengan menyediakan titik terlemah maka tekanan akan tersalurkan melalui *sudden pressure* dan tidak akan merusak bagian lainnya pada maintank.



Gambar 2.15 Relai *Sudden Pressure*
((PT. PLN (Persero), 2014e))

d. Relai Termal

Suhu pada trafo yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, rugi-rugi pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada trafo. Untuk mengetahui suhu operasi dan indikasi ketidaknormalan suhu operasi pada trafo digunakan relai termal. Relai termal ini terdiri dari sensor suhu berupa *thermocouple*, pipa kapiler dan meter penunjukan.

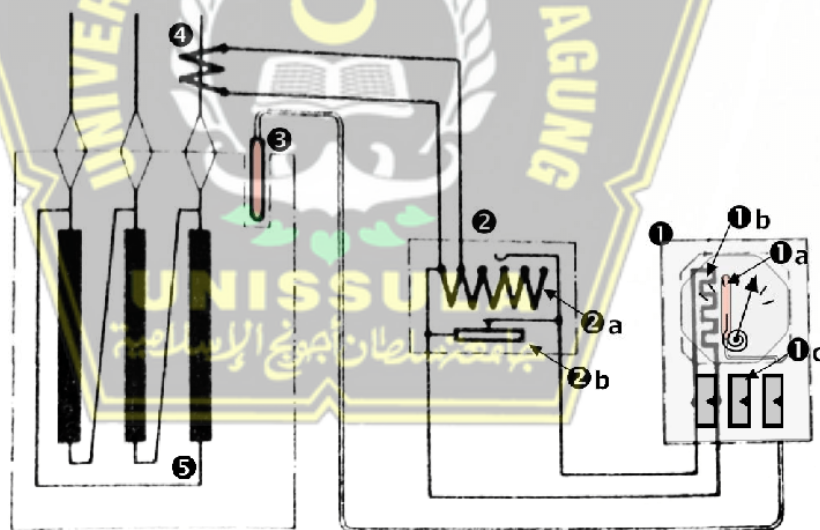
Metoda proteksi termal relai trafo digunakan untuk mendeteksi gangguan transformator yang tidak dapat terukur oleh relai elektrik (IEEE Std C37.91-2000). Pada relai *thermal* ini terdapat dua macam relai yakni relai suhu minyak dan relai suhu belitan.(nur sulistyawati, 2021)

1. Relai Suhu Minyak (OTI)

Berfungsi untuk mengamankan dan mencegah transformator dari kerusakan isolasi belitan akibat adanya panas yang berlebih.

2. Relai Suhu Belitan (WTI)

Berfungsi untuk mengamankan dan mencegah transformator dari kerusakan isolasi belitan akibat adanya panas berlebih pada belitan. Prinsip kerja mendeteksi suhu belitan secara tidak langsung menggunakan CT yang outputnya dikompensasi dengan heater coil atau resistansi . CT terpasang pada bushing trafo sebagai pembanding dengan thermocouple yang direndam minyak trafo. Seting relai suhu belitan ini terdiri dari fan off, fan on, alarm dan seting trip.



Gambar 2.16 Relai *Thermal* (OTI/WTI)

((PT. PLN (Persero), 2014e))

1. Thermometer
2. Perangkat penyesuaian arus (heater coil / resistansi)
3. Sensor suhu minyak
4. CT bushing
5. Belitan trafo.

2.6 Teori Termal Transformator

Hukum Termal menentukan bahwa aliran fluks termal dari temperatur yang lebih tinggi ke bagian temperatur yang lebih rendah, sampai tercapai kesetimbangan termal. Transisi suhu panas di antara bagian-bagian yang lebih tinggi dan lebih rendah dapat dicapai melalui konduksi, konveksi dan radiasi. Masing-masing mekanisme perpindahan panas bergantung pada karakteristik bahan tertentu (kapasitas termal, dan koefisien konduktivitas, konveksi, radiasi), bahan anisotropi atau isotropi, parameter geometric, beberapa karakteristiknya tergantung pada suhu. Perpindahan panas dari sumber panas ke medium pendingin dapat dibagi menjadi empat bagian:

1. Dari bagian dalam komponen aktif (gulungan dan inti) ke permukaan luarnya yang berhubungan dengan minyak, di sini mekanisme perpindahan panas terutama disebabkan konduktivitas;
2. Dari permukaan luar bagian aktif, ke minyak, di sini mekanisme perpindahan panas ini terutama disebabkan oleh konveksi minyak;
3. Dari minyak ke permukaan luar tangki; dengan mengabaikan lebar tangki (di mana perpindahan panas disebabkan konduktivitas) dapat disumsikan bahwa konveksi minyak adalah mekanisme utama perpindahan panas;
4. Dari bagian luar permukaan tangki ke media pendinginan luar (udara); di sini, panas yang hilang dengan konveksi udara dan radiasi.

2.7 Pendinginan Transformator

Panas yang timbul pada belitan maupun inti transformator pada saat transformator dibebani tidak boleh berlebihan karena dapat merusak dan menurunkan tahanan isolasi belitan. Untuk mengatasi agar panas yang timbul tidak berlebihan maka digunakan minyak pendingin transformator. Selain pendingin, minyak pendingin transformator juga berfungsi sebagai isolator. Selain itu pendinginan transformator juga terjadi secara alami, yaitu berupa udara di sekitar transformator tersebut.

Menurut jenis pendinginnya, transformator dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu: (PT. PLN (Persero), 2014d)

1. *Dry Type Transformer*

Transformator jenis ini paling mudah dalam pengoperasiannya, karena sistem pendinginan secara alamiah dengan memanfaatkan udara di sekitar transformator sehingga tidak memerlukan biaya dalam perawatan.

2. *Oil-Immersed Transformer*

Pada transformator ini terbagi atas beberapa macam, yaitu:

- a. *Natural cooling*; Pendinginan ini bekerja sendiri dan hanya dibantu dengan pemasangan radiator untuk sirkulasi minyaknya.
- b. *Air blast cooling*; Pendinginan ini dibantu dengan pemasangan radiator dan kipas angin (*blower*).
- c. *Forced Oil Circulation*; Pendinginan ini terbagi tiga yaitu:
 1. *Natural cooling* dengan sirkulasi minyak
 2. *Airblast cooling* dengan sirkulasi minyak
 3. *Water cooling* dengan sirkulasi minyak

Sebagai lambang pengenal dalam jenis pendinginan pada transformator dikenal empat jenis lambang pengenal yaitu:

1. Transformator ONAN (*Oil Natural Air Natural*), ialah transformator dengan minyak sebagai pendingin belitan yang bersirkulasi secara alamiah dan udara sebagai pendingin luar yang bersirkulasi secara alamiah pula.
2. Transformator ONAF (*Oil Natural Air Forced*), ialah transformator dengan minyak sebagai pendingin belitan yang bersirkulasi secara alamiah dan udara sebagai pendingin luar yang bersirkulasi secara paksa atau buatan.
3. Transformator OFAF (*Oil Forced Air Forced*), ialah transformator dengan minyak sebagai pendingin belitan yang bersirkulasi secara paksa atau buatan dan udara sebagai pendingin luar yang bersirkulasi secara paksa atau buatan.
4. Transformator OFWF (*Oil Forced Water Forced*) ialah transformator dengan minyak sebagai pendingin belitan yang bersirkulasi secara paksa atau buatan dan air sebagai pendingin luar yang bersirkulasi secara paksa atau buatan.

2.8 Minyak Transformator

Minyak transformator memiliki peran yang signifikan dalam kinerja transformator. Minyak transformator memiliki beberapa fungsi antara lain: (Kunto Wibowo et al., n.d.)

1. Insulator yaitu mengisolasi kumparan di dalam trafo agar tidak terjadi loncatan bunga api listrik (hubung singkat) akibat tegangan tinggi.
2. Pendingin yaitu mengambil panas yang diakibatkan beban lalu melepaskannya. Panas perlu dilepaskan karena kenaikan suhu akibat pembebanan dapat merusak isolasi lilitan transformator.
3. Pelindung yaitu sebagai pelindung komponen-komponen di dalam trafo terhadap korosi dan oksidasi. Untuk itu minyak trafo harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :
 - a. Kekuatan isolasi harus tinggi (lebih dari 10 kV/mm).
 - b. Dapat menyalurkan panas dengan baik, berat jenis kecil sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
 - c. Viskositas yang rendah, agar lebih mudah bersirkulasi dan memiliki kemampuan pendingin yang lebih baik.
 - d. Titik nyala yang tinggi (minimum 140°C), untuk mencegah terlalu banyak hilangnya minyak menjadi gas yang dapat menimbulkan bahaya kebakaran.
 - e. Tidak bereaksi terhadap material lain sehingga tidak merusak material isolasi padat.

2.9 Suhu Lingkungan (*Ambeient*)

Transformator daya yang digunakan di Indonesia, baik produksi lokal maupun produksi luar negeri, kebanyakan didesain untuk digunakan pada suhu lingkungan 20°C, sesuai dengan standar IEC. Sementara data dari Badan Meteorologi dan Geofisika menunjukkan bahwa Indonesia mempunyai suhu lingkungan rata-rata 30°C.

Standar pembebanan transformator daya menggunakan standar IEC yang telah ditetapkan menjadi standar PLN. Berdasarkan standar PLN tersebut, dijelaskan bahwa pada suhu titik-panas belitan sebesar 98°C (110°C Standar IEEE), maka transformator daya akan mengalami pemburukan isolasi yang normal. Suhu 98°C

ini ditetapkan berdasarkan suhu sekitar (lingkungan) sebesar 20°C, (30°C Standar IEEE). Dengan kata lain bahwa transformator daya tidak akan mengalami kenaikan susut-umur jika suhu titik-panas (*hot-spot temperature*) tidak melebihi nilai 98°C (110°C untuk Standar IEEE).

Suhu lingkungan (*ambient temperature*) adalah suhu udara sekeliling transformator. Untuk transformator pasangan luar yang berpendingin udara, suhu lingkungan yang diambil adalah suhu udara dimana transformator tersebut ditempatkan. Jika suhu lingkungan berubah-ubah selama pembebanan, maka digunakan nilai suhu lingkungan efektif. Suhu lingkungan efektif (*weighted ambient temperature*) adalah suhu lingkungan yang konstan pada selang waktu tertentu yang menyebabkan penuaan yang sama dengan pengaruh suhu lingkungan yang berubah-ubah pada selang waktu tersebut (hari, bulan, tahun).

2.10 Isolasi pada Transformator

Isolasi yang digunakan pada transformator secara umum dapat dibagi dua unsur, yaitu :

- a. Isolasi padat
- b. Isolasi cair

Isolasi sendiri merupakan suatu sifat bahan yang mampu untuk memisahkan dua buah penghantar atau lebih yang berdekatan baik secara elektrik dan juga untuk memperkecil arus bocor yang diakibatkan oleh korosif atau tekanantekanan yang terjadi baik pada saat pengoperasian, transportasi ke tempat pemasangan maupun pada saat pengujiannya. Kegagalan transformator bekerja biasanya diakibatkan oleh kegagalan sistem isolasinya, sebagai akibat dari kegagalan sistem isolasi tersebut menyebabkan banyaknya efek panas yang terjadi dalam trafo.

Ketahanan sistem isolasi pada peralatan listrik sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti suhu, kekuatan listrik dan mekanik, getaran, proses kimia dll. Suhu dalam peralatan listrik sering sekali mempengaruhi material isolasi oleh karena itu suhu kumparan maupaun suhu minyak tidak boleh melampaui nilai suhu standar yang telah dibuat, sehingga isolasi trafo tidak mudah rusak.

2.11 TROF dan TROD

Transformer Outage Frequency (TROF) dan *Transformer Outage Duration* (TROD) merupakan dua aspek yang masuk dalam kinerja unit terkait kinerja transformator yang beroperasi dalam unit transmisi tertentu. Aspek ini memiliki standar tertentu untuk mengetahui ketika terjadi gangguan masuk ke dalam kinerja tersebut atau tidak. Standarnya apabila semakin sedikit gangguan maupun durasi durasi gangguan nilai *Transformer Outage Frequency* (TROF) maupun *Transformer Outage Duration* (TROD) akan semakin kecil dan artinya kinerja unit meningkat.

2.11.1 *Transformer Outage Frequency* (TROF)

Transformer Outage Frequency (TROF) adalah jumlah kali gangguan rata-rata pada setiap unit trafo gardu induk dalam suatu periode. Dalam menentukan nilai TROF dapat dihitung dengan formula sebagai berikut:

$$TROF = \frac{\sum \text{kali trafo GI padam karena gangguan}}{\sum \text{trafo GI beroperasi}} \quad (2.1)$$

Berikut merupakan acuan yang digunakan dalam menentukan nilai TROF:

- Gangguan yang diakibatkan oleh akibat pekerjaan pihak lain, bencana alam, dan distribusi (uncontrollable) tidak diperhitungkan dalam gangguan kinerja. Untuk gangguan akibat pekerjaan pihak lain akan diperhitungkan dalam kinerja pengurang.
- Total trafo beroperasi adalah seluruh trafo yang telah beroperasi pada tanggal 01 Januari tahun berjalan termasuk trafo baru dan trafo dalam masa garansi.
- Gangguan pada trafo baru, mulai dihitung setelah 3 bulan beroperasi.
- Pada saat penormalan apabila trip kembali tetap diperhitungkan sebagai gangguan.
- Data gangguan untuk perhitungan kinerja adalah berdasarkan data dari *legacy Forced Outage Information System* (FOIS).

2.11.2 *Transformer Outage Duration* (TROD)

Transformer Outage Duration (TROD) adalah lamanya gangguan rata-rata pada setiap unit trafo gardu induk dalam suatu periode. Lama gangguan per unit trafo dihitung sejak gangguan terjadi, hingga trafo normal operasi kembali atau hingga

adanya deklarasi pernyataan ketidaksiapan peralatan. Dalam menentukan nilai TROD dapat dihitung dengan formula sebagai berikut:

$$TROD = \frac{\sum_{i=1}^n \text{lama trafo GI padam karena gangguan}}{\sum \text{trafo GI beroperasi}}$$

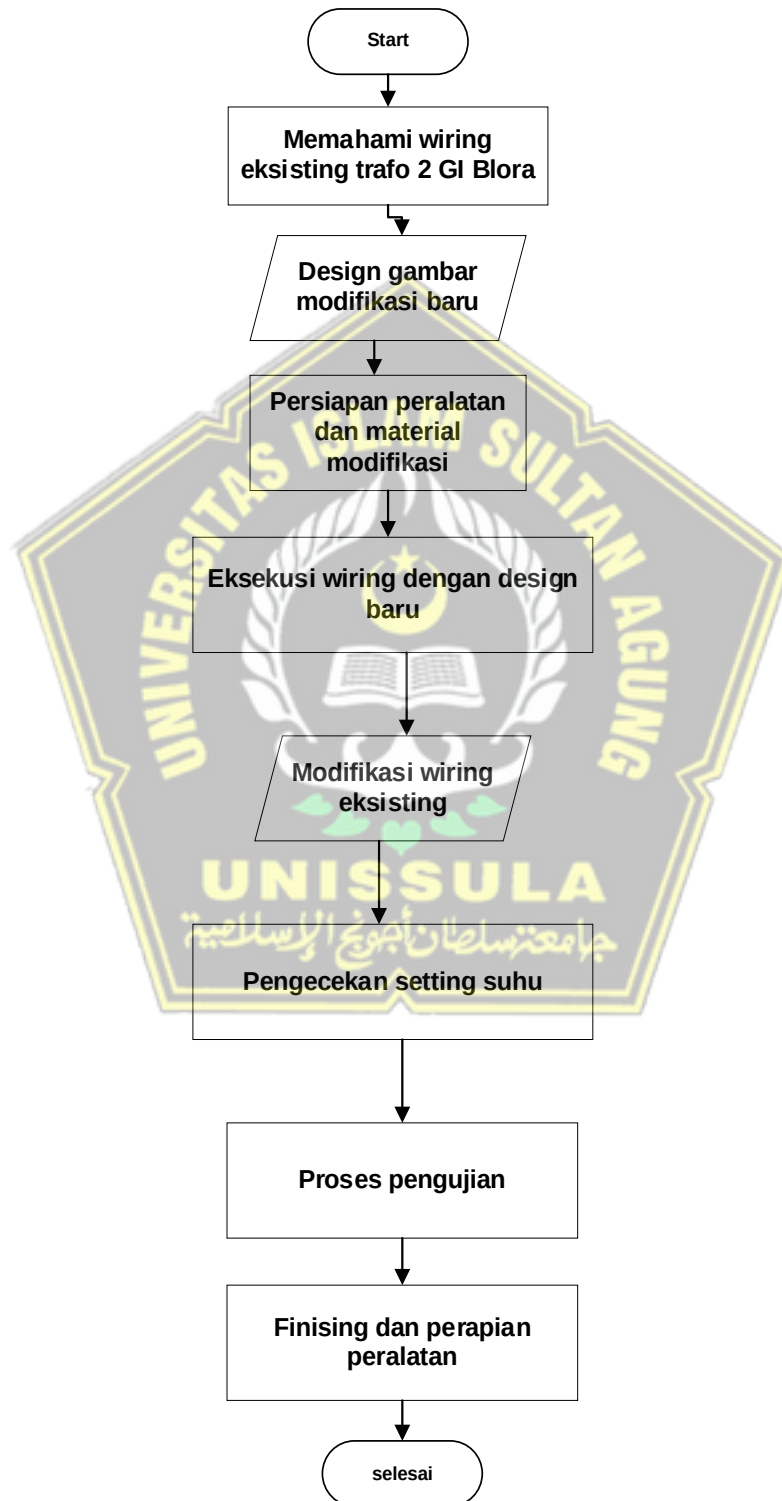
Berikut merupakan acuan yang digunakan dalam menentukan nilai TROD:

- a. Durasi gangguan trafo dihitung sejak gangguan terjadi (sisi sumber trip) sampai trafo normal operasi kembali (sisi sumber masuk) atau hingga adanya deklarasi pernyataan ketidaksiapan peralatan.
- b. Metode penutupan durasi gangguan dapat menggunakan deklarasi pernyataan ketidaksiapan peralatan melalui pesan singkat dari MULTG kepada dispatcher dengan tembusan MUPT. Selanjutnya disusulkan dengan surat resmi dari UPT ke UP2B/UIP2B. Metode penutupan durasi gangguan ini berlaku untuk case gangguan yang mengalami kerusakan peralatan dan membutuhkan waktu lama untuk perbaikan atau penggantian peralatan.
- c. Gangguan yang diakibatkan oleh akibat pekerjaan pihak lain, bencana alam, dan distribusi (*uncontrollable*) tidak diperhitungkan dalam gangguan kinerja. Untuk gangguan akibat pekerjaan pihak lain akan diperhitungkan dalam kinerja pengurang.
- d. Total trafo beroperasi adalah seluruh trafo yang telah beroperasi pada tanggal 01 Januari tahun berjalan termasuk trafo baru dan trafo dalam masa garansi.
- e. Gangguan pada trafo baru, mulai dihitung setelah 3 bulan beroperasi.
- f. Pada saat penormalan apabila trip kembali tetap diperhitungkan sebagai gangguan.
- g. Data gangguan untuk perhitungan kinerja adalah berdasarkan data dari *legacy Forced Outage Information System (FOIS)*.

BAB III

METODE PENELITIAN

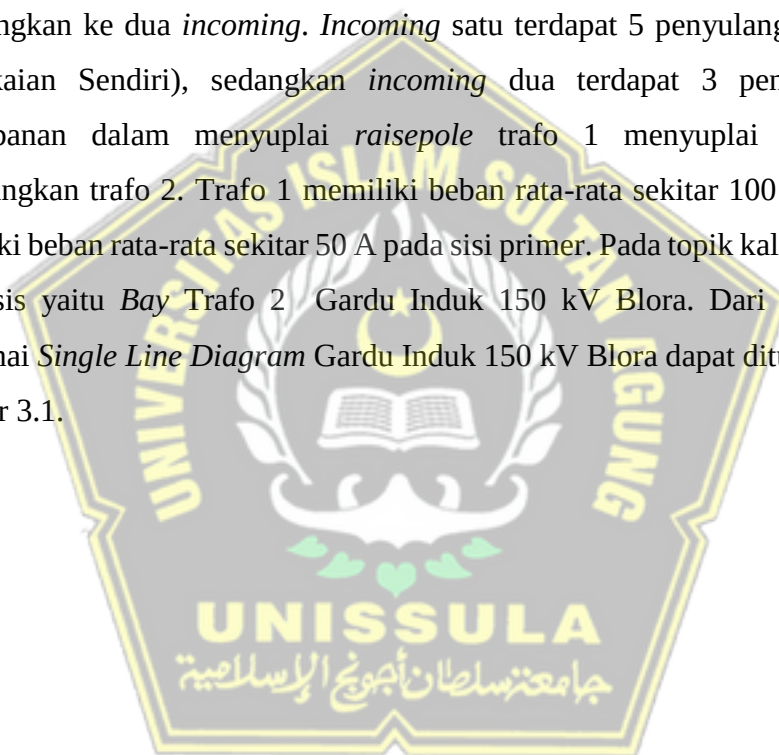
3.1 Flow Chart

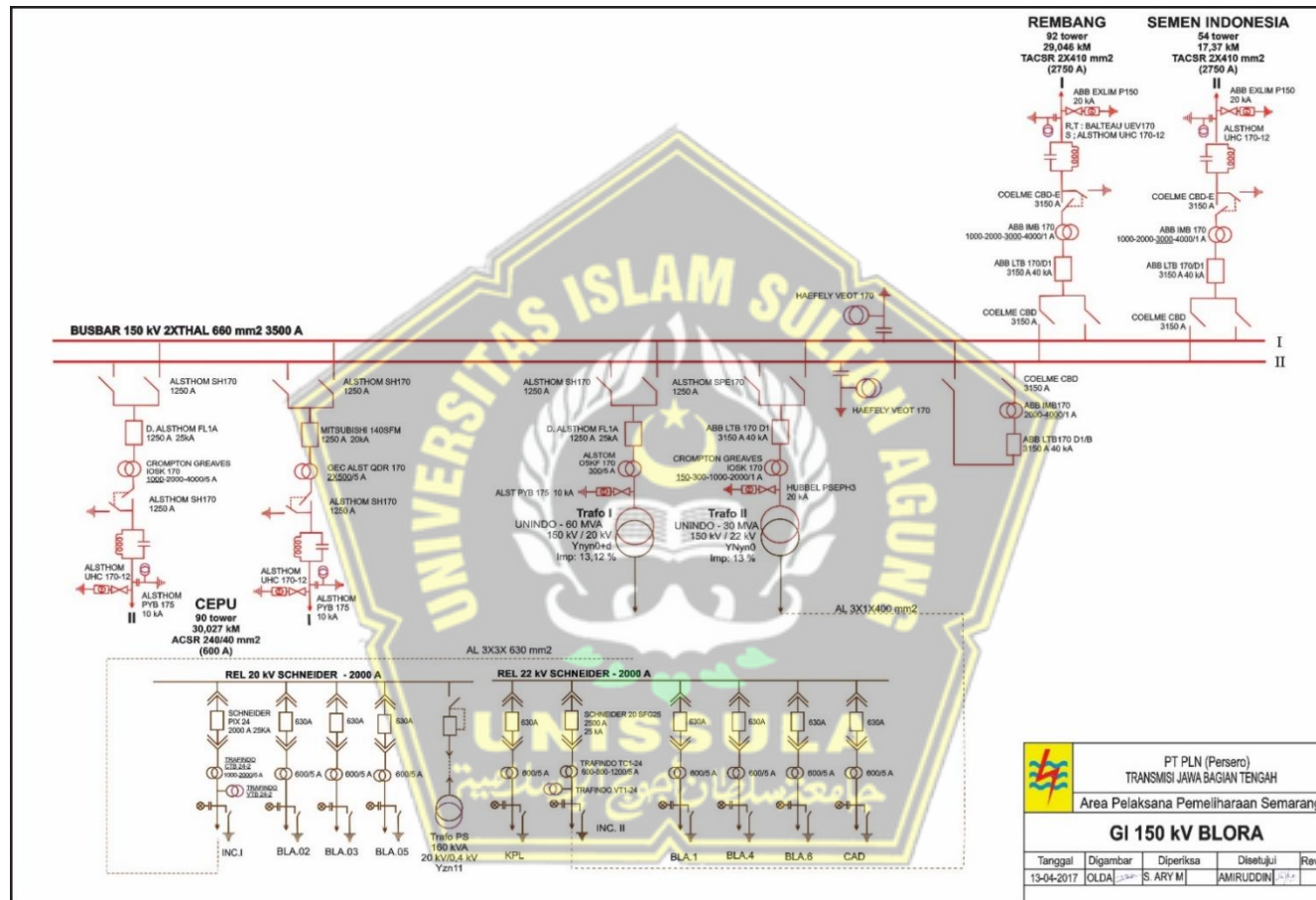


3.2 Model Penelitian

Model dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah dengan melakukan modifikasi wiring pada Trafo 2 Gardu Induk Blora. Gardu Induk Blora merupakan salah satu gardu induk di wilayah ULTG Rembang dengan tegangan kerja 150 kV yang masuk ke dalam sub sistem Tanjung Jati. Gardu Induk Blora memiliki 7 bay, yang terdiri atas 4 bay penghantar, 2 bay trafo, dan bay kopel. Bay Penghantar pada Gardu Induk Blora yaitu Bay Cepu 1, Bay Cepu 2, Bay Semindo 1, dan Bay Semindo 2

Selain itu, Gardu Induk Blora memiliki 2 bay trafo untuk penyaluran energi dengan masing- masing kapasitas trafonya sebesar 60 MVA dan 30 MVA yang dihubungkan ke dua *incoming*. *Incoming* satu terdapat 5 penyulang dan trafo PS (Pemakaian Sendiri), sedangkan *incoming* dua terdapat 3 penyulang. Pada pembebanan dalam menyuplai *raisepole* trafo 1 menyuplai lebih banyak dibandingkan trafo 2. Trafo 1 memiliki beban rata-rata sekitar 100 A dan trafo 2 memiliki beban rata-rata sekitar 50 A pada sisi primer. Pada topik kali ini yang akan dianalisis yaitu Bay Trafo 2 Gardu Induk 150 kV Blora. Dari uraian di atas mengenai *Single Line Diagram* Gardu Induk 150 kV Blora dapat ditunjukkan pada Gambar 3.1.





Gambar 3. 1 *Single Line Diagram* Gardu Induk Blora

(Sumber: PT PLN (Persero) Gardu Induk Blora, 2022)

3.3 Data Spesifikasi Transformator

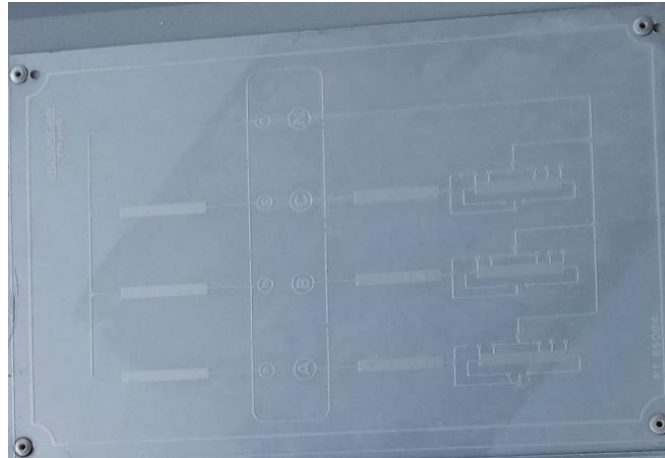
Transformator 2 pada Gardu Induk Blora 30 MVA yang menyuplai sebanyak 3 penyulang yakni Penyulang BLA 1, BLA 4, dan BLA 6. Berikut merupakan data spesifikasi Transformator 2 Gardu Induk Blora.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Transformator 2 Gardu Induk Blora

Trafo GI Rembang	Trafo II
Merk	UNINDO
Nomor Seri	A.861534-01
Tahun Operasi	1987
Standar	IEC 76 - 1976
Tegangan dan Daya	150 kV/22 kV dan 30 MVA
Arus Primer/Arus Sekunder	115 A/787 A
Impedansi	13%
Sistem Pendingin	ONAF
Frekuensi	50 Hz
Hubungan Belitan	YNyn0+d
Kapasitas Arus Hubung Singkat (2 detik)	HV = 6,5 kA LV = 12,5 kA
Referensi Suhu Lingkungan	30°C
Tipe Minyak	NYNAS NYTRO LIBRA

Sumber : GI Blora PT. PLN (Persero) ULTG Rembang

Transformator 2 Gardu Induk Blora memiliki reaktansi trafo (X_{tr}) sebesar 13% dan menggunakan sistem pendingin ONAF dengan minyak sebagai pendingin belitan yang bersirkulasi secara alamiah dan udara sebagai pendingin luar yang bersirkulasi secara paksa atau buatan untuk ONAF. Trafo ini bekerja dengan frekuensi 50 Hz dan memiliki hubungan belitan sisi primer YN, sisi sekunder yn0, dan sisi tersier terhubung delta seperti pada gambar 3.2.

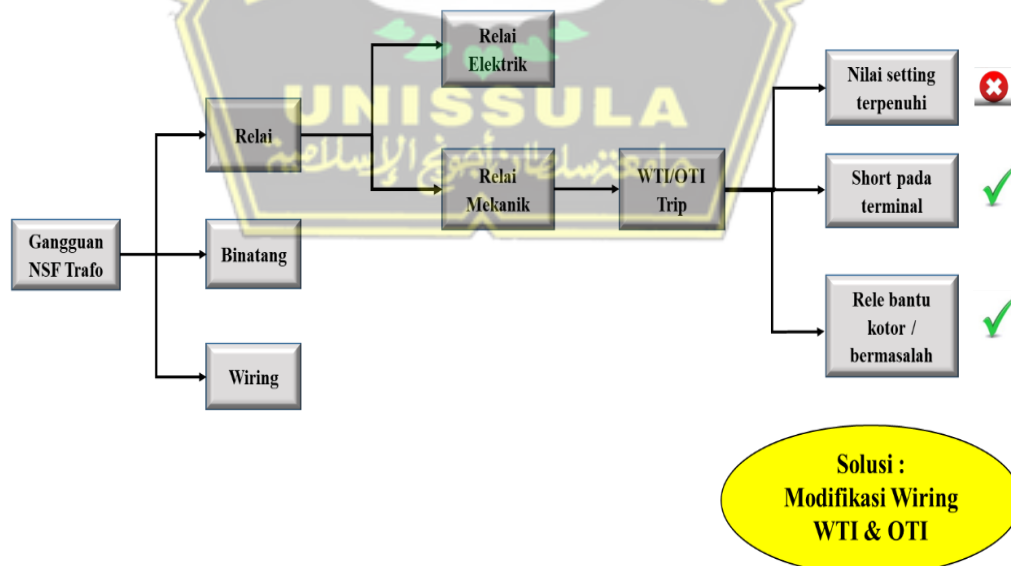


Gambar 3.2 Hubungan Belitan Transformator

(Sumber: PT PLN (Persero) Gardu Induk Blora)

3.4 Root Cause Problem Solving

Modifikasi rangkaian alarm dan trip proteksi temperatur transformator, pada relai *Oil Thermal Indicator* (OTI) dan *Winding Thermal Indicator* (WTI) merupakan improvisasi yang dilatar belakangi karena terjadinya gangguan *Non System Fault* (NSF) pada proteksi temperatur transformator. Gangguan yang terjadi umumnya diakibatkan oleh *short* terminal maupun relai bantu kotor yang mengakibatkan PMT trip secara tiba-tiba tanpa adanya step alarm terlebih dahulu.



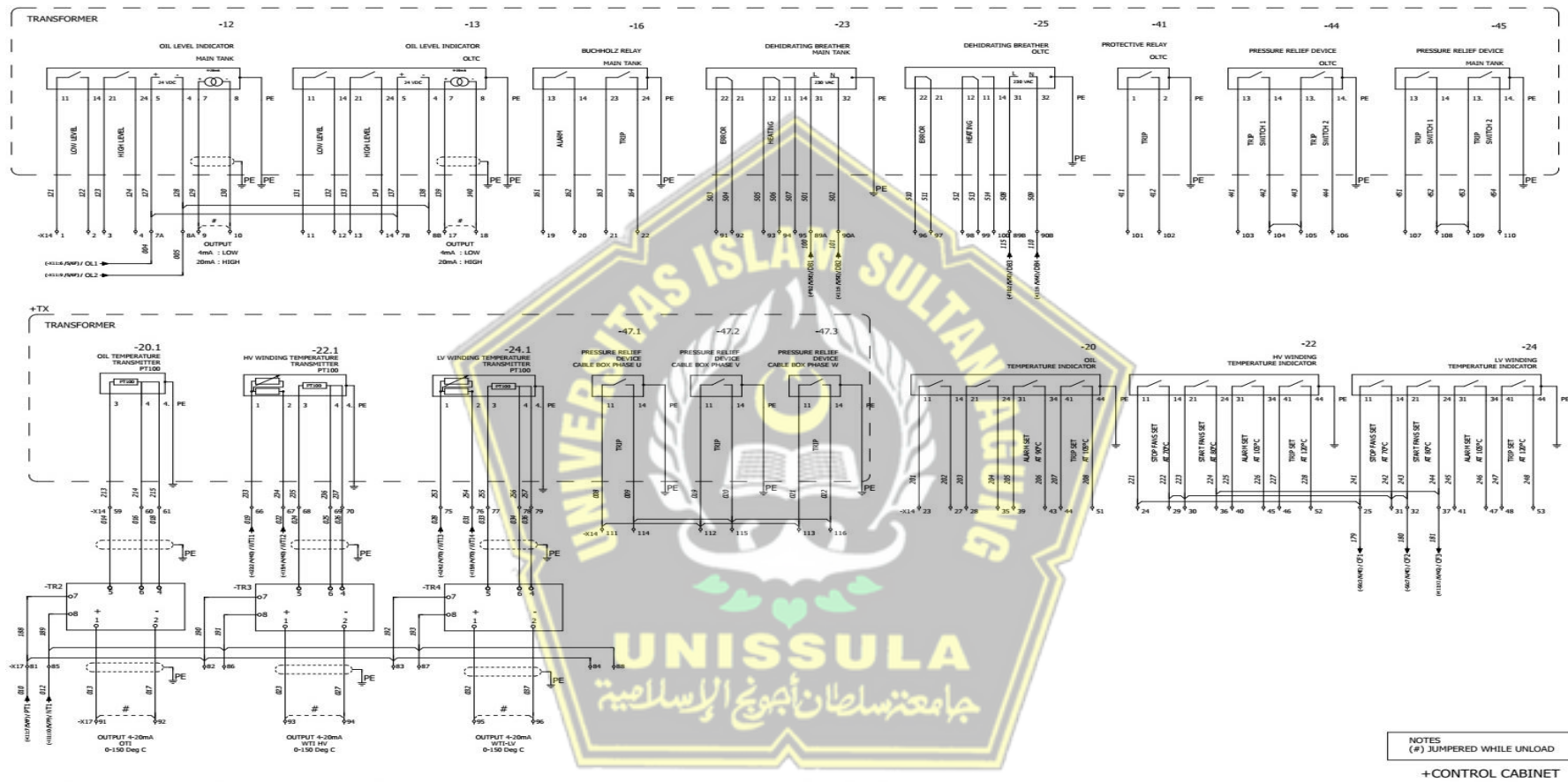
Gambar 3.3 Bagan RCPS (Root Cause Problem Solving)

3.5 Alat dan Material yang Digunakan

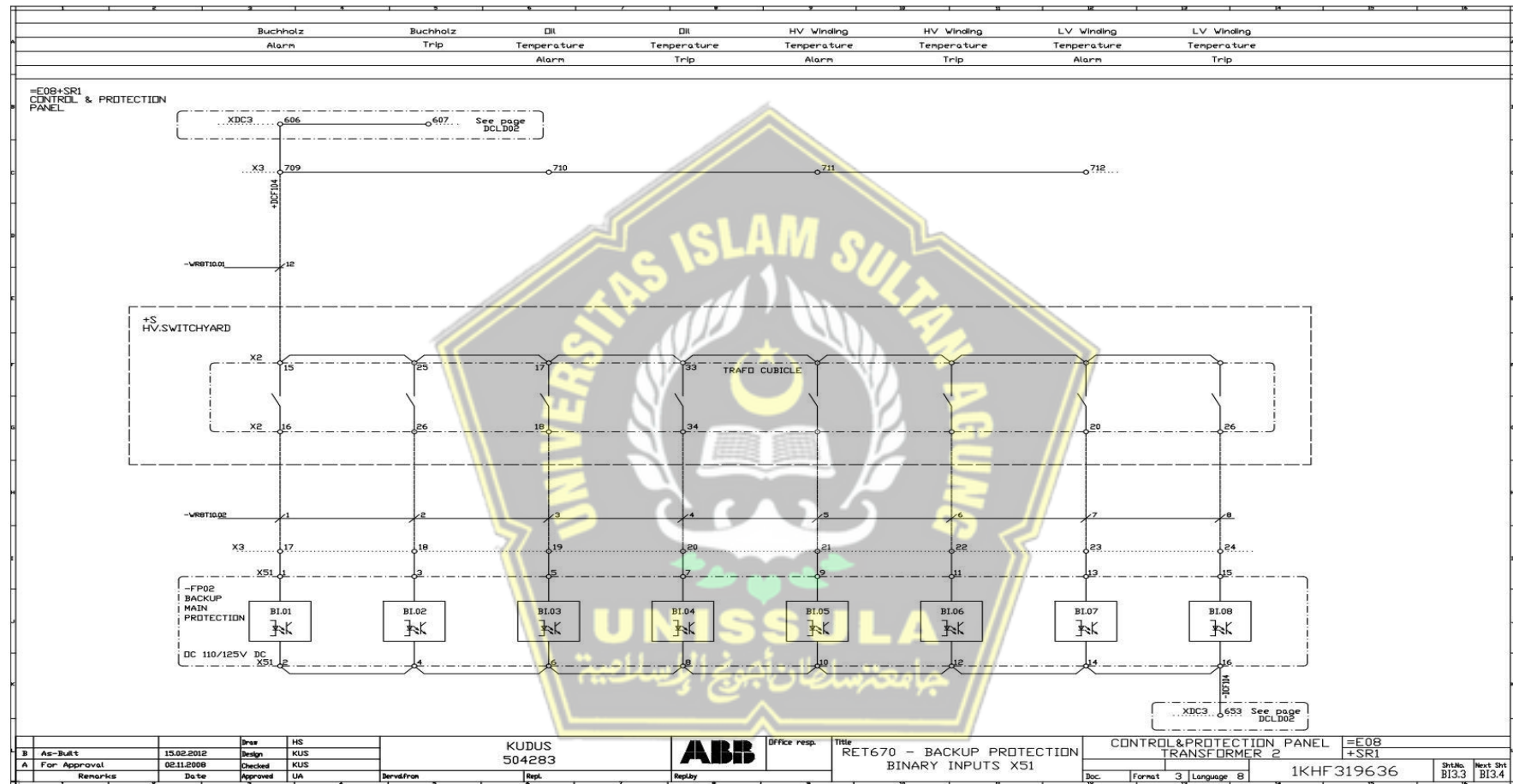
Alat yang digunakan dalam pelaksanaan modifikasi rangkaian :

1. Wiring internal trafo
2. Wiring panel control
3. Aux relay dan socket
4. Skun I
5. Skun Y
6. Kabel NYAF 1,5 mm
7. Terminal blade
8. Tool set
9. Alat ukur (multimeter)
10. Insulation tester

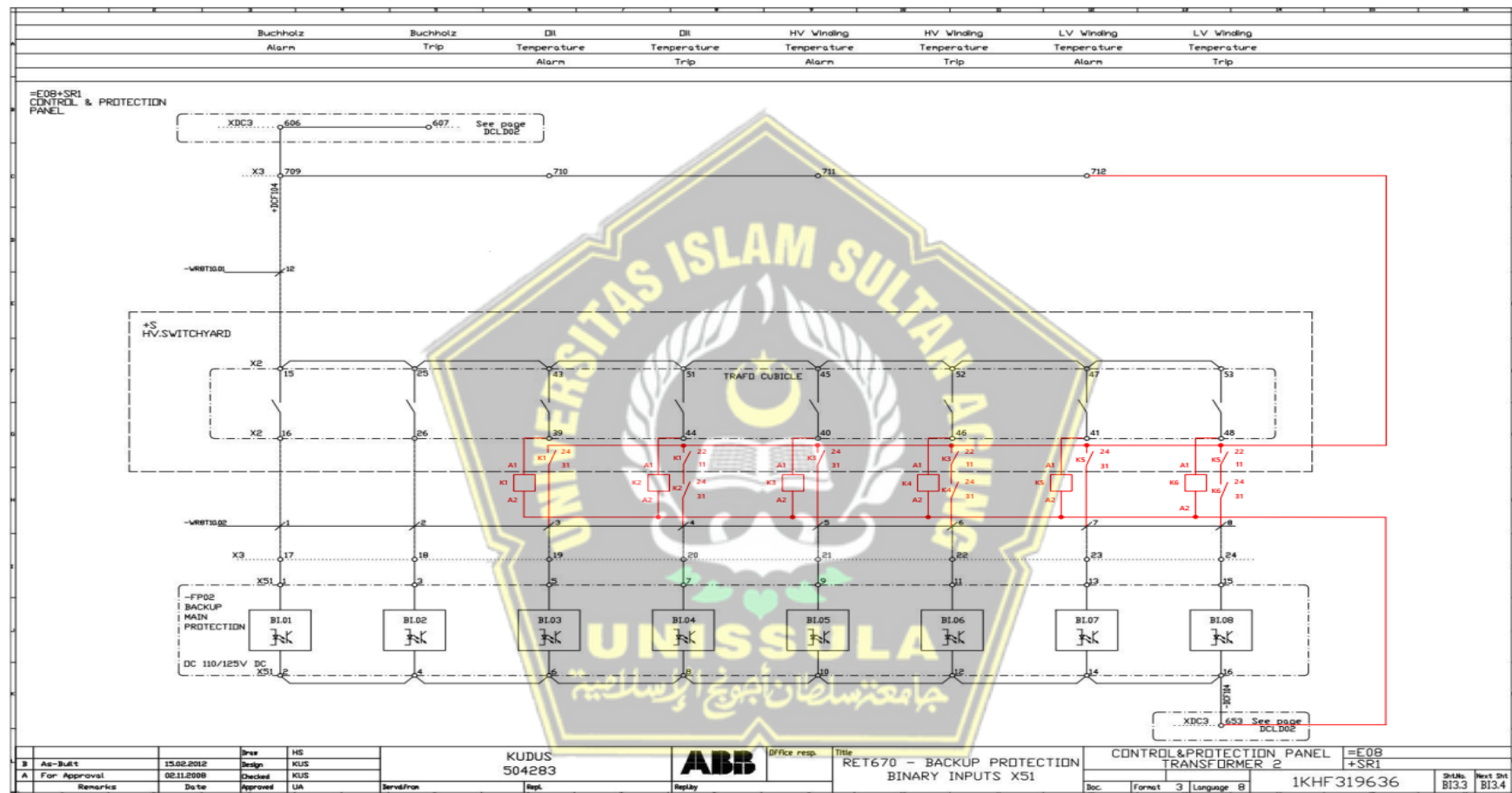




Gambar 3.4 Wiring Internal Trafo
(Sumber: PT PLN (Persero) Gardu Induk Blora)



Gambar 3.5 *Wiring* Panel Kontrol Eksisting
(Sumber: PT PLN (Persero) Gardu Induk Blora)



Gambar 3.6 Wiring Modifikasi Panel Kontrol
(Sumber: PT PLN (Persero) Gardu Induk Blora)

3.6 Langkah Pelaksanaan

Dari serangkaian tahapan di atas proses modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Memahami *wiring* eksisting Bay Trafo 2 Gardu Induk Blora

Memahami *wiring* eksisting bertujuan untuk memudahkan dalam memahami prinsip kerja rangkaian serta memudahkan dalam membuat desain rangkaian modifikasi baru yang mana perlu untuk mengawinkan rangkaian dari *box* trafo ke panel eksisting.

2. Desain gambar modifikasi baru

Desain gambar modifikasi baru dibuat untuk menggambarkan rangkaian yang sudah dimodifikasi sebagai acuan untuk melakukan eksekusi modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur Transformator 2 Gardu Induk Blora. Desain gambar baru dilengkapi dengan penambahan 6 buah *auxiliary relay* pada rangkaian.

3. Eksekusi *wiring* modifikasi baru

Eksekusi *wiring* modifikasi baru yaitu melaksanakan proses modifikasi dengan tahapan sebagai berikut:

- a. Merangkai *wiring* modifikasi baru sesuai desain pada *socket auxiliary relay* dan terminal panel kontrol
- b. Memasang *auxiliary relay* tambahan pada panel
- c. Melakukan proses *finishing* dengan pengecekan rangkaian

4. Penggantian terminal relai mekanik pada *box* trafo

Penggantian terminal relai mekanik trafo dengan *terminal blade* bertujuan untuk memudahkan saat pengujian tahanan isolasi. Karena terminal jenis ini dapat memutus tegangan dan arus dari panel kontrol ke *box* trafo dengan membuka saklar pisaunya tanpa harus melepas kabel pada terminalnya.

5. Pengecekan *setting* suhu

Melakukan pengecekan indikator suhu dimaksudkan untuk memastikan apakah suhu pada *Oil Thermal Indicator* (OTI) dan *Winding Thermal Indicator* (WTI) baik di sisi HV maupun LV sudah sesuai dengan standar. Untuk OTI memiliki *setting* suhu alarm 90°C dan trip 105°C. Untuk WTI memiliki *setting* suhu *start fan* 85°C, *stop fan* 75°C, alarm 100°C, dan trip 115°C .

6. Proses Pengujian

Setelah melakukan modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur Transformator 2 Gardu Induk Rembang dilakukan pengujian sebagai berikut:

a. Pengujian Kalibrasi

Uji kalibrasi yang dilakukan adalah dengan membandingkan pembacaan sensor suhu tersebut dengan pembacaan termometer standar pada saat kedua alat pembaca suhu itu dipanaskan dengan suhu yang sama. Berdasarkan Surat Keputusan Direksi PT PLN (Persero) No.0520-2.K/DIR/2014 tentang Pedoman Pemeliharaan Trafo Tenaga untuk evaluasi dan rekomendasi uji kalibrasi relai termal apabila error 0-2,5% maka masih normal, tetapi apabila >2,5% tergolong tidak normal dan perlu *resetting*.

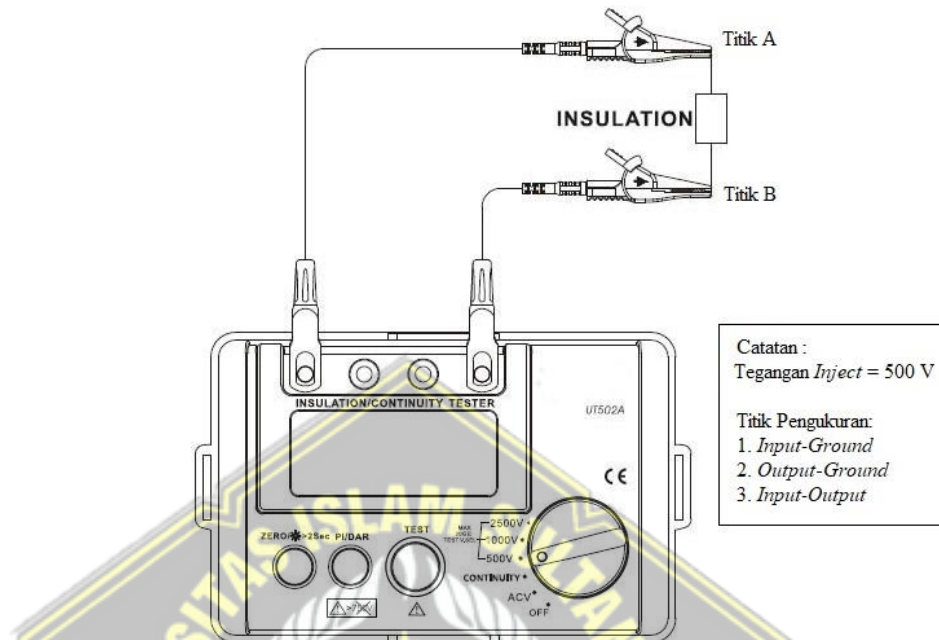


Gambar 3.7 Diagram Blok Pengujian Kalibrasi Relai Termal

b. Pengujian Tahanan Isolasi

Fungsi dari tahanan isolasi sendiri yaitu untuk mencegah perpindahan aliran listrik dari dua jenis terminal yang berbeda, dari suatu baik antara *input* dan *output*, maupun antara *input/output* dengan *ground*. Tingginya nilai resistansi pada suatu tahanan isolasi menandakan bahwa komponen tersebut masih layak digunakan. Pengujian tahanan isolasi dilakukan dengan menguji tahanan isolasi kontak terminal relai mekanik dengan

ground atau antara dua kontak terminal menggunakan *Insulation Tester* KYORITSU Model 3125A. Rangkaian alat uji dari pengujian tahanan isolasi kontak relai mekanik dapat dilihat pada gambar 4. 8.

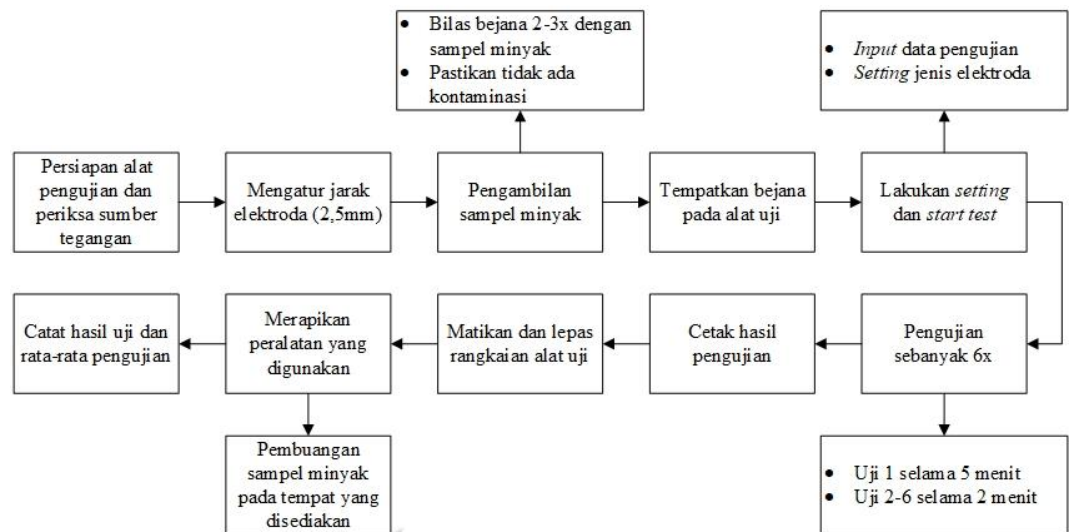


Gambar 3.8 Rangkaian Alat Uji Tahanan Isolasi

c. Pengujian Tegangan Tembus Minyak

Pengujian tegangan tembus dilakukan untuk mengetahui kemampuan minyak isolasi dalam menahan *stress* tegangan, memiliki keterkaitan dengan relai *Oil Thermal Indicator* (OTI) karena relai tersebut mendeteksi minyak yang ada di dalam transformator.

Cara pengujian tegangan tembus/*Breakdown Voltage* (BDV) yaitu menggunakan alat uji BDV merk Megger. Pada alat tersebut perlu dipastikan jarak kedua elektroda di dalamnya 2,5 mm (standar IEC 156), diukur dengan menggunakan *fuller*. Selanjutnya, bejana diletakkan pada alat uji dan ditutup. Sebelum memulai *test* lakukan input data dan *setting* jenis elektroda yang digunakan. Umumnya di PT PLN (Persero) menggunakan standar IEC 60156-02 Tahun 1995, dengan elektroda *mushroom* dan jarak elektroda 2,5mm.



Gambar 3.9 Diagram Blok Pengujian Tegangan Tembus (BDV)

d. Pegujian Fungsi Sistem Proteksi

Pengujian fungsi adalah kegiatan yang wajib dilakukan setelah melakukan perbaikan maupun pemeliharaan. Pada pengujian relai termal ini yang menjadi aspek memenuhi atau tidaknya standar yakni dilihat dari kerja kipas pendingin pada transformator, kerja PMT, dan indikasi relai pada panel kontrol. Dapat dilakukan dengan beberapa cara, dengan melakukan simulasi kontak relai menghubungkan singkat kontak atau menggerakkan jarum indikator relai agar kontak bekerja. Dan pengujian kalibrasi dengan melakukan simulasi gangguan pemanasan *thermocouple* ke dalam sampel minyak trafo yang dipanaskan.

7. *Finishing* dan merapikan peralatan

Proses *finishing* bertujuan untuk memastikan seluruh proses telah dilakukan sesuai prosedurnya dan memastikan kembali rangkaian yang sudah dimodifikasi. Setelah semua dalam kondisi aman peralatan yang telah selesai digunakan dapat dirapikan dan dikembalikan sesuai pada tempatnya.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil penelitian

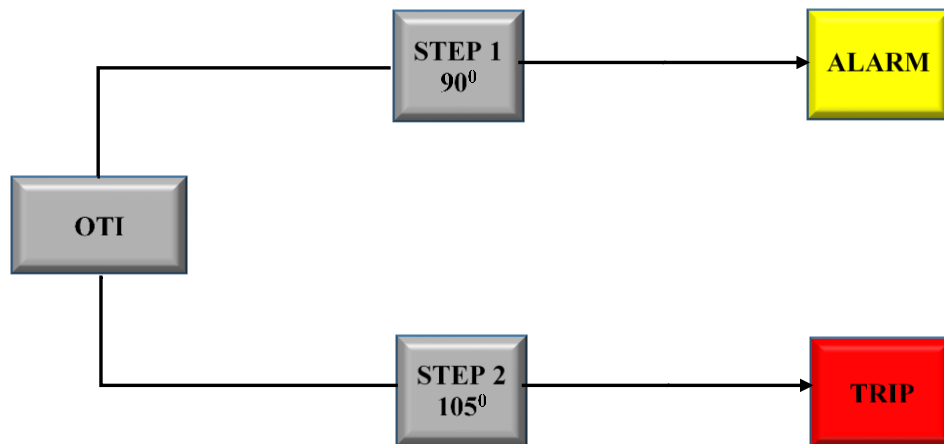
Setelah dilakukan modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur Transformator 2 30 MVA Gardu Induk 150 kV Blora diharapkan dapat mencapai tujuan *five zero* yaitu *zero accident*, *zero NSF*, *zero breakdown*, *zero anomaly*, dan *zero mistake*. Sehingga transformator tersebut tetap stabil dan dapat terjaga keandalannya.

4.1.1 Prinsip Kerja Rangkaian Sebelum dan Sesudah Modifikasi

Relai termal bekerja berdasarkan suhu minyak trafo dan suhu belitan pada sisi *high voltage* (HV) maupun sisi *low voltage* (LV). Suhu pada transformator yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, *losses* pada trafo itu sendiri, dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada transformator. Untuk mengetahui suhu operasi dan indikasi ketidaknormalan suhu operasi pada transformator digunakan relai termal. Relai termal ini terdiri dari sensor suhu berupa *thermocouple*, pipa kapiler dan meter penunjukan. Berikut merupakan prinsip kerja dari relai termal:

a. Prinsip Kerja Sebelum Modifikasi

Cara kerja relai termal sebelum modifikasi yaitu kontak relai bekerja sesuai *setting* suhunya pada saat kondisi normal. Relai *Oil Thermal Indicator* (OTI) dapat dilihat pada Gambar 4.1 sesuai *setting* suhunya akan mengerjakan kontak alarm saat mencapai suhu 90°C dan ketika suhunya terus bertambah hingga mencapai 105°C maka dapat mengerjakan relai, akibatnya PMT akan trip. Sedangkan Relai *Winding Thermal Indicator* (WTI) dapat dilihat pada Gambar 4.2 sesuai *setting* suhunya akan mengerjakan kontak *start fan* pada saat mencapai suhu 85°C, ketika suhu bertambah hingga mencapai 100°C maka akan mengaktifkan kontak alarm, dan apabila suhu tidak mengalami penurunan, serta terus meningkat hingga mencapai 115°C maka dapat mengerjakan relai, akibatnya PMT akan trip.

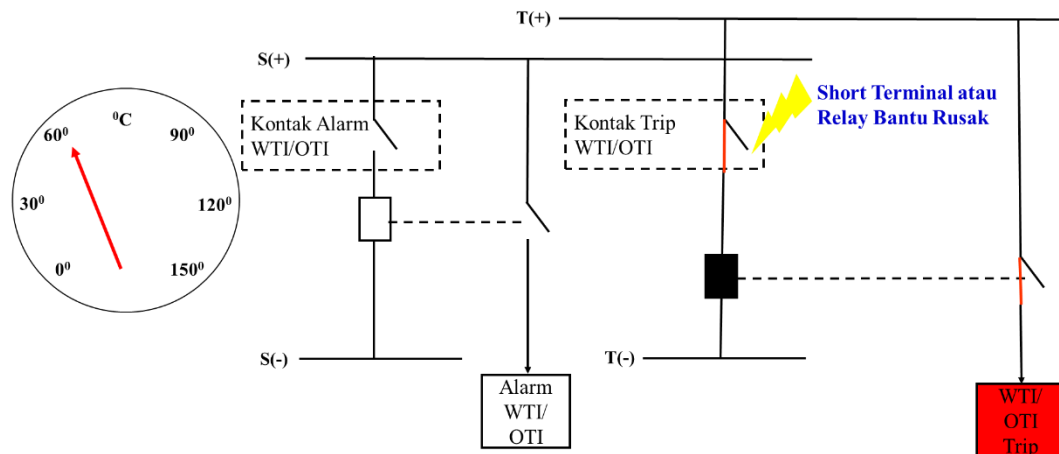


Gambar 4.1 Rangkaian Logic OTI Sebelum Modifikasi



Gambar 4.2 Rangkaian Logic WTI Sebelum Modifikasi

Dari uraian cara kerja relai termal saat kondisi normal sedikit berbeda pada saat terjadi gangguan *Non System Fault* (NSF). Pada saat terjadi gangguan *Non System Fault* (NSF) karena *short* terminal atau relai bantu rusak pada arah *tripping* maka kontak relai tersebut akan bekerja tanpa mengerjakan kontak alarm terlebih dahulu. Hal ini dikarenakan kontak *tripping* sudah mendapat *common* positif dan tidak ada kontak yang memutuskan arus, sehingga kontak trip tersebut mentrigger PMT untuk trip. Dari uraian tersebut dapat dilihat prinsip kerja rangkaian sebelum modifikasi pada Gambar 4.3.



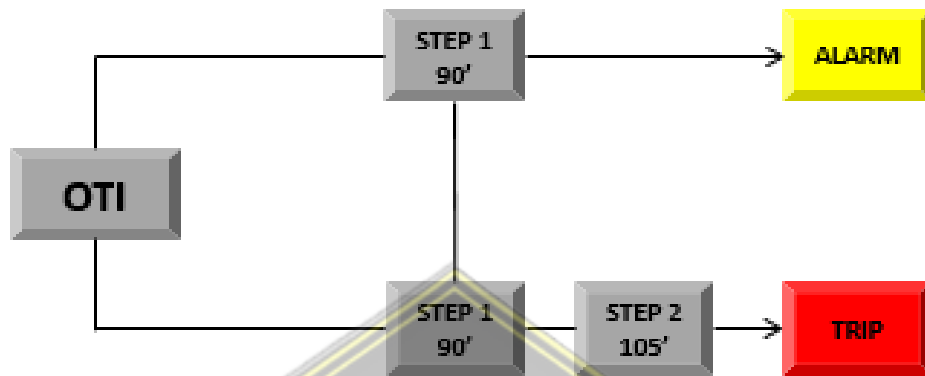
Gambar 4.3 Prinsip Kerja Relai Termal Sebelum Modifikasi

b. Prinsip Kerja Setelah Modifikasi

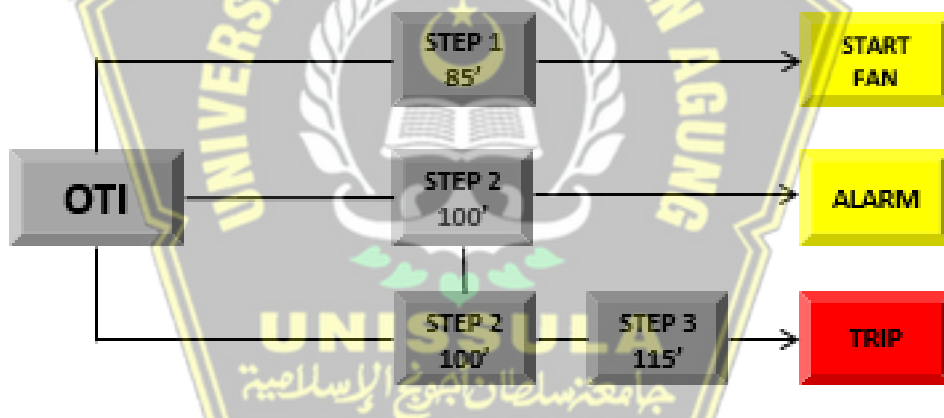
Dari prinsip kerja sebelum modifikasi dapat terjadi trip tanpa adanya alarm dan hal tersebut dapat menimbulkan resiko padam dan mendapat pengurangan kinerja karena sistem tersebut dinilai kurang andal. Sejatinya alarm menjadi hal yang memiliki peran signifikan dalam mencegah terjadinya trip PMT. Apabila relai termal bekerja sesuai *setting* suhu dan terjadi gangguan sistem, maka dapat dilakukan tindakan pencegahan sebelum terjadi trip PMT. Sedangkan apabila terjadi gangguan *Non System Fault* (NSF) rangkaian dapat langsung mengerjakan kontak trip dan tidak dapat dilakukan tindakan pencegahan terlebih dahulu. Berdasarkan pengalaman gangguan NSF yang terjadi di wilayah kerja Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Tengah (UITJBT) akibat *short* terminal maupun relai bantu yang bermasalah pada trafo, telah dilakukan evaluasi dan dilakukan tindakan perbaikan dengan modifikasi rangkaian alarm dan trip pada relai *Oil Thermal Indicator* (OTI) dan *Winding Thermal Indicator* (WTI).

Pada rangkaian alarm dan trip relai OTI/WTI setelah dimodifikasi yaitu terdapat tambahan kontak dari relai bantu untuk memutus arus saat terjadi saat terjadi gangguan *Non System Fault* (NSF) sekaligus menjadi pengaman pada jalur *tripping*. Pada kondisi normal atau bekerja sesuai *setting* suhu, syarat sebelum terjadi trip PMT harus muncul atau melewati alarm terlebih dahulu. Untuk mengerjakan kontak trip dengan setting suhu pada *Oil Thermal Indicator* (OTI) 105°C dan relai *Winding Thermal Indicator* (WTI) 115°C, relai *Oil Thermal*

Indicator (OTI) harus melalui setting 90°C terlebih dahulu, sedangkan relai *Winding Thermal Indicator* (WTI) harus melalui setting 105°C terlebih dahulu. Rangkaian *logic* pada relai OTI dan WTI setelah dimodifikasi dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5.



Gambar 4.4 Rangkaian *Logic* OTI Setelah Modifikasi

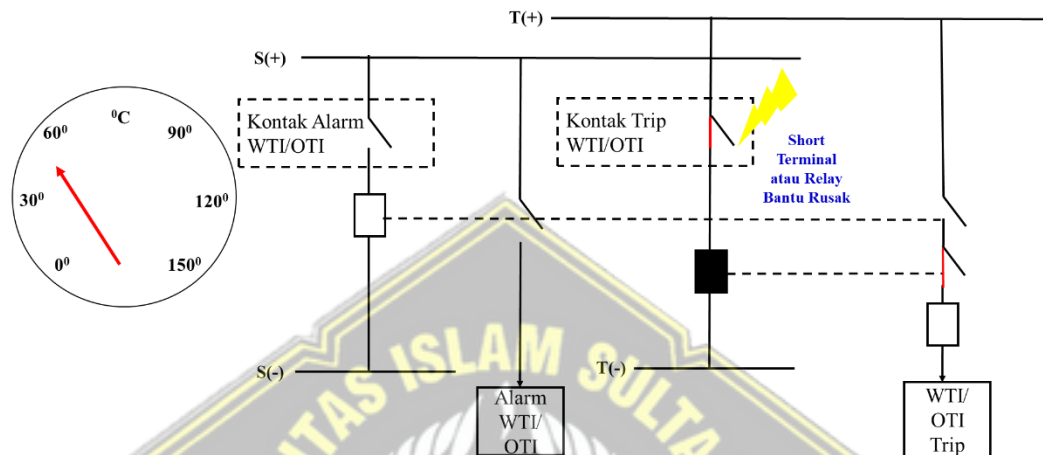


Gambar 4.5 Rangkaian *Logic* WTI Setelah Modifikasi

Dari uraian cara kerja relai termal setelah dimodifikasi memiliki prinsip kerja rangkaian alarm dan trip sebagai berikut:

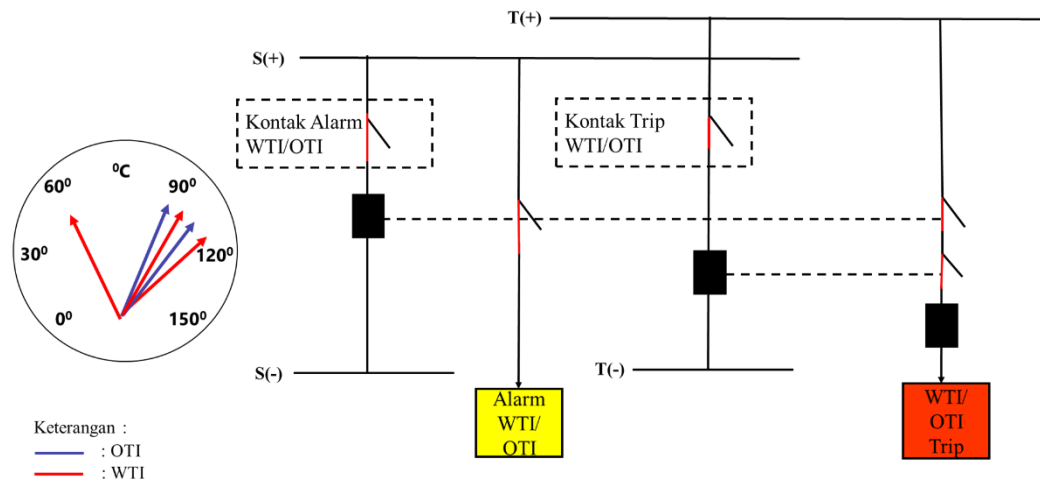
1. Kontak relai *Oil Thermal Indicator* (OTI) trip bekerja jika terjadi kondisi OTI alarm dan OTI trip secara bersamaan.
2. Kontak relai *Winding Thermal Indicator* (WTI) trip bekerja jika terjadi kondisi WTI alarm dan WTI trip secara bersamaan.
3. Jika terjadi kontak relai *Oil Thermal Indicator* (OTI) dan *Winding Thermal Indicator* (WTI) untuk fungsi trip bekerja tidak bersamaan dengan OTI dan

WTI alarm, serta tidak melalui *setting* suhu yang telah ditetapkan atau suhu dalam kondisi normal maka akan terputus arusnya oleh *auxiliary relay* yang ditambahkan. Sehingga jalur *tripping* aman dan tidak mendapatkan *common* positif yang dapat mengerjakan kontak trip relai termal. Prinsip kerja rangkaian tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4 6 Prinsip Kerja Relai Termal Setelah Modifikasi Saat Suhu Normal

4. Jika relai relai *Oil Thermal Indicator* (OTI) dan *Winding Thermal Indicator* (WTI) bekerja pada kondisi normal sesuai *setting* suhunya, maka sebelum trip akan terjadi alarm terlebih dahulu. Pada relai OTI kontak alarm akan bekerja saat suhu 90°C dan kontak trip akan bekerja saat suhu mencapai 105°C. Sedangkan pada relai WTI kontak alarm akan bekerja saat suhu 100°C dan kontak trip akan bekerja saat suhu mencapai 115 °C. Prinsip kerja rangkaian dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Prinsip Kerja Relai Termal Setelah Modifikasi Saat Memenuhi Suhu Setting

4.1.2 Manfaat Modifikasi Rangkaian Alarm dan Trip Proteksi Temperatur Transformator

Setelah dilakukannya perbaikan rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur yaitu OTI/WTI terdapat dua jenis manfaat yang diperoleh baik dari segi finansial maupun non finansial. Berikut merupakan manfaat yang diperoleh dari penerapan modifikasi *wiring* relai termal:

1) Manfaat Finansial

Modifikasi *wiring* WTI dan OTI menggunakan biaya yang terjangkau baik dalam pengerjaan maupun komponen yang digunakan. Adapun manfaat finansial yang diperoleh dengan menerepkan modifikasi tersebut yaitu:

- a. Efisiensi biaya karena meminimalisir adanya gangguan dan meminimalisir ataupun mencegah pemadaman *bay* trafo sehingga pelayanan pelanggan lebih maksimal.
- b. Efisiensi biaya karena tidak adanya pembayaran denda ke pelanggan premium.

Manfaat finansial dari modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur Transformator 2 Gardu Induk Blora dapat dihitung melalui perhitungan ENS (*Energy Not Supplied*) sebagai indeks keandalan yang menyatakan jumlah energi yang tidak dapat disalurkan oleh sistem kepada pelanggan selama periode satu tahun. Perhitungan ENS ini didefinisikan sebagai penjumlahan energi yang hilang akibat adanya gangguan terhadap pasokan daya selama periode satu tahun. secara sistematis rumus perhitungan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$ENS = \Sigma [\text{Daya Gangguan (kW)} \times \text{Durasi (h)}] \quad (4.1)$$

Manfaat finansial dapat dilihat dari asumsi perhitungan sebagai berikut:

1. Jika Transformator 2 30 MVA Gardu Induk Blora trip, dengan diasumsikan perhitungan beban rata-rata/hari = 10,6 MW (diambil dari rata-rata data beban tertinggi pada laporan perusahaan tahun 2021) dapat dilihat pada Tabel 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4.1 Data Rekap Beban Tertinggi Tahun 2022

No	Bulan	Beban Tertinggi Pagi Hari (MW)
1	Januari	21,7
2	Februari	13,2
3	Maret	16,1
4	April	16,6
5	Mei	16,8
6	Juni	14,7
7	Juli	13,9
8	Agustus	14,9
9	September	14,6
10	Oktober	19,3
11	November	11,6
12	Desember	18,6
Rata - Rata (MW)		15,9

Sumber : PT PLN (Persero) Gardu Induk Blora

2. Waktu pemadaman Bay Transformator 2 berlangsung selama 1 jam.
3. Biaya modifikasi sesuai dengan Tabel 4.2 yaitu sebesar Rp4.900.000,-
Berikut merupakan material yang digunakan beserta rincian pengeluarannya dalam modifikasi ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Daftar Biaya Modifikasi

No	Material	Jumlah	Harga	Sub Total
1	Aux Relay dan Socket	6 Bh	Rp 600.000	Rp 3.600.000
2	Skun lidah I (2,5 mm)	1 Pak	Rp 50.000	Rp 50.000
3	Skun tipe Y (2,5 mm)	1 Pak	Rp 50.000	Rp 50.000
4	Kabel NYAF 1,5 mm ²	50 m	Rp 8.000	Rp 400.000
5	Terminal blade (2.5 mm)	20 Bh	Rp 40.000	Rp 800.000
Harga Total				Rp 4.900.000

Sumber : PT PLN (Persero) ULTG Rembang

4. Tarif per kWh Rp1300 sesuai dengan tarif dasar listrik atau harga listrik per kWh.

$$ENS = \Sigma [\text{Daya Gangguan (kW)} \times \text{Durasi (h)}] \quad (4.1)$$

$$= 15.900 \text{ kW} \times 1 \text{ jam}$$

$$= 15.900 \text{ kWh}$$

$$\text{Total kerugian (Rp)} = ENS \times 1300 \text{ Rp/kwh}$$

$$= 15.900 \text{ kWh} \times 1300 \text{ Rp/kwh}$$

$$= \text{Rp}20.670.000,-$$

Total efisiensi 1x gangguan dapat diperoleh dari:

$$\text{Kerugian (Rp)} - \text{Biaya modifikasi} = \text{Rp}20.670.000 - \text{Rp} 4.900.000$$

$$= \text{Rp}15.770.000,-$$

Jadi dari perhitungan di atas dapat dikatakan bahwa perusahaan dapat meminimalisir pengeluaran ketika terjadi 1x gangguan sebesar Rp15.770.000,-

2) Manfaat non finansial

Modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur transformator 2 30 MVA Gardu Induk 150 kV Blora selain memberikan manfaat secara finansial, terdapat juga manfaat non finansial dari pengaplikasian tersebut antara lain:

- Meningkatkan kinerja unit TROD dan TROF, yaitu nilai kinerja yang berkaitan dengan durasi dan kali gangguan pada transformator. Di mana semakin sedikit terjadi gangguan maka bobot nilainya akan semakin bagus.
- Meningkatkan kinerja unit SAIDI dan SAIFI, di mana SAIDI dan SAIFI merupakan indeks yang digunakan untuk mengukur keandalan sistem distribusi

tenaga listrik. Karena sistem transmisi memiliki keterkaitan dengan sistem distribusi.

- c. Meningkatkan mutu pelayanan pelanggan, hal ini dikarenakan keandalan trafo terjaga sehingga kualitas pelayanan kepada pelanggan semakin baik.
- d. Mendukung pola GITO, yaitu Gardu Induk Tanpa Operator yang mana operator Gardu Induk tidak perlu setiap saat memantau keadaan panel.

4.2 Hasil Pengujian Transformator Terkait Relai Termal

Setelah dilakukan modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur transformator terdapat pengujian terkait relai termal OTI/WTI, di mana pengujian tersebut rutin dilakukan dalam serangkaian pemeliharaan *bay* transformator oleh regu har ULTG Rembang. Pemeliharaan Bay Transformator 2 Gardu Induk Rembang dilakukan pada tahun genap yakni 17 Februari 2020 dan dilakukan rutin setiap 2 tahun sekali, kecuali pengujian tegangan tembus minyak yang dilakukan tiap semester. Pengujian yang memiliki keterkaitan dengan relai termal antara lain:

1. Pengujian tahanan isolasi

Tabel 4. 3 Data Hasil Pengujian Tahanan Isolasi Kontak Relai Termal

		PT. PLN (PERSERO) UI TRANSMISI JAWA BAGIAN TENGAH UPT SEMARANG			No. FORM/TJB7/01.2			
LAMPIRAN " LAPORAN TEKNIK "					No. Trafo / Phase		Tm-10.2 /	
					Teg. / Daya		150 kV / 22 kV / 60 MVA	
					Mark / Type		EG DAHNWELS /	
LEMBAR HASIL PENGECEKAN TRANSFORMER UJI FUNGSI & PENGUKURAN TAHANAN ISOLASI RELE MEKANIK								
NO	URAIAN KEGIATAN		STANDARD	HASIL SEBELUMNYA	KONDISI AWAL	TINDAKAN	KONDISI AKHIR	KESIMPULAN
A	B		C	D	E	F	G	H
1	PENGUJIAN TAHANAN ISOLASI							
	Bucholz	Input - Ground		>1000	BAIK		>1000	
		Output - Ground		>1000	BAIK		>1000	
		Input - Output		>1000	BAIK		>1000	
	Jensen	Input - Ground		>1000	BAIK		>1000	
		Output - Ground		>1000	BAIK		>1000	
		Input - Output		>1000	BAIK		>1000	
	Sudden Pressure	Input - Ground		>1000	BAIK		>1000	
	(Main Tank)	Output - Ground		>1000	BAIK		>1000	
		Input - Output		>1000	BAIK		>1000	
	Sudden Pressure	Input - Ground		>1000	BAIK		>1000	
	(OLTC)	Output - Ground		>1000	BAIK		>1000	
		Input - Output		>1000	BAIK		>1000	
	Sudden Pressure	Input - Ground		>1000	BAIK	Pengujian menggunakan Tegangan 500 V	>1000	
	(Tubular)	Output - Ground	>2MΩ	>1000	BAIK		>1000	
		Input - Output		>1000	BAIK		>1000	
	Relai Suhu	Input - Ground		>1000	BAIK		>1000	
	(WTI HV)	Output - Ground		>1000	BAIK		>1000	
		Input - Output		>1000	BAIK		>1000	
	Relai Suhu	Input - Ground		>1000	BAIK		>1000	
	(WTI LV)	Output - Ground		>1000	BAIK		>1000	
		Input - Output		>1000	BAIK		>1000	
	Relai Suhu	Input - Ground		>1000	BAIK		>1000	
	(WTI TV)	Output - Ground		>1000	BAIK		>1000	
		Input - Output		>1000	BAIK		>1000	
	Relai Suhu	Input - Ground		>1000	BAIK		>1000	
	(OTI)	Output - Ground		>1000	BAIK		>1000	
		Input - Output		>1000	BAIK		>1000	

Rotasi-rasi
Isolasi
di Atas
1000m2

Rata-rata
Isolasi
di Atas
1000MΩ

2. Pengujian kalibrasi indikator suhu relai termal

Tabel 4.4 Hasil Penghitungan Kalibrasi Relai Termal

No	Relai Termal	Start Fan	Stop Fan	Alarm	Trip
1	Setting OTI (°C)	-	-	90	105
	Hasil Uji OTI (°C)	-	-	90	104,9
	Error (%)	-	-	0	0,09
2	Setting WTI HV (°C)	85	75	100	115
	Hasil Uji WTI HV (°C)	84,9	74,8	100	114,8
	Error (%)	0,12	0,26	0	0,17
3	Setting WTI LV (°C)	85	75	100	115
	Hasil Uji WTI LV (°C)	84,8	75	100	115
	Error (%)	0,24	0	0	0

$$\text{Error (\%)} = \frac{\text{Nilai Setting} - \text{Nilai Hasil Uji}}{\text{Nilai Setting}} \times 100\%$$

3. Pengujian tegangan tembus/Breakdown Voltage (BDV)

Tabel 4.5 Data Hasil Pengujian Tegangan Tembus

PT. PLN (PERSERO) UNIT INDIK TRANSISI JAWA BAGIAN TENGAH UPT SEMARANG Jalan : Jend. Sudirman Km 23 Gedung C - SPS11, Telp. : (024) 8922452, 2407.30999, FAX. (024) 8922125		No. FORM/T3BT/01.8	
LAMPIRAN "LAPORAN TEKNIK"		Waktu / Type	T. Tu B /
		Tgl. / Daye	15/02/20 /
		No. Trafo	TRAF0 2

LEMBAR HASIL PENGECEKAN TRANSFORMER PENGUJIAN / PENGUKURAN TEGANGAN TEMBUS MINYAK ISOLASI							
NO	URAIAN KEJADIAN	ACUAN	TAHAP PENGUJIAN	HASIL SEBELUMNYA	TINDAKAN	HASIL AKHIR	KESIMPULAN
A	B	C	D	E	F	G	H
1.	TEGANGAN TEMBUS MINYAK (diukur pada suhu °C)	STANDARD IEC 60422 TEGANGAN TEG. TEMBUS TGL. DOLIRAN	{ kV / 2,5 mm } selang waktu 5 menit				
			1	79,0		53,1	
			2	55,8		71,0	
			3	66,1		62,4	
			4	71,0		74,4	
			5	42,8		72,2	
			6	51,4		71,0	
		Rata - rata		61,1		69,3	
			1	48,4		39,7	
			2	40,5		78,3	
			3	50,6		65,8	
			4	76,4		52,9	
			5	56,0		61,9	
			6	47,6		65,3	
		Rata - rata		48,1		60,6	

Catatan :

Pelaksana Pengujian :	Supervisi / Peng. Pekerjaan	Tanggal
1. Eka	Supervisi G1 : S. Arsy M.	1.
2. S. Arsy M.	Pengawas Pekerjaan : Setiawan	2.
3.		

4. Pengujian fungsi relai termal

Tabel 4. 6 Data Hasil Pengujian Fungsi Relai Termal



PT. PLN (Persero) Unit Induk Transmisi Jawa Bagian Tengah
UPT : SEMARANG
ULTS : REMBANG

FUNCTION TEST PENGAMAN TRAFU

Lokasi : GI BLOKA
Bay : TRAFU 2

Tanggal : 10 FEBRUARI 2022

NO.	JENIS PENGAMAN	SIMULASI GANGGUAN	KERJA PMT		RELE	INDIKASI		KETERANGAN
			150 KV	20 KV		ANNAUNCIATOR	ALARM	
1	Bucholz Alarm	RELE MEKANIK	-	-	BUCHOLZ ALARM	BUCHOLZ ALARM	V	
2	Bucholz Trip	RELE MEKANIK	V	V	TRIP	BUCHOLZ TRIP	V	
3	Bucholz OLTC Trip	RELE MEKANIK	V	V	TRIP	JANSEN TRIP	V	
4	Pressure Relief Trip OLTC	RELE MEKANIK	V	V	TRIP	PRESSURE RELIEF OLTC	V	
5	Sudden Pressure Main Tank	RELE MEKANIK	V	V	TRIP	PRESSURE RELIEF TRIP	V	
6	Oil Temperature Alarm	THERMOCOUPLE	-	-	OIL TEMP. ALARM	OIL TEMP. ALARM		
7	Oil Temperature Trip	THERMOCOUPLE	V	V	TRIP	OIL TEMP. TRIP		
8	Winding Temperature LV Alarm	THERMOCOUPLE	-	-	LV WINDING ALARM	LV WINDING TEMP. ALARM	V	
9	Winding Temperature LV Trip	THERMOCOUPLE	V	V	TRIP	LV WINDING TEMP. TRIP	V	
10	Winding Temperature HV Alarm	THERMOCOUPLE	-	-	HV WINDING ALARM	HV WINDING TEMP. ALARM	V	
11	Winding Temperature HV Trip	THERMOCOUPLE	V	V	TRIP	HV WINDING TEMP. TRIP	V	
12	Oil Level	SHORT TERMINAL	-	-	OIL LEVEL ALARM	OIL LEVEL ALARM	V	
13	Motor OLTC Failure	TRIP MOTOR SUPPLY	-	-	MCB AC TRIP	TRIP MOTOR OLTC	V	
14	Motor Fan	TRIP FAN SUPPLY	-	-		MCB FAN OFF	V	
15	Aux. Supply Failure							TIDAK ADA AUX SUPPLY
16	Trip Rele Op. CB Lock Out							TIDAK ADA LOCK OUT
17	Differential Trip	INJEK SEKUNDER	V	V	DIFF TRIP. START		V	
18	REF 150 kV Trip	INJEK SEKUNDER	V	V	PHASA REF HV TRIP START		V	
19	REF 20 kV Trip	INJEK SEKUNDER	V	V	REF LV TRIP START		V	
20	OCRO GFR Back Up Rate Trip	INJEK SEKUNDER	V	V	TRIP START	OC TRIP / TEF TRIP	V	

Mengetahui
Penasihat Penerimaan

Penerimaan :
1. Jumaldi Yagirdi
2. Riky Wira H.
3. Sandi Pratomo R.
4.

4.3 Pengaruh Modifikasi Rangkaian Alarm dan Trip Terhadap Nilai TROF dan TROD

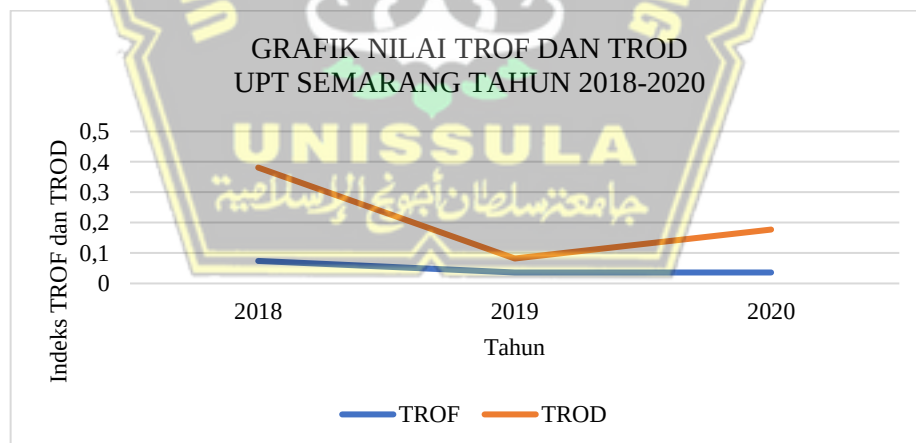
Keandalan pada sistem transmisi yang terkait dengan transformator dapat diukur melalui indeks TROF dan TROD. TROF (*Transformer Outage Frequency*) adalah indikator untuk mengukur kekerapan gangguan pada setiap unit trafo tenaga, sedangkan TROD (*Transformer Outage Duration*) adalah indikator untuk mengukur lamanya gangguan rata-rata peralatan pada setiap unit trafo tenaga. Lama gangguan per unit trafo dihitung mulai gangguan hingga trafo *energize*.

Keterkaitan modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur transformator ini yaitu memiliki manfaat dapat meningkatkan kinerja Unit TROD dan TROF. Meningkatkan kinerja sendiri dapat diartikan bahwa semakin sedikit gangguan dan semakin singkat durasi gangguan dapat meningkatkan nilai kinerja unit terhadap transformator yang ada pada unit itu sendiri.

Dari data pada Tabel Rekap Realisasi Kinerja TROF dan TROD UPT Semarang Tahun 2018-2020 diperoleh bahwa dari tahun 2018 terjadi 4 kali gangguan dengan nilai TROF 0,074 Kali/Unit, pada tahun 2019 terjadi 2 kali gangguan dengan nilai TROF 0,036 Kali/Unit, dan pada tahun 2020 terjadi 2 kali gangguan dengan nilai TROF 0,036 Kali/Unit. Apabila dilihat dari data tersebut terdapat penurunan yang terkait *Transformer Outage Frequency* (TROF) yaitu kali gangguan yang terjadi pada transformator tenaga di Unit Pelaksana Transmisi (UPT) Semarang.

Selain itu, dari Tabel Rekap Realisasi Kinerja TROF dan TROD UPT Semarang Tahun 2018-2020 diketahui pula durasi gangguan yang terjadi yakni pada tahun 2018 terjadi selama 20,55 jam dengan nilai TROD 0,381, pada tahun 2019 terjadi selama 4,533 jam dengan nilai TROD 0,082, dan pada tahun 2020 terjadi selama 9,75 jam dengan nilai TROD 0,177. Apabila dilihat dari data tersebut terjadi penurunan durasi gangguan dari tahun 2018 ke 2019, akan tetapi pada 2020 terjadi peningkatan namun tidak begitu signifikan.

Dari uraian mengenai realisasi kinerja TROF dan TROD UPT Semarang Tahun 2018-2020 dapat digambarkan nilai pencapaian TROF dan TROD UPT Semarang dengan grafik yang ditunjukkan pada Gambar



Gambar 4.8 Grafik Nilai TROF dan TROD UPT Semarang Tahun 2018-2020

Dari keseluruhan data di atas dapat dikatakan bahwa dalam melakukan modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur transformator dapat meningkatkan nilai kinerja unit dengan menurunnya nilai TROF karena dapat mencegah terjadinya gangguan. Sedangkan untuk nilai TROD sendiri sifatnya

relatif, karena durasi gangguan tergantung dengan cepatnya masalah tersebut ditangani sampai transformator *energize* kembali. Namun sesuai teori mengenai acuan termasuknya gangguan dalam nilai kinerja TROF dan TROD terdapat hal yang perlu digaris bawahi yaitu terkait penyebab gangguan. Apabila gangguan diakibatkan oleh akibat pekerjaan pihak lain, bencana alam, dan distribusi (*uncontrollable*) tidak diperhitungkan dalam gangguan kinerja artinya tidak dimasukkan dalam kinerja TROF maupun TROD.

Terkait nilai TROF dan TROD sebelum adanya rekap realisasi telah lebih dahulu ditandatangani kontrak manajemen oleh Manajer UPT Semarang dan Manajer ULTG di bawah naungan UPT Semarang yang tercantum target serta bobot TROF dan TROD dalam satu unit yang disepakati sebagai target kinerja yang ingin dicapai. Berikut merupakan target kontrak manajemen UPT Semarang tahun 2021 terkait TROF dan TROD seperti pada Tabel 4.

Tabel 4.7 Kontrak Manajemen Terkait TROF dan TROD UPT Semarang Tahun 2022

No	Indikator Kinerja	Satuan	Bobot	Target Semester 1	Target 2021
1	TROF	Kali/Unit	15	0,0396	0,0791
2	TROD	Jam/Unit	10	0,0813	0,1625

Sumber : Kontrak Manajemen PT PLN (Persero) UPT Semarang

Berdasarkan tabel 4.7 mengenai Kontrak Manajemen Terkait TROF dan TROD UPT Semarang Tahun 2021, target tahun 2021 untuk TROF yaitu 0,0791 Kali/Unit dan target tahun 2021 untuk TROD yaitu 0,1625. Dengan jumlah trafo yang beroperasi di UPT Semarang sebanyak 55 Trafo dengan aset trafo di ULTG Semarang sebanyak 30 trafo, di ULTG Kudus sebanyak 15 trafo, dan di ULTG Rembang sebanyak 10 trafo, maka agar tercapai target TROF dan TROD di UPT Semarang kali gangguan maksimal dan durasi maksimal gangguan dapat dihitung nilainya sebagai berikut.

- a. Kali Gangguan Maksimal Trafo UPT Semarang

$$TROF = \frac{\sum \text{kali trafo GI padam karena gangguan}}{\sum \text{trafo GI beroperasi}} \quad (2.1)$$

$$0,0791 = \frac{X}{55}$$

$$X = 55 \times 0,0791$$

$$X = 4,35 \text{ Kali}$$

$$X \approx 4 \text{ Kali}$$

- b. Durasi Maksimal Gangguan Trafo UPT Semarang

$$T ROD = \frac{\sum_{i=1}^n \text{lama trafo GI padam karena gangguan}}{\sum \text{trafo GI beroperasi}} \quad (2.2)$$

$$0,01625 = \frac{X}{55}$$

$$X = 55 \times 0,01625$$

$$X = 0,89 \text{ Jam}$$

$$X = 53 \text{ Menit}$$

- c. Kali Gangguan Maksimal Trafo ULTG Rembang

$$TROF = \frac{\sum \text{kali trafo GI padam karena gangguan}}{\sum \text{trafo GI beroperasi}} \quad (2.1)$$

$$0,0791 = \frac{X}{10}$$

$$X = 10 \times 0,0791$$

$$X = 0,791 \text{ Kali}$$

$$X \approx 0 \text{ Kali (Tidak ada gangguan)}$$

- d. Durasi Maksimal Gangguan Trafo ULTG Rembang

Dari penghitungan TROF terkait kali gangguan maksimal trafo di ULTG Rembang nilainya 0 yang artinya target TROF tidak terjadi gangguan pada sub unit tersebut. Sehingga durasi maksimal di ULTG Rembang tidak perlu dihitung.

BAB V

PENUTUP

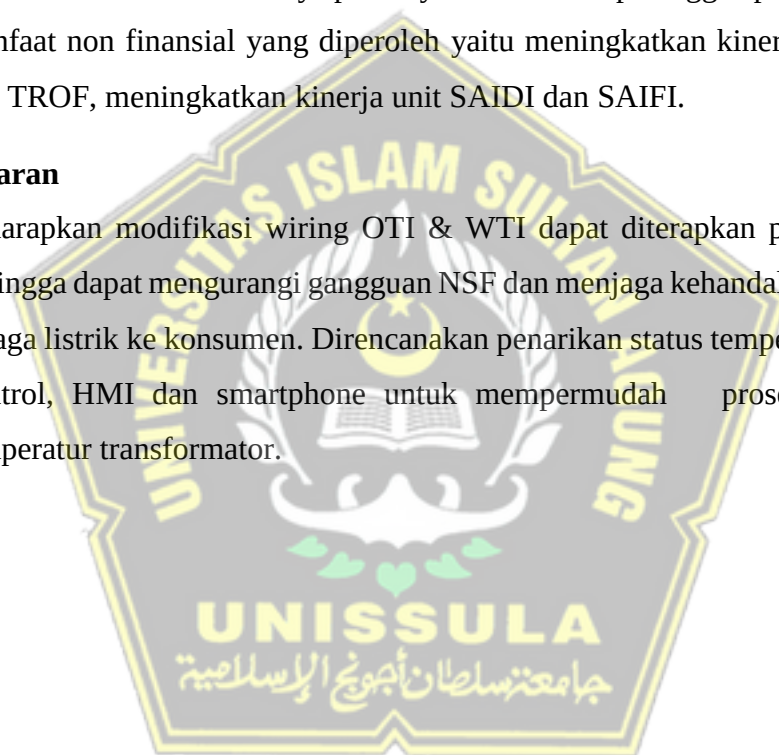
5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan pada bab sebelumnya, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

Modifikasi rangkaian alarm dan trip pada proteksi temperatur transformator memiliki manfaat finansial yang diperoleh yaitu efektif biaya untuk mencegah pemadaman dan tidak adanya pembayaran denda ke pelanggan premium. Untuk manfaat non finansial yang diperoleh yaitu meningkatkan kinerja unit TROD dan TROF, meningkatkan kinerja unit SAIDI dan SAIFI.

5.2 Saran

Diharapkan modifikasi wiring OTI & WTI dapat diterapkan pada trafo lain sehingga dapat mengurangi gangguan NSF dan menjaga kehandalan penyaluran tenaga listrik ke konsumen. Direncanakan penarikan status temperatur ke panel kontrol, HMI dan smartphone untuk mempermudah proses monitoring temperatur transformator.



DAFTAR PUSTAKA

- Joko Pramono. (2010). *MAKALAH Teknik Tenaga Listrik Transmission of Electrical Energy (Transmisi Tenaga Listrik)*.
- Karyana. (2013). *Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali*.
- Kunto Wibowo, W., Yuningtyastuti, I., & Syakur, A. (n.d.). *ANALISIS KARAKTERISTIK BREAKDOWN VOLTAGE PADA DIELEKTRIK MINYAK SHELL DIALA B PADA SUHU 30 0 C-130 0 C*.
- Marsudi, D. (2006). *Operasi Sistem Tenaga Listrik*.
- nur sulistyawati, S. T. , M. T. (2021). D3-2021-426332-abstract. *Analisis Pengujian Relay Suhu Pada Relay Mekanik Trafo Tenaga Di Gardu Induk 150 Kv Garut*.
- PT. PLN (Persero). (n.d.). kepdird 520 buku pedoman pemeliharaan CT. *Buku Pedoman Trafo Arus*.
- PT. PLN (Persero). (2014a). kepdird 520 buku pedoman pemeliharaanLA. *Buku Pedoman Lightning Arrester*.
- PT. PLN (Persero). (2014b). kepdird 520 buku pedoman pemeliharaan PMT. *Buku Pedoman Pemutus Tenaga*.
- PT. PLN (Persero). (2014c). kepdird 520 buku pedoman pemeliharaan proteksi trafo.
- PT. PLN (Persero). (2014d). kepdird 520 buku pedoman pemeliharaan trafo tenaga.
- PT. PLN (Persero). (2014e). KEPDIR 520 Buku Pedoman Saluran Kabel Tegangan Tinggi dan SKLT. *Buku Pedoman Saluran Kabel Tegangan Tinggi Dan SKLT*.
- PT. PLN (Persero). (2014f). KEPDIR 520 Buku Pedoman Saluran Udara Tegangan Tinggi. *Buku Pedoman Saluran Udara Tegangan Tinggi*.
- PT. PLN (Persero). (2014g). *KEPDIRD 520 GAS INSULATED SUBSTATION*.
- samaulah, H. H. (2004). *DASAR - DASAR SISTEM PROTEKSI TENAGA LISTRIK*.
- Sumardjati, P. (2008). *TEKNIK PEMANFAATAN TENAGA LISTRIK JILID 2 (Vol. 2)*.