

**STUDI PROTEKSI DIFERENSIAL TRANSFORMATOR DAYA
PADA GARDU INDUK PANAKKUKANG**



FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

2013

**STUDI PROTEKSI DIFERENSIAL TRANSFORMATOR DAYA
PADA GARDU INDUK PANAKKUKANG**

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat

Untuk Memperoleh Gelar Sarjana

Program Studi Teknik Elektro

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik

Disusun dan Diajukan oleh

RASYID

105 82 200 08

SYAMSUDDIN

105 82 221 08

PADA

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

MAKASSAR

2013



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR
FAKULTAS TEKNIK

Jl. Sultan Alauddin No. 259 Telp. (0411) 866 972 Fax (0411) 865 588 Makassar 90221

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi syarat ujian guna memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) Program Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

Judul Skripsi : **STUDI PROTEKSI DIFERENSIAL TRANSFORMATOR DAYA PADA GARDU INDUK PANAKKUKANG**

Nama : **Rasyid Syamsuddin**

Stambuk : **105 82 200 08**
105 82 221 08

Makassar, 06 Februari 2016

Telah Diperiksa dan Disetujui
Oleh Dosen Pembimbing:

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. H. Zulfairi Basri Hasanuddin, M.Eng.
NIP: 196901241993031001

Andi Faharuddin, S.T., MT.
NIP: 132 169 986

Mengetahui,

Ketua Jurusan Elektro



Umar Katu, ST., MT.
NBM : 990 410



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR
FAKULTAS TEKNIK

Jl. Sultan Alauddin No. 259 Telp. (0411) 866 972 Fax (0411) 865 588 Makassar 90221



PENGESAHAN

Skripsi atas nama **Rasyid** dengan nomor induk Mahasiswa **105 82 200 08** dan **Syamsuddin** dengan nomor induk Mahasiswa **105 82 221 08**, dinyatakan diterima dan disahkan oleh Panitia Ujian Tugas Akhir/Skripsi sesuai dengan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar Nomor : 205/05A.5-11/VI/34/2013, sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar pada hari Kamis tanggal 20 Juni 2013.

Panitia Ujian :

27 Rabiul Akhir 1437 H
Makassar, 06 Februari 2016 M

1. Pengawas Umum

a. Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar

Dr. H. Inwan Akib, M.Pd.

b. Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Dr. Ing. Ir. Wahyu H. Pirah, MSME

2. Penguji

a. Ketua : Dr. Ir. Zahir Zamuddin, M.Sc

b. Sekertaris : Mutmainnah, ST

3. Anggota : 1. Rizal A Duyo, ST, MT

2. Suryani, ST, MT

3. Adriani, ST, MT

Mengetahui :

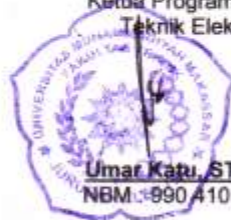
Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. H. Zulfajri Basri Hasanuddin, M.Eng.

Andi Faharuddin, ST., MT.

Ketua Program Studi
Teknik Elektro



Umar Kati, ST., MT.
NBM : 990 410

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena rahmat dan hidayah-Nyalah sehingga Penulis dapat menyusun skripsi ini, dan dapat kami selesaikan dengan baik.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan akademik yang harus ditempuh dalam rangka menyelesaikan Program Studi pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar. Adapun judul tugas akhir kami adalah: **“STUDI PROTEKSI DIFERENSIAL TRANSFORMATOR DAYA PADA GARDU INDUK PANAKKUKANG”**

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa di dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan-kekurangan, hal ini disebabkan penulis sebagai manusia biasa tidak lepas dari kesalahan dan kekurangan baik itu ditinjau dari segi teknis penulisan maupun dari perhitungan-perhitungan. Oleh karena itu penulis menerima dengan ikhlas dan senang hati segala koreksi serta dan perbaikan guna penyempurnaan tulisan ini agar kelak dapat bermanfaat.

Dalam penulisan ini, tidak sedikit hambatan dan kesulitan yang penulis hadapi, tetapi berkat bantuan, arahan, bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Oleh

karena itu segala ketulusan dan kerendahan hati, kami mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak Dr. H. Irwan Akib, M.Pd sebagai Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar.
2. Bapak Hamzah Al Imran, S.T sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
3. Bapak Umar Katu, S.T., M.T sebagai Ketua Jurusan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
4. Bapak Dr. H. Zulfajri Basri Hasanuddin, M. Eng selaku pembimbing I dan Bapak Andi Faharuddin, S.T., M.T selaku pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktu dalam membimbing kami.
5. Bapak dan Ibu Dosen serta Staf pengawai pada Fakultas Teknik atas segala waktunya telah mendidik dan melayani penulis selama mengikuti proses belajar mengajar di Universitas Muhammadiyah Makassar.
6. Kedua orang tua tercinta dan seluruh keluarga, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala limpahan kasih sayang, doa dan pengorbanannya terutama dalam bentuk materi dalam menyelesaikan kuliah.
7. Saudara-saudaraku serta rekan-rekan Mahasiswa Fakultas Teknik terkhusus angkatan 2008 di Universitas Muhammadiyah Makassar.

Akhirnya kepada semua pihak yang telah terlibat dalam rangka penulisan ini yang tidak dapat disebutkan satu-persatu, penulis

menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya, semoga Allah SWT membalas semua dengan sesuatu yang jauh lebih baik. Semoga skripsi yang sederhana ini dapat bermanfaat bagi penulis, rekan-rekan dan masyarakat. Amin.

Makassar, 6 Februari 2016

Penulis



ABSTRAK

Syamsuddin dan Rasyid; *Studi Proteksi Diferensial Transformator Daya pada Gardu Induk Panakkukang* (dibimbing oleh H. Zulfajri Basri Hasanuddin dan Andi Faharuddin). Penelitian ini bertujuan (1) untuk menentukan nilai setelan relai diferensial untuk ketiga trafo (Trafo#1, Trafo#2 dan Trafo#3) di Gardu Induk Panakkukang dan (2) untuk mendapatkan kinerja relai dari ketiga trafo tersebut, saat beban maksimum (tiga bulan terbesar) selama setahun (2012). Data penelitian berupa spesifikasi ketiga trafo, beserta data beban selama tahun 2012, diperoleh di Gardu Induk Panakkukang. Selanjutnya, dilakukan analisis setelan dan kinerja, dari relai diferensial yang ada. Setelan untuk Trafo#1 dengan daya 30 MVA, tegangan 150/20 KV diperoleh yaitu *slope* 40%. Trafo#2 memiliki spesifikasi yang sama dengan Trafo#1, sehingga nilai setelannya sama, yakni *slope* 40%. Sedangkan setelan untuk Trafo#3 dengan daya 60 MVA, tegangan 150/20 KV, adalah *slope* 25%. Beban puncak tiga bulan tertinggi tahun 2012 untuk Trafo#1 yaitu 22,4 MVA (Februari), 23,9 MVA (Oktober) dan 20,4 MVA (Desember) semuanya menghasilkan persen *slope* pada relai sebesar 22,22%. Oleh karena nilai persen *slope* tersebut, berada di bawah nilai setelan persen *slope* relai (40%), maka relai tidak *trip* pada saat terjadi beban puncak. Sementara itu, beban puncak tiga bulan tertinggi tahun 2012 untuk Trafo#2, yaitu 23,6 MVA (Mei), 35,7 MVA (November) dan 21 MVA (Desember), semuanya menghasilkan persen *slope* 22,22%. Hasil persen *slope* kondisi beban puncak dari Trafo#2, identik dengan persen *slope* relai Trafo#1 yaitu 22,22%, sehingga relainya juga tidak *trip*. Trafo terakhir, Trafo#3, dengan tiga bulan beban puncak tertinggi, yakni 37,3 MVA (September), 35,7 MVA (November), dan 38 MVA (Desember), semuanya menghasilkan persen *slope* 11,77%. Nilai persen *slope* tersebut juga berada di bawah nilai setelan relai (*slope* 25%), sehingga relai untuk Trafo#3, juga tidak *trip* pada saat beban puncak. Kondisi tidak *trip* pada relai di ketiga trafo, pada saat beban maksimum, menunjukkan bahwa kinerja relai-relai tersebut, telah sesuai dengan yang semestinya.

Kata kunci : Transformator (trafo), beban puncak, relai diferensial, setelan, persen *slope*, kinerja relai, *trip*.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	x
BAB I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	5
C. Tujuan Penelitian	5
D. Manfaat Penelitian	5
E. Batasan masalah	6
F. Sistematika Penulisan	6
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. Proteksi Gardu Induk	7
B. Sistem Proteksi.....	7
1. Fungsi Sistem Proteksi	8
2. Syarat-syarat Sistem Proteksi	8
3. Daerah Proteksi.....	10
4. Sistem Proteksi Utama dan Penyangga.....	12
5. Peralatan-peralatan Proteksi	12
C. Teori Dasar Transformator	14
1. Transformator Daya	18
2. Transformator Arus	19
3. Perbedaan Utama Trafo Arus dengan Trafo Daya ..	34
4. Faktor Penyebab Gangguan pada Trafo Daya	34
5. Jenis Gangguan	37
6. Hubung Singkat	37
7. Relai Proteksi Transformator	38

8. Proteksi Utama Trafo Tenaga	40
D. Relai Diferensial	41
1. Prinsip Kerja Relai Diferensial	42
2. Settingan Relai	47
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	
A. Lokasi dan Waktu penelitian	48
B. Jenis Penelitian	48
C. Jenis Data dan Sumber Data Yang Diperlukan	48
D. Instrumentasi Penelitian	49
E. Langkah-langkah Penelitian	49
F. Kerangka Pikir	50
BAB IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	
A. Gambaran Umum	51
B. Relai Diferensial.....	53
C. Perhitungan Relai Setelan Diferensial Untuk Trafo#30 MVA.....	55
D. Perhitungan Relai Setelan Diferensial Untuk Trafo#60 MVA.....	59
E. Analisis Kinerja Relai Saat Beban Maksimum.....	62
1. Tiga Bulan Dengan Beban Tertinggi Selama Tahun 2012untuk Trafo#1	62
2. Tiga Bulan Dengan Beban Tertinggi Selama Tahun 2012Untuk Trafo#2	71
3. Tiga Bulan Beban Tertinggi Selama Tahun 2012 UntukTrafo#3, 60 MVA Gardu Induk Panakkukang ..	80
BAB V. PENUTUP	
A. Kesimpulan.....	89
B. Saran	90
DAFTAR PUSTAKA	91
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Daerah proteksi pada sistem tenaga listrik	11
Gambar 2.2 Peralatan-peralatan sistem proteksi.....	14
Gambar 2.3 Bagian dari transformator.....	15
Gambar 2.4 Rangkaian pada trafo arus.....	20
Gambar 2.5 Rangkaian ekivalen.....	21
Gambar 2.6 Diagram fasor arus dan tegangan pada trafo.....	22
Gambar 2.7 Kurva kejenuhan CT untuk pengukuran dan proteksi ...	24
Gambar 2.8 Luas penampang inti trafo arus.....	24
Gambar 2.9 Bar primary	25
Gambar 2.10 Wound primary.....	26
Gambar 2.11 Trafo arus pemasangan luar ruangan.....	28
Gambar 2.12 Trafo arus pemasangan dalam ruangan	28
Gambar 2.13 Trafo arus dengan dua inti	29
Gambar 2.14 Trafo arus dengan empat inti	30
Gambar 2.15 Primer seri CT rasio 800/1A.....	30
Gambar 2.16 Primer seri CT rasio 1600/1A.....	31
Gambar 2.17 CT sekunder dua Tap	31
Gambar 2.18 CT sekunder empat Tap	31
Gambar 2.19 CT tipe cincin	32

Gambar 2.20 Komponen CT tipe cincin	32
Gambar 2.21 Komponen CT tipe tangki.....	33
Gambar 2.22 Ilustrasi skema diferensial zona dua sirkuit.....	44
Gambar 2.23 Gangguan relai diferensial persentase.....	45
Gambar 2.24 Tipikal karakteristik beberapa tipe relai diferensial.....	46
Gambar 4.1 Single line gardu induk panakukang	52
Gambar 4.2 Relai diferensial.....	54
Gambar 4.3 Skema Proteksi Diferensial Trafo GI panakukang	55
Gambar 4.4 Grafik Beban Tahunan 2012 untuk Trafo#1	62
Gambar 4.5 Grafik Percentase Relai Diferensial Trafo#1	69
Gambar 4.6 Grafik Beban Tahunan 2012 untuk Trafo#2.....	71
Gambar 4.7 Grafik Percentase Relai Diferensial Trafo#2	78
Gambar 4.8 Grafik Beban Tahunan 2012 untuk Trafo#3.....	80
Gambar 4.9 Grafik Persentase Relai Diferensial Trafo#3	87

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
1. Standar perbandingan CT (Stevenson Jr.,1990)	20
2. Analisis data pembebanan tahun 2012	70
3. Analisis data pembebanan tahun 2012	79
4. Analisis data pembebanan tahun 2012	88

DAFTAR LAMPIRAN

1. Beban Trafo#1; 30 MVA Gardu Induk Panakkukang Tahun 2012
2. Beban Trafo#2; 30 MVA Gardu Induk Panakkukang Tahun 2012
3. Beban Trafo#3; 60 MVA Gardu Induk Panakkukang Tahun 2012
4. Trafo#1; 30 MVA Gardu Induk Panakkukang
5. Trafo#2; 30 MVA Gardu Induk Panakkukang
6. Trafo#3; 30 MVA Gardu Induk Panakkukang
7. Single Line Gardu Induk Panakkukang
8. Analisis Data Pembebanan Trafo#1; 30 MVA Tahun 2012
9. Analisis Data Pembebanan Trafo#2; 30 MVA Tahun 2012
10. Analisis Data Pembebanan Trafo#3; 60 MVA Tahun 2012



DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

Notasi	Definisi dan Keterangan
e_p	GGL induksi pada kumparan primer
N_p	Jumlah lilitan kumparan primer
$d\Phi$	Perubahan garis-garis gaya magnet dalam satuan weber (1 weber = 10^8 maxwell)
dt	Perubahan waktu dalam satuan detik
N_s	jumlah lilitan kumparan sekunder
a	Nilai perbandingan lilitan transformator
N_1	Jumlah lilitan primer
N_2	Jumlah lilitan sekunder
B	Kerapatan fluksi (tesla)
A	Luas penampang (m^2)
F	Frekuensi (Hz)
N_2	jumlah lilitan sekunder
U_1	Tegangan sisi primer
U_2	Tegangan sisi sekunder
Z_b	Impedansi/tahanan dari trafo arus
Z_{kawat}	Impedansi/tahanan kawat dari terminasi CT ke instrument
Z_{inst}	Impedansi/tahanan instrumen

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Transformator dalam sistem tenaga membutuhkan tipe proteksi yang berbeda-beda. Proteksi ini disediakan oleh berbagai jenis relai baik elektromagnetik maupun statik. Secara umum proteksi transformator berfungsi untuk memproteksi transformator apabila terjadi gangguan, sehingga transformator dapat terhindar dari kerusakan.

Relai yang akan digunakan untuk memproteksi transformator adalah relai diferensial. Relai ini akan bekerja apabila terdapat perbedaan arus pada transformator arus (*current transformer*) sisi primer dan sekunder. Apabila gangguan terjadi di luar zona proteksi, relai tidak akan bekerja.

Gangguan listrik yang terjadi dalam suatu sistem tenaga listrik mengakibatkan terjadinya peningkatan arus listrik, penurunan tegangan, frekuensi dan faktor daya. Relai tidak dapat menghilangkan kemungkinan adanya gangguan, tetapi akan bekerja setelah terjadi gangguan. Suatu relai proteksi bertugas untuk mengamankan suatu alat atau bagian dari sistem tenaga listrik dalam zona proteksi.

Pemutus tenaga diletakkan agar setiap bagian dari sistem dapat dipisah-pisahkan. Maka tugas relai adalah mendeteksi adanya gangguan yang terjadi pada zona proteksi, memberi perintah untuk membuka PMT, dan

memisahkan bagian dari sistem yang terganggu. Dengan demikian bagian sistem yang lain yang tidak terganggu dapat beroperasi dengan normal. Hal ini berfungsi untuk mengetahui keselektifan relai tersebut.

Transformator merupakan suatu perangkat listrik yang berfungsi memindahkan daya dari sisi rangkaian primer ke sisi rangkaian sekunder dengan frekuensi yang sama. Dengan mengatur tegangan dan arus pada transformator, akan diperoleh suatu tegangan dan arus sistem sesuai yang direncanakan.

Menurut pemakaiannya di bidang tenaga listrik transformator dapat dibedakan menjadi tiga yaitu, transformator daya, transformator distribusi dan transformator ukur. Transformator ukur terdiri dari transformator arus (*current transformer*) dan transformator tegangan (*potensial transformer*).

Sistem tenaga listrik yang handal adalah apabila sistem tersebut sudah bisa mencatu tenaga listrik dengan stabil dan berkesinambungan. Salah satu cara untuk menjaga hal tersebut diperlukan proteksi pada transformator. Proteksi transformator dimaksudkan untuk mencegah transformator dari kerusakan akibat gangguan-gangguan yang terjadi pada transformator dan membatasi daerah pemadaman sekecil mungkin.

Oleh karena pada sistem pengamanan tenaga listrik dikenal dengan daerah-daerah pengamanan, maka pengamanan transformator juga berfungsi sebagai pengamanan cadangan bagi sistem yang terkait. Misalnya saluran tegangan menengah dan generator. Dengan demikian pengamanan

transformator diharapkan dapat memberikan kontribusi keandalan sistem, khususnya dalam kesinambungan penyaluran pada konsumen.

Menghindari ataupun mengurangi kerusakan peralatan-peralatan akibat gangguan (*kondisi abnormal operasi sistem*) maka diperlukan proteksi pada sistem. Semakin cepat reaksi perangkat proteksi yang digunakan maka semakin sedikitlah pengaruh gangguan terhadap kemungkinan terjadinya kerusakan pada alat tersebut.

Relai merupakan element perasa yang dapat mendeteksi adanya gangguan dan salah satunya adalah relai diferensial. Relai diferensial adalah relai yang prinsip kerjanya berdasarkan keseimbangan (*balance*), yang membandingkan arus-arus sekunder transformator arus. Relai diferensial digunakan sebagai relai pengaman utama (*main protection*). Relai ini sangat selektif sehingga tidak perlu dikoordinir dengan relai lain. Di samping itu kerjanya sangat cepat dan tidak memerlukan waktu tunda.

Gardu induk merupakan salah satu dari sistem penyaluran di mana keandalan sistem sangat diperlukan dalam menunjang kelancaran pemakaian energi listrik sampai kepada konsumen. Salah satu peralatan yang sangat penting dalam penyaluran energi listrik pada gardu induk adalah transformator daya yang merupakan mata rantai terpenting pada sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik yang berfungsi memindahkan daya dari suatu rangkaian ke rangkaian lain, dengan mengubah tegangan dari suatu harga ke harga tegangan yang lain.

Kemungkinan kondisi terjadinya gangguan tidak dapat dipungkiri, mengingat dalam distribusi energi listrik dapat terhenti akibat adanya gangguan atau kondisi abnormal pada salah satu peralatan penting yaitu transformator daya, sehingga dapat terjadi kerusakan peralatan dan terhentinya penyaluran energi listrik untuk sementara yang tidak terduga sehingga menimbulkan kerugian karena terganggunya aktifitas yang sedang berlangsung. Apabila pada gangguan tersebut terus berlangsung tanpa adanya usaha pencegahan dan pengamanan sedini mungkin maka kerugian dapat semakin bertambah besar dan area gangguan akan semakin meluas.

Untuk mencegah hal tersebut diperlukan suatu sistem koordinasi yang selektif dengan melengkapi alat-alat proteksi dalam hal ini relai-relai pengamanan. Relai pengamanan untuk melindungi peralatan terhadap kerusakan dengan cara memisahkan daerah yang mengalami gangguan secara cepat dan tepat. Selain itu, membatasi daerah yang mengalami gangguan seminim mungkin sehingga mutu dan keandalan penyaluran terjamin. Gardu Induk Panakkukang yang sebagian besar penggunaan daya listriknya untuk menunjang sektor industri rumah tangga, penerangan dan pelayanan jasa instansi pemerintah diharapkan sistem proteksinya tanggap terhadap gangguan-gangguan yang terjadi kapan saja dalam penyaluran energi listriknya. Olehnya itu, pada transformator daya gardu induk harus dipasang sistem proteksi yang handal dan terpercaya. Oleh karena itu, peneliti ingin

mengetahui bagaimana sistem proteksi transformator daya Gardu Induk Panakkukang.

B. Rumusan masalah

Adapun rumusan masalahnya adalah:

1. Bagaimana setelan relai diferensial untuk trafo yang ada pada Gardu Induk Panakkukang?
2. Bagaimana hasil uji performa kerja relai proteksi transformator daya yang digunakan pada Gardu Induk Panakkukang?

C. Tujuan penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai penulis dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Untuk menentukan nilai setelan relai diferensial untuk ketiga trafo (Trafo#1, Trafo#2 dan Trafo#3) di Gardu Induk Panakkukang.
2. Untuk mendapatkan kinerja relai dari ketiga trafo saat beban maksimum (tiga bulan terbesar) selama setahun.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dengan adanya penelitian ini antara lain :

1. Menambah kualitas pengetahuan atau profesionalisme Penulis.
2. Bisa menjadi informasi bagi pihak-pihak yang memerlukan.

E. Batasan Masalah

Gardu Induk Panakkukang merupakan bagian penting dalam penyaluran energi listrik sehingga diharapkan sistem proteksinya mampu dan handal terhadap gangguan dalam penyaluran energi listrik. Gangguan yang terjadi pada transformator daya dapat diatasi dengan memasang suatu sistem proteksi yang handal. Oleh karena itu penulis membatasi masalah pada jenis relai proteksi transformator daya yang digunakan pada Gardu Induk Panakkukang untuk mendeteksi dan mengatasi setiap gangguan.

F. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan, tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

Bab II Tinjauan pustaka, teori dasar sistem proteksi, trafo dan relai diferensial.

Bab III Metodologi penelitian, terdiri dari data pembebanan dan data sisi primer dan sekunder trafo yang dikelola dengan menggunakan program Microsoft excel.

Bab IV Hasil Penelitian dan Pembahasan, berisi hasil penelitian dan pembahasan yang dibuat dalam tugas akhir.

Bab V Penutup, berisi kesimpulan dari hasil pembahasan dan saran-saran yang menunjang perkembangan tugas akhir.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Proteksi Gardu Induk

Sistem proteksi merupakan bagian yang sangat penting dalam suatu instalasi tenaga listrik, selain untuk melindungi peralatan utama bila terjadi gangguan hubung singkat, sistem proteksi juga harus dapat mengurangi daerah yang terganggu dan memisahkan daerah yang tidak terganggu, sehingga gangguan tidak meluas dan kerugian yang timbul akibat gangguan tersebut dapat di minimalisasi.

Relai proteksi gardu induk terdiri dari:

- a) Relai proteksi Trafo Tenaga;
- b) Relai proteksi busbar atau kopel;
- c) Relai proteksi PMT;
- d) Relai proteksi kapasitor dan reaktor;

B. Sistem Proteksi

Keandalan dan keberlangsungan suatu sistem tenaga listrik dalam melayani konsumen sangat tergantung pada sistem proteksi yang digunakan. Oleh karena itu dalam perencanaan suatu sistem tenaga, perlu dipertimbangkan kondisi-kondisi gangguan yang mungkin terjadi pada sistem. Mengingat arus gangguan yang cukup besar, maka perlu secepat mungkin

dilakukan proteksi. Hal ini memerlukan suatu peralatan yang digunakan untuk mendeteksi keadaan-keadaan tidak normal tersebut dan selanjutnya menginstruksikan *circuit breaker* yang tepat untuk bekerja memutuskan rangkaian atau sistem yang terganggu, peralatan tersebut kita kenal dengan relai.

1. Fungsi Sistem Proteksi

Sistem proteksi sangat diperlukan, untuk menghindari ataupun mengurangi kerusakan peralatan-peralatan akibat gangguan (*kondisi abnormal operasi sistem*). Semakin cepat reaksi perangkat proteksi yang digunakan maka sedikitlah pengaruh gangguan terhadap kemungkinan kerusakan alat.

Selain itu untuk cepat melokalisir luas daerah terganggu menjadi sekecil mungkin. Memberikan pelayanan listrik dengan keandalan yang tinggi konsumsi dan juga mutuh yang baik serta untuk mengamankan manusia terhadap bahaya yang ditimbulkan oleh listrik.

2. Syarat-Syarat Sistem Proteksi

Lima syarat yang harus dimiliki oleh relai sebagai pengaman pada sistem, yaitu:

a. Keandalan

Keandalan didefinisikan secara umum sebagai ukuran kepastian sebuah peralatan atau sistem untuk beroperasi sesuai yang diharapkan. Jadi, sistem proteksi harus bekerja secara benar untuk semua kondisi gangguan pada *zona* yang telah ditentukan dan dapat memblok (tidak bekerja) secara tepat jika terjadi gangguan di luar *zona* proteksinya agar relai tidak mengalami salah dalam kerjanya.

b. Selektivitas

Selektivitas dapat diartikan bahwa relai berlokasi dekat gangguan harus memiliki prioritas operasi. Sifat ini sangat berhubungan dengan kontinuitas pelayanan maksimum dengan pemutusan minimum. Bila terjadi gangguan, maka sistem proteksi harus memilih dan men*pick-up circuit breaker* yang tepat untuk memisahkan bagian jaringan sekecil mungkin.

c. Kecepatan

Sebuah relai proteksi harus bereaksi secepat mungkin ketika merasakan ada gangguan. Sifat ini sangat erat kaitannya dengan peralatan, ketahanan peralatan dan kualitas sistem.

Kecepatan pemutusan pada waktu terjadi gangguan hubung singkat dapat mengurangi kerusakan pada alat-alat, membantu mempertahankan stabilitas dari mesin pada waktu kerja paralel, menjaga kerja normal pada

daerah yang terganggu. Dalam sistem proteksi, perlambatan waktu pengaman (*time relai*) dipakai jika alat pengaman *zona* bekerja, atau apabila keadaan mengizinkan diadakan perlambatan waktu.

d. Sensitivitas

Sensitivitas sistem proteksi baru adalah kemampuan sistem untuk mengidentifikasi kondisi abnormal yang melebihi nilai *pickup* atau nilai ambang deteksi dan menginisiasi aksi proteksi ketika kuantitas yang inderanya melewati ambang. Selain itu harus dapat membedakan jenis dan lokasi gangguan.

e. Ekonomis dan Sederhana

Relai harus memberikan perlindungan maksimum pada tingkat biaya minimum yang memiliki rangkaian dan piranti sederhana, sehingga harganya lebih ekonomis. Dalam kenyataannya tidak semua kriteria tersebut dapat dipenuhi secara simultan, jika perlu diadakan kompromi maka harus dievaluasi berdasarkan perbandingan resiko.

3. Daerah Proteksi

Untuk mendapatkan sistem proteksi yang cukup baik dalam sistem tenaga listrik, sistem tenaga tersebut dibagi dalam beberapa daerah proteksi

yakni dengan memutuskan *sub-sistem* seminim mungkin, yang dimaksud keterangan diatas adalah:

- a) Generator
- b) Transformator daya
- c) Busbar, transmisi
- d) Sub- transmisi
- e) Distribusi
- f) Beban



Gambar 2.1. Daerah proteksi pada sistem tenaga listrik

Setiap daerah pengaman pada umumnya terdiri dari satu atau lebih element sistem tenaga listrik. Misalnya generator, busbar, transformator, saluran udara dan lain-lain. Agar seluruh sistem tenaga listrik dapat diproteksi, maka harus ada daerah tumpang tindih (*overlap*), artinya ada element sistem proteksi oleh dua daerah proteksi.

Suatu sistem proteksi yang gagal bekerja biasanya disebabkan hal-hal di bawah ini:

- a) Relai Proteksi Rusak
- b) Kesalahan setting
- c) CT Jenuh
- d) Rangkaian ke *pick-up* Putus
- e) Relai Bantu Rusak
- f) *Pick-up* Coil PMT Rusak
- g) PMT macet atau kelainan PMT
- h) Catu Daya DC hilang

4. Sistem Proteksi Utama dan Penyangga

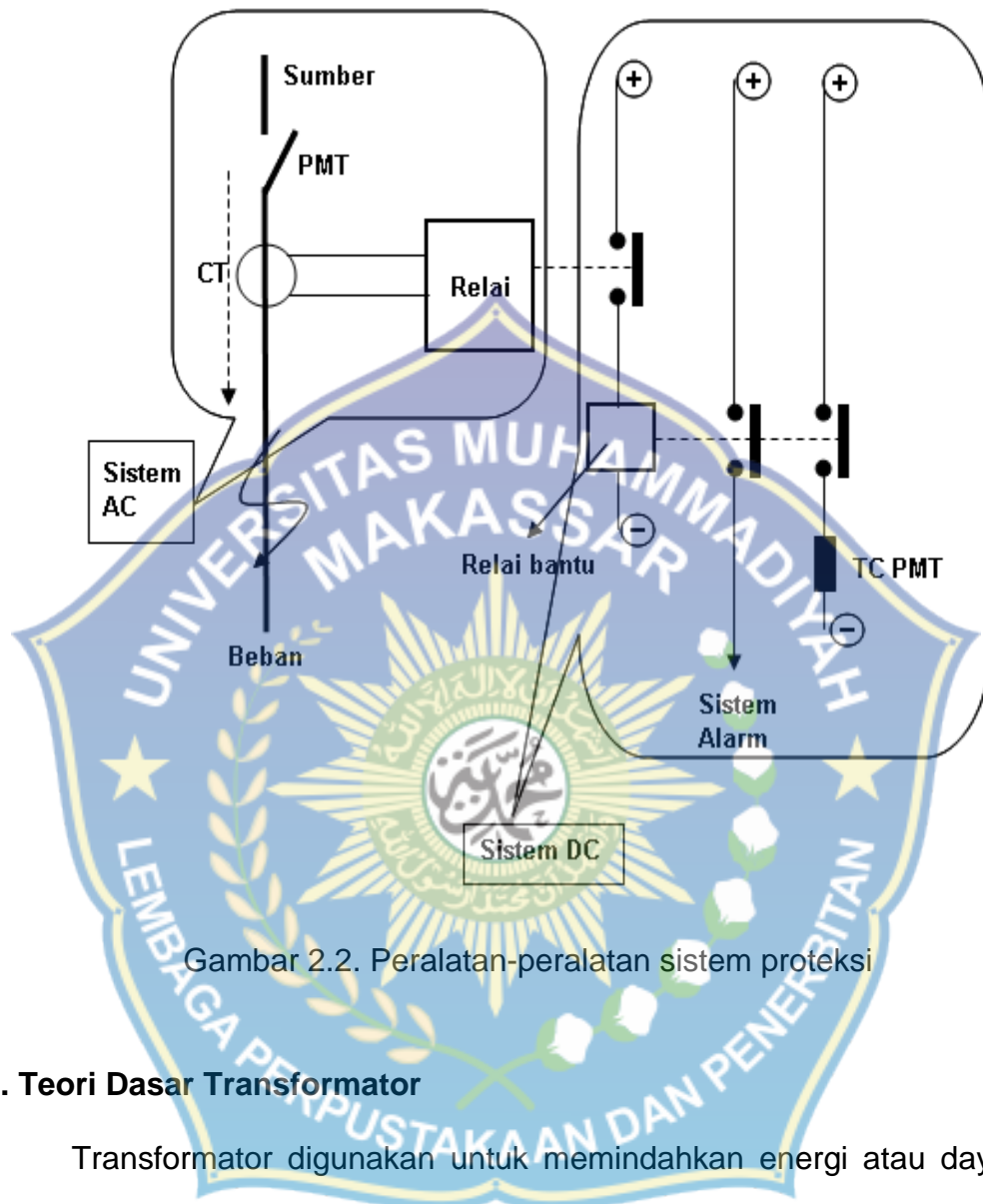
Untuk mengatasi adanya kegagalan kerja sistem proteksi, maka pengamanan sistem tenaga listrik sistem proteksi dibuat berlapis menjadi dua kelompok, yaitu proteksi utama dan proteksi cadangan. Proteksi utama akan segera bekerja jika terjadi gangguan, sedangkan proteksi cadangan akan bekerja jika proteksi utama gagal bekerja. Kegagalan kerja dari sistem proteksi dapat disebabkan oleh salah satu element proteksi tersebut.

5. Peralatan-Peralatan Proteksi

Suatu sistem proteksi terdiri dari beberapa peralatan-peralatan antara lain:

- a) Relai proteksi berfungsi sebagai element perasa atau pengukur untuk mendeteksi gangguan;
- b) Pemutus tenaga (PMT) berfungsi sebagai pemutus arus dalam sirkuit tenaga untuk melepas bagian sistem yang terganggu;
- c) Trafo arus (CT) dan trafo tegangan (PT) berfungsi untuk mengubah besarnya arus atau tegangan dari sirkuit primer ke sirkuit sekunder (untuk sistem proteksi dan pengukuran);
- d) Sumber arus searah (*bateray*) berfungsi untuk memberi suplai kepada relai dan rangkaian kontrol atau proteksi;
- e) Pengawatan (*wiring*) berfungsi sebagai penghubung komponen-komponen proteksi sehingga menjadi satu sistem.





Gambar 2.2. Peralatan-peralatan sistem proteksi

C. Teori Dasar Transformator

Transformator digunakan untuk memindahkan energi atau daya dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik berikutnya tanpa mengubah frekuensinya. Transformator biasanya dapat menaikkan atau menurunkan tegangan sekaligus juga dapat menaikkan dan menurunkan arus. Prinsip kerja transformator adalah induksi antara dua rangkaian yang dilingkupi *fluks magnetik*.

Transformator adalah alat untuk:

1. Mentransfer daya dari satu rangkaian ke rangkaian lain;
2. Dilakukan tanpa mengubah frekuensi;
3. Transfer daya dilakukan dengan induksi elektromagnetik;
4. Jika dua rangkaian listrik dalam lilitan iduktif akan mempengaruhi satu sama lainnya.

Transformator adalah suatu alat untuk memindahkan daya listrik arus bolak-balik dari suatu rangkaian ke rangkaian yang lainnya secara induksi elektromagnetic (Sumanto, 1996).



Gambar 2.3. Bagian dari tranformator

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan sumber, maka akan mengalir arus bolak-balik I_1 pada kumparan tersebut. Oleh karena kumparan mempunyai inti, arus I_1 menimbulkan fluks magnet yang juga berubah-ubah pada intinya sehingga pada kumparan primer akan timbul GGL induksi e_p .

Besarnya GGL induksi pada kumparan primer adalah :

$$e_p = -N_p \frac{d\phi}{dt} \text{ volt} \quad (1)$$

Dimana: e_p = GGL induksi pada kumparan primer

N_p = Jumlah lilitan kumparan primer

$d\phi$ = perubahan garis-garis gaya magnet dalam satuan weber

(1 weber = 10^8 maxwell)

dt = Perubahan waktu dalam satuan detik

Fluks magnet yang menginduksikan GGL induksi e_p juga dialami oleh kumparan sekunder karena merupakan *fluks* bersama. Dengan demikian *fluks* tersebut menginduksikan GGL induksi e_s pada kumparan sekunder.

Besarnya GGL induksi pada kumparan sekunder adalah:

$$e_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \text{ volt} \quad (2)$$

Dimana: N_s = jumlah lilitan kumparan sekunder

Dari persamaan (1) dan (2) didapatkan perbandingan lilitan berdasarkan perbandingan GGL induksi yaitu:

$$a = \frac{e_p}{e_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (3)$$

a = nilai perbandingan lilitan transformator

apabila, $a < 1$, maka transformator berfungsi untuk menaikkan tegangan

$a > 1$, maka transformator berfungsi untuk menurunkan tegangan

Fluks pada saat t dinyatakan dengan pernyataan $\phi(t) = \phi_m \sin \omega t$,
 (dimana ϕ_m adalah harga fluks maksimum dalam satuan *weber*) sehingga
 GGL induksi pada kumparan primer adalah:

$$e_p = -N_p \frac{d\phi}{dt} \text{ volt}$$

$$e_p = -N_p \frac{d\phi_m \sin \omega t}{dt}$$

$$e_p = -N_p \omega \phi_m \cos \omega t$$

$$e_p = -N_p \omega \phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

Dari persamaan (4) dapat dibuktikan bahwa, *fluks* magnet fungsi sinus
 menimbulkan GGL induksi fungsi sinus. GGL induksi kumparan primer
 maksimum adalah $(e_p)_{maks} = N_p \omega \phi_m$ dan besar tegangan efektif (e_p) dapat
 dihitung dengan persamaan:

$$e_p = \frac{(E_p)_{maks}}{\sqrt{2}}$$

$$e_p = \frac{N_p \omega \phi_m}{\sqrt{2}}$$

$$e_p = \frac{2 \pi f N_p \phi_m \sqrt{2}}{2} \quad (5)$$

$$e_p = 3,14 \times 1,41 f N_p \phi_m$$

$$e_p = 4,44 f N_p \phi_m$$

Dengan cara yang sama didapatkan:

$$e_s = 4,44 f N_s \Phi_m \quad (6)$$

Apabila transformator dianggap ideal, sehingga dianggap tidak terdapat kerugian-kerugian daya, maka daya input (P_i) dapat dianggap sama dengan daya output (P_o) maka:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} \quad (7)$$

Dari persamaan (3) dan (7) didapatkan, untuk trafo ideal berlaku:

$$a = \frac{N_p}{N_s} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

1. Transformator Daya

Transformator daya adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya (mentransformasikan tegangan). Dalam operasi, umumnya transformator-transformator tenaga ditanahkan pada titik netralnya sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan atau proteksi, sebagai contoh transformator 150/70 kV di tanahkan secara langsung disisi netral 150 kV, dan transformator 70/20 kV di tanahkan dengan tahanan disisi netral 20 kV nya. Transformator yang telah diproduksi terlebih dahulu melalui pengujian sesuai standar yang telah ditetapkan.

2. Transformator Arus

Transformator arus (*current transformer*) adalah tipe instrumen transformator yang didesain untuk mendukung arus yang mengalir pada kumparan sekunder sebanding dengan arus bolak-balik yang mengalir pada sisi primer. Secara umum transformator ini digunakan untuk mengukur dan melindungi relai pada industri yang memakai tegangan tinggi, dimana transformator ini mempunyai fasilitas pengukuran yang aman dalam mengukur jumlah arus yang besar, begitu juga dengan tegangan tinggi.

Disamping penggunaannya untuk mengukur arus, transformator ini juga dibutuhkan untuk pengukuran daya dan energi, pengukuran jarak jauh dan relai proteksi. Kumparan primer transformator arus dihubungkan secara seri dengan jaringan atau peralatan yang akan diukur arusnya, sedangkan kumparan sekunder dihubungkan dengan peralatan meter dan relai proteksi. Pada umumnya peralatan ukur dan relai membutuhkan arus 1 atau 5 A.

Rating gulungan sekunder CT ini dapat dilampaui untuk periode waktu yang singkat tanpa merusak gulungan tersebut. Transformator arus bekerja sebagai transformator yang terhubung singkat, kawasan transformator arus yang digunakan untuk pengukuran biasanya 0,05 s/d 1,2 kali arus yang akan diukur, sedangkan transformator arus untuk proteksi harus mampu bekerja lebih dari 10 sampai 20 kali arus pengenalnya.

Standar untuk perbandingan arus CT telah pula ditetapkan, dan beberapa nilainya dapat diperoleh pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1. Standar perbandingan CT (Stevenson Jr.,1990)

Perbandingan Arus	Perbandingan Arus	Perbandingan Arus
50 : 5	100 : 5	150 : 5
200 : 5	250 : 5	300 : 5
400 : 5	450 : 5	500 : 5
600 : 5	800 : 5	900 : 5
1000 : 5	1200 : 5	

Trafo Arus (*current transformator*) yaitu peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada instalasi tenaga listrik disisi primer (TET, TT dan TM) yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi arus yang kecil secara akurat dan teliti untuk keperluan pengukuran dan proteksi.

Prinsip kerja trafo arus adalah sebagai berikut:



Gambar 2.4. Rangkaian pada trafo arus

Untuk trafo yang dihubungkan singkat : $I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2$

Untuk trafo pada kondisi tidak berbeban:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Dimana

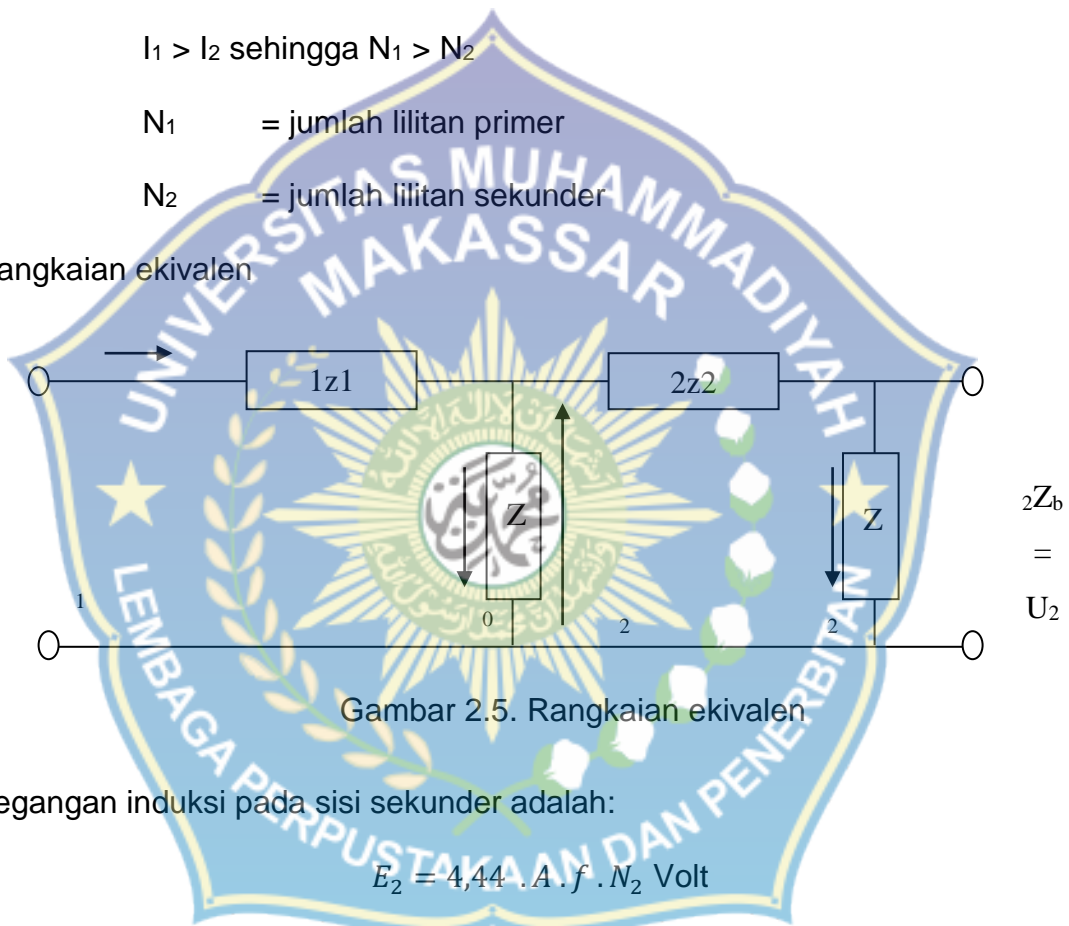
$$a = \frac{N_1}{N_2}$$

$I_1 > I_2$ sehingga $N_1 > N_2$

N_1 = jumlah lilitan primer

N_2 = jumlah lilitan sekunder

Rangkaian ekuivalen



Gambar 2.5. Rangkaian ekuivalen

Tegangan induksi pada sisi sekunder adalah:

$$E_2 = 4,44 \cdot A \cdot f \cdot N_2 \text{ Volt}$$

Tegangan jepit rangkaian sekunder adalah:

$$E_2 = I_2 \cdot (Z_2 + Z_b) \text{ Volt}$$

$$Z_b = Z_{kawat} + Z_{inst} \text{ Volt}$$

Dalam aplikasinya harus dipenuhi $U_1 > U_2$

- Dimana :
- B = kerapatan fluksi (tesla)
 - A = luas penampang (m^2)
 - f = frekuensi (Hz)
 - N_2 = jumlah lilitan sekunder
 - U_1 = tegangan sisi primer
 - U_2 = tegangan sisi sekunder
 - Z_b = impedansi/tahanan dari trafo arus
 - Z_{kawat} = impedansi/tahanan kawat dari terminasi CT
 - Z_{inst} = impedansi/tahanan instrumen, misalnya relai proteksi



Gambar 2.6. Diagram fasor arus dan tegangan pada trafo

a) Fungsi Trafo Arus

Fungsi dari trafo arus adalah:

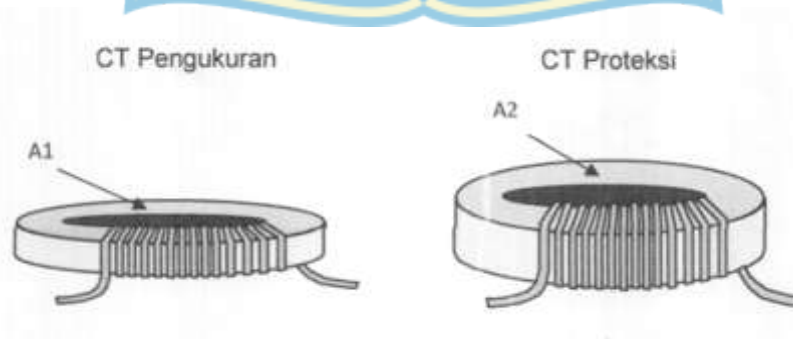
1. Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem *metering* dan proteksi.
2. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran.
3. Standarisasi besaran sekunder untuk arus nominal 1 A dan 5 A. Menurut fungsinya trafo arus dibedakan menjadi dua yaitu:
 - a. Trafo arus pengukuran
 1. Trafo arus pengukuran untuk *metering* memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya) 5% - 120% arus nominalnya tergantung dari kelasnya dan tingkat kejenuhannya yang relatif rendah dibandingkan trafo arus untuk proteksi.
 2. Penggunaan trafo arus pengukuran untuk Amperemeter, Watt-meter, VARh-meter, dan $\cos \phi$ meter.
 - b. Trafo arus proteksi
 1. Trafo arus untuk proteksi, memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenalnya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi.

2. Penggunaan trafo arus proteksi untuk relai arus lebih (OCR dan GFR), relai beban lebih, relai diferensial, relai daya dan relai jarak.
3. Perbedaan mendasar trafo arus pengukuran dan proteksi adalah pada titik saturasinya seperti pada kurva saturasi di bawah.



Gambar 2.7. Kurva kejenuhan CT untuk pengukuran dan proteksi

4. Trafo arus untuk pengukuran dirancang supaya lebih cepat jenuh dibandingkan trafo arus proteksi sehingga konstruksinya mempunyai luas penampang inti yang lebih kecil (Gambar 2.8).



Gambar 2.8. Luas penampang inti trafo arus

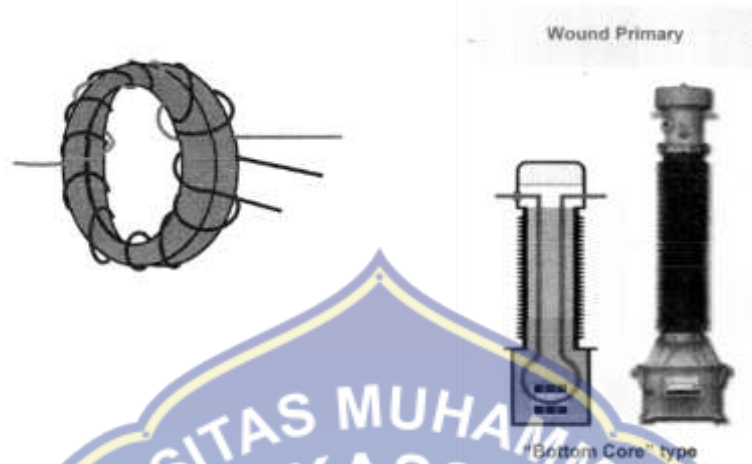
b) Jenis Trafo Arus

1. Jenis trafo arus menurut tipe konstruksi dan pasangannya
 - a. Tipe konstruksi
 - 1) Tipe cincin (*ring/window type*)
 - 2) Tipe cor-coran *cast resin (mounded cast resin type)*
 - 3) Tipe tangki minyak (*oil tank type*)
 - 4) Tipe trafo arus *bushing*
 - b. Tipe pemasangan
 1. Pasangan dalam (*indoor*)
 2. Pasangan luar (*outdoor*)
2. Jenis trafo arus berdasarkan konstruksi belitan primer
 - a. Sisi primer batang (*bar primary*)



Gambar 2.9. Bar primary

b. Sisi primer lilitan (*wound primary*)



Gambar 2.10. Wound primary

3. Jenis trafo arus berdasarkan konstruksi jenis inti

a) Trafo arus dengan inti besi

Trafo arus dengan inti besi adalah trafo arus yang umum digunakan pada arus yang kecil (jauh di bawah nilai nominal) terdapat kecenderungan kesalahan dan pada arus yang besar (beberapa kali nilai nominal) trafo arus akan mengalami saturasi.

b) Trafo arus tanpa inti besi

Trafo arus tanpa inti besi tidak memiliki saturasi dan rugi histerisis, transformasi dari besaran primer ke besaran sekunder adalah linier diseluruh jangkauan pengukuran, contohnya koil *rogowski* (*coil rogowski*).

4. Jenis trafo arus berdasarkan jenis isolasi

Berdasarkan jenis isolasinya, trafo arus dibagi menjadi dua kelompok, yaitu:

a) Trafo arus kering

Trafo arus kering biasanya digunakan pada tegangan rendah, umumnya digunakan pada pasangan dalam ruangan (*indoor*).

b) Trafo arus *cast resin*

Trafo arus inti biasanya digunakan pada tegangan menengah, umumnya digunakan pada pasangan dalam ruangan (*indoor*), misalnya trafo arus tipe cincin yang digunakan pada kubikel penyulang 20 kV.

c) Trafo arus isolasi minyak

Trafo arus isolasi minyak banyak digunakan pada pengukuran arus tegangan tinggi, umumnya digunakan pada pasangan di luar ruangan (*outdoor*) misalnya trafo arus tipe *bushing* yang digunakan pada pengukuran arus penghantar tegangan 70 kV dan 150 kV.

d) Trafo arus isolasi SF6/*coumpond*

Trafo arus ini banyak digunakan pada pengukuran arus tegangan tinggi, umumnya digunakan pada pasangan di luar ruangan (*outdoor*) misalkan trafo arus tipe *top-core*.

5. Jenis trafo arus berdasarkan pemasangan

Berdasarkan lokasi pemasangannya, trafo arus dibagi menjadi dua kelompok, yaitu:

a) Trafo arus pemasangan luar ruangan (*outdoor*)

Trafo arus pemasangan luar ruangan memiliki konstruksi fisik yang kokoh, isolasi yang baik, biasanya menggunakan isolasi minyak untuk

rangkaian elektrik internal dan bahan keramik/porcelain untuk isolator eksternal.



Gambar 2.11. Trafo arus pemasangan luar ruangan

b) Trafo arus pemasangan dalam ruangan (*indoor*)

Trafo arus pemasangan dalam ruangan biasanya memiliki ukuran yang lebih kecil dari pada trafo arus pemasangan luar ruangan, menggunakan isolator dari bahan resin.

Gambar 2.12. Trafo arus pemasangan dalam ruangan

c) Trafo arus berdasarkan jumlah inti pada sekunder

1. Trafo arus dengan inti tunggal

Contoh: 150 – 300 / 5 A, 200 – 400 / 5 A, atau 300 – 600 / 1 A.

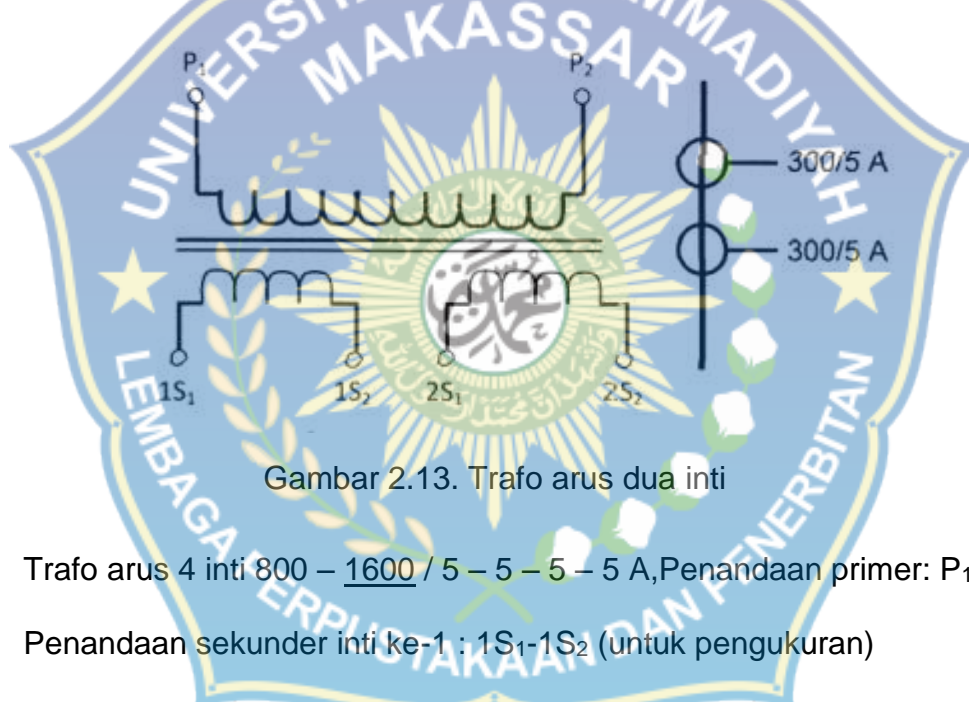
2. Trafo arus dengan inti banyak

Trafo arus dengan inti banyak dirancang untuk berbagai keperluan yang mempunyai sifat penggunaan berbeda untuk menghemat tempat.

Trafo arus 2 (dua) inti 150 – 300 / 5 – 5 A, Penandaan primer: P₁ – P₂

Penandaan sekunder inti ke-1 : 1S₁ – 1S₂ (untuk pengukuran)

Penandaan sekunder inti ke-2 : 2S₁ – 2S₂ (untuk relai arus lebih)



Gambar 2.13. Trafo arus dua inti

Trafo arus 4 inti 800 – 1600 / 5 – 5 – 5 – 5 A, Penandaan primer: P₁ – P₂

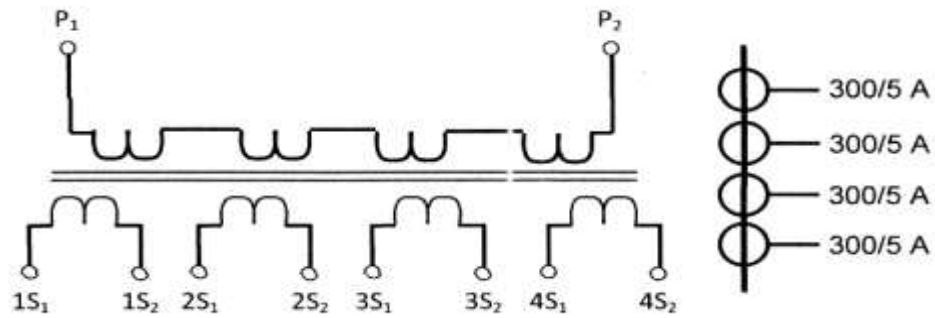
Penandaan sekunder inti ke-1 : 1S₁-1S₂ (untuk pengukuran)

Penandaan sekunder inti ke-2 : 2S₁-2S₂ (untuk relai arus lebih)

Penandaan sekunder inti ke-3 : 3S₁-3S₂ (untuk relai jarak)

Penandaan sekunder inti ke-4 : 4S₁-4S₂ (untuk proteksi rel)

Trafo arus 4 (empat) inti 800 – 1600 / 5 – 5 – 5 – 5 A



Gambar 2.14. Trafo arus empat inti

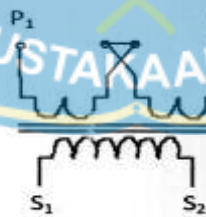
d) Trafo arus berdasarkan pengenal

Trafo arus memiliki dua pengenal yaitu pengenal primer yang biasanya dipakai adalah 150, 200, 300, 400, 600, 800, 900, 1000, 1200, 1600, 1800, 2000, 2500, 3000 dan 3600, pengenal sekunder yang biasa dipakai adalah 1 dan 5 A.

6. Berdasarkan pengenalnya, trafo arus dapat dibagi menjadi:

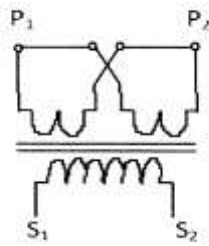
a) Trafo arus dengan dua pengenal primer

1. Primer seri yaitu CT dengan rasio 800 – 1600 / 1 A, untuk hubungan primer seri maka didapat rasio CT 800 / 1 A.



Gambar 2.15. Primer seri CT rasio 800 / 1 A

2. Primer parallel yaitu CT dengan rasio 800 – 1600 / 1 A, untuk hubungan primer paralel, maka didapat rasio CT 1600 / 1 A.



Gambar 2.16. Primer paralel CT rasio 1600 / 1 A

b) Trafo arus *multi-rasio / sekunder tap*

Trafo arus *multi-rasio* memiliki rasio tap yang merupakan kelipatan dari tap yang terkecil, umumnya trafo arus memiliki dua rasio tap, namun ada juga yang memiliki lebih dari dua tap.

1. Trafo arus dengan dua tap: 300 – 600 / 5 A, pada Gambar 2.17

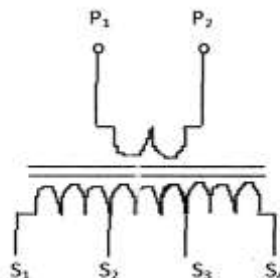
$$S_1 - S_2 = 300 / 5 \text{ A}, S_1 - S_3 = 600 / 5 \text{ A}.$$



Gambar 2.17. CT sekunder dua tap

2. Trafo arus dengan tiga tap: 150 – 300 – 600 / 5 A, pada Gambar

$$2.18 S_1 - S_2 = 150 / 5 \text{ A}, S_1 - S_3 = 300 / 5 \text{ A}, S_1 - S_4 = 600 / 5 \text{ A}$$



Gambar 2.18. CT sekunder empat tap

c) Komponen Trafo Arus

1. Tipe cincin dan Tipe cor-coran cast resin (*mounded cast resin type*)



Gambar 2.19. CT tipe cincin



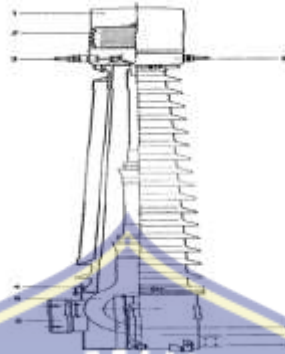
Gambar 2.20. Komponen CT tipe cincin

Keterangan:

1. Terminal utama (*primary terminal*)
2. Terminal sekunder (*secondary terminal*)
3. Kumparan sekunder (*secondary winding*)

CT tipe cincin dan cor-coran cast resin biasanya digunakan pada kubikel penyulang (tegangan 20 kV dan pemasangan *indoor*), jenis isolasi pada CT cincin adalah *Cast Resin*.

2. Tipe Tangki



Gambar 2.21. Komponen CT tipe tangki

Komponen trafo arus tipe tangki:

1. Bagian atas trafo arus;
2. Peredam perlawanan pemuaian minyak;
3. Terminal utama dan penjepit;
4. Inti kumparan dengan belitan berisolasi utama;
5. Inti dengan kumparan sekunder (*core with secondary windings*).
6. Tangki (*Tank*);
7. Tempat terminal (*terminal box*);
8. Plat untuk pertanahan (*earthing plate*).

Jenis isolasi pada trafo arus tangki adalah minyak. Trafo arus isolasi minyak banyak digunakan pada pengukuran arus tegangan tinggi, umumnya digunakan pada pasangan di luar ruangan (*outdoor*) misalkan trafo arus tipe bushing yang digunakan pada pengukuran arus penghantar tegangan 70 kV, 150 kV dan 500 kV.

3. Perbedaan Utama Trafo Arus dengan Trafo Daya

- a. Jumlah belitan kumparan primer sedikit, tidak lebih dari lima belitan;
- b. Arus primer tidak dipengaruhi beban yang terhubung pada kumparan sekunder, karena arus primer ditentukan oleh arus pada jaringan yang diukur;
- c. Semua beban pada kumparan sekunder dihubungkan seri;
- d. Terminal sekunder transformator arus tidak boleh terbuka, oleh karena itu terminal kumparan sekunder harus selalu dihubungkan dengan beban atau hubung singkat jika bebannya belum dihubungkan.

4. Faktor-Faktor Penyebab Gangguan Pada Trafo Daya

a. Gangguan Internal

Gangguan yang terjadi di daerah proteksi trafo, baik didalam trafo maupun diluar trafo sebatas lokasi CT, Penyebab gangguan dalam biasanya akibat:

- 1) Kegagalan isolasi pada belitan, lempengan inti atau baut pengikat inti atau Penurunan nilai isolasi minyak yang dapat disebabkan oleh kualitas minyak buruk, uap air tercemar dan adanya dekomposisi karena *overheating*, oksidasi akibat sambungan listrik yang buruk;
- 2) Kebocoran minyak;
- 3) Ketidaktahanan terhadap arus gangguan;
- 4) Gangguan pada *tap changer*,

- 5) Gangguan pada sistem pendingin;
- 6) Gangguan pada *bushing*.

Gangguan *internal* dapat dikelompokkan menjadi 2 (dua) kelompok, yaitu :

1) *Incipient fault*:

Gangguan terbentuk lambat dan akan berkembang menjadi gangguan besar jika tidak terdeteksi dan tidak diatasi, yang termasuk kedalam gangguan *incipient fault*, yaitu: *Overheating*, *overfluxing*, dan *over pressure*.

Penyebab *Overheating*

- a) Ketidaksempurnaan sambungan baik elektrik maupun magnetik;
- b) Kebocoran minyak;
- c) Aliran sistem pendingin tersumbat;
- d) Kegagalan kipas atau pompa sistem pendingin.

Penyebab *overfluxing*

Terjadi saat *overvoltage* dan *under frekuensi*, dapat menyebabkan bertambahnya rugi-rugi besi sehingga terjadi pemanasan yang dapat menyebabkan kerusakan isolasi lempengani inti dan bahkan isolasi belitan.

Penyebab *Overpressure*

- a) Pelepasan gas akibat *overheating*;
- b) Hubung singkat belitan-belitan sefasa;
- c) Pelepasan gas akibat proses kimia.

2) *Active fault*:

Disebabkan oleh kegagalan isolasi atau komponen lainnya yang terjadi secara cepat dan biasanya dapat menyebabkan kerusakan yang parah. Penyebab dari gangguan *Active fault* adalah sebagai berikut:

- a) Hubung singkat fasa-fasa atau fasa dengan ground;
- b) Hubung singkat antar lilitan sefasa (*intern turn*);
- c) *Core faults*;
- d) *Tank faults*; *Bushing flashovers*.

b. Gangguan Eksternal

Gangguan yang terjadi di luar daerah proteksi trafo. Umumnya gangguan ini terjadi pada jaringan yang akan dirasakan dan berdampak terhadap ketahanan kumparan primer maupun sekunder/tersier trafo. Fenomena gangguan *eksternal* seperti:

- 1) Hubung singkat pada jaringan sekunder atau tersier (penyulang) yang menimbulkan *through fault current*. Frekuensi dan besaran arus gangguan diprediksi akan mengurangi umur operasi trafo;
- 2) Pembebanan lebih (*Overload*);
- 3) *Overvoltage* akibat surja hubung atau surja petir;
- 4) *Under* atau *over frequency* akibat gangguan sistem;
- 5) *External system short circuit*.

5. Jenis Gangguan

Jika ditinjau dari sifat dan penyebabnya, gangguan bisa dikelompokkan sebagai berikut:

a) Tegangan Lebih (*over voltage*)

Tegangan lebih merupakan suatu gangguan akibat tegangan pada sistem tenaga listrik lebih besar dari yang sebenarnya.

b) Hubung Singkat

Hubung singkat adalah terjadinya hubungan penghantar bertegangan atau penghantar tidak bertegangan secara langsung tidak melalui resistor atau beban yang semestinya, sehingga terjadi aliran arus yang tidak normal (sangat besar).

c) Beban Lebih (*over load*)

Merupakan gangguan yang terjadi akibat konsumsi energi listrik melebihi energi listrik yang dihasilkan dari pembangkit.

d) Daya Balik

Suatu gangguan berubah fungsinya generator menjadi motor (beban) pada sistem pembangkit tenaga listrik.

6. Hubung Singkat

Menurut Stevenson Jr., (1994), klasifikasi gangguan hubung singkat berdasarkan bentuknya terbagi atas 2, yaitu:

a) Akibat Yang Ditimbulkan Oleh Gangguan Hubung Singkat

Besar arus hubung singkat itu tergantung dari sistem, metode hubung netral dari transformator, jarak gangguan dari unit pembangkit, angka pengenal dari peralatan utama, lama hubung singkat dan kecepatan reaksi dari alat pengaman.

Akibat-akibat yang dapat ditimbulkan oleh gangguan hubung singkat antara lain adalah :

1. Merusak peralatan karena arus yang besar atau tegangan-tegangan rendah yang ditimbulkan gangguan hubung singkat.
2. Mengganggu hubungan pelayanan daya kepada konsumen apabila gangguan itu sampai menyebabkan terputusnya suatu rangkaian (sirkuit) atau menyebabkan keluarnya suatu unit pembangkit.
3. Ledakan yang mungkin terjadi pada peralatan yang mengandung minyak isolasi sehingga menimbulkan kebakaran dan membahayakan orang di sekitarnya.

b) Gangguan Satu Fase Ke Tanah

Impedansi yang digunakan pada gangguan satu-fase ke tanah adalah penjumlahan impedansi urutan positif, urutan negatif dengan urutan nol.

7. Relai Proteksi Transformator

Pada saat terjadi gangguan atau ketidaknormalan pada sistem tenaga listrik, misalnya adanya arus lebih, tegangan lebih dan sebagainya, maka

perlu diambil suatu tindakan untuk mengatasi kondisi gangguan tersebut. Jika dibiarkan gangguan itu akan merusak semua peralatan sistem tenaga listrik yang ada. Untuk mengatasi hal tersebut, mutlak diperlukan suatu sistem pengaman yang handal. Salah satu komponen yang terpenting untuk pengaman tenaga listrik adalah relai proteksi (*protective relay*).

Relai pengaman adalah susunan piranti, baik elektronik maupun magnetik yang didesain untuk mendeteksi suatu kondisi ketidaknormalan pada peralatan listrik yang bisa membahayakan atau tidak diinginkan.

Sistem pengaman transformator berbeda antara satu transformator dengan yang lainnya, relai proteksi yang biasa digunakan pada transformator adalah:

a) Relai Bucholz

Merupakan relai yang digunakan untuk mendeteksi dan mengamankan gangguan yang terjadi di dalam transformator yang menimbulkan gas. Relai ini dipasang antara tangki transformator dan relai konservator, ia akan memberikan alarm kalau terjadi gangguan pada transformator yang relatif kecil dan akan memberikan sinyal *trip* kalau gangguan tersebut cukup serius. Relai ini biasa digunakan pada transformator berkapasitas 750 KV.

b) Relai Tekanan Lebih

Alat ini berupa membran yang terbuat dari kaca, plastik, tembaga atau katup berpegas yang berfungsi sebagai pengaman tangki transformator

terhadap kenaikan tekanan gas yang timbul di dalam tangki yang akan pecah pada tekanan tertentu dan kekuatannya lebih rendah dari kekuatan tangki transformator. Relai ini memiliki fungsi yang hampir sama dengan relai bucholz, yakni mengamankan terhadap gangguan di dalam transformator. Bedanya relai ini hanya akan bekerja oleh kenaikan tekanan gas yang tiba-tiba dan langsung mentripkan PMT.

c) Relai Diferensial

Relai diferensial merupakan suatu relai yang prinsip kerjanya berdasarkan keseimbangan (*balance*), yang membandingkan arus-arus sekunder transformator arus terpasang pada terminal-terminal peralatan atau instalasi listrik yang diamankan.

d) Relai Arus Lebih

Relai arus lebih juga merupakan perangkat penting sebagai alat proteksi saluran transmisi terhadap gangguan hubung singkat. Dari namanya, relai ini akan bekerja berdasarkan arus lebih akibat adanya gangguan hubung singkat. Apabila terjadi arus lebih akibat hubung singkat yang besarnya melebihi *setting* relai maka relai akan memberikan perintah *pick-up* ke pemutus daya sesuai dengan karakteristik waktunya.

8. Proteksi Utama Trafo Tenaga

Proteksi utama adalah suatu sistem proteksi yang diharapkan sebagai prioritas untuk mengamankan gangguan atau menghilangkan kondisi tidak

normal pada trafo tenaga. Proteksi tersebut biasanya dimaksudkan untuk memprakarsai saat terjadinya gangguan dalam kawasan yang harus dilindungi.

Ciri-ciri pengaman utama :

- a). Waktu kerjanya sangat cepat seketika (*instantaneous*);
- b). Tidak bisa dikordinasikan dengan relai proteksi lainnya;
- c). Tidak tergantung dari proteksi lainnya;
- d). Daerah pengamanannya dibatasi oleh pasangan trafo arus, dimana relai diferensial dipasang.

D. Relai Diferensial

Penggunaan relai diferensial sebagai relai proteksi, antara lain pada generator, transformator daya, busbar dan saluran transmisi. Relai diferensial digunakan sebagai pengaman utama (*main protection*). Relai ini sangat selektif sehingga tidak perlu dikordinir dengan relai lain. Di samping itu sistem kerjanya sangat cepat dan tidak memelurkan waktu tunda (*time delay*).

Relai diferensial berfungsi mengamankan transformator dari gangguan dalam transformator antara lain *flash over* antara kumparan dengan kumparan atau kumparan dengan tangki atau tangki dengan belitan di dalam kumparan ataupun beda kumparan. Selain itu juga untuk mendeteksi dan

mengamankan transformator terhadap gangguan hubung singkat di dalam kumparan dan hubung singkat antar fase kumparan.

1. Prinsip Kerja Relai Diferensial

Relai ini bekerja berdasarkan keseimbangan arus-arus yang masuk pada relai. Dalam kondisi normal, arus mengalir melalui peralatan listrik yang diamankan (generator, transformator, dll). Arus-arus sekunder transformator arus, yaitu I_1 dan I_2 bersirkulasi melalui jalur 1a. Jika relai pengaman dipasang antara terminal 1 dan 2, maka dalam kondisi normal tidak akan ada arus yang mengalir melaluinya. Jika terjadi gangguan di luar peralatan listrik yang diamankan (*external fault*), maka arus yang mengalir akan bertambah besar, akan tetapi sirkulasinya akan tetap sama dengan pada kondisi normal sehingga relai pengaman tidak akan bekerja untuk gangguan luar tersebut.

Jika gangguan terjadi di dalam (*internal fault*) maka arah sirkulasi arus disalah satu sisi akan terbalik, menyebabkan keseimbangan pada kondisi normal terganggu, akibatnya arus ID akan mengalir melalui relai proteksi dari terminal 1 menuju terminal 2.

Bila arus tersebut lebih besar dari pada *pickup setting* relai proteksi, maka relai proteksi akan bekerja dan memerintahkan *circuit breaker* untuk putus (*tripping*) sehingga peralatan atau instalasi listrik yang terganggu dapat diisolir dari sistem tenaga listrik, sistem ini biasa dikenal dengan *diferensial longitudinal*. Tipe relai diferensial yang sering digunakan adalah *persentase*

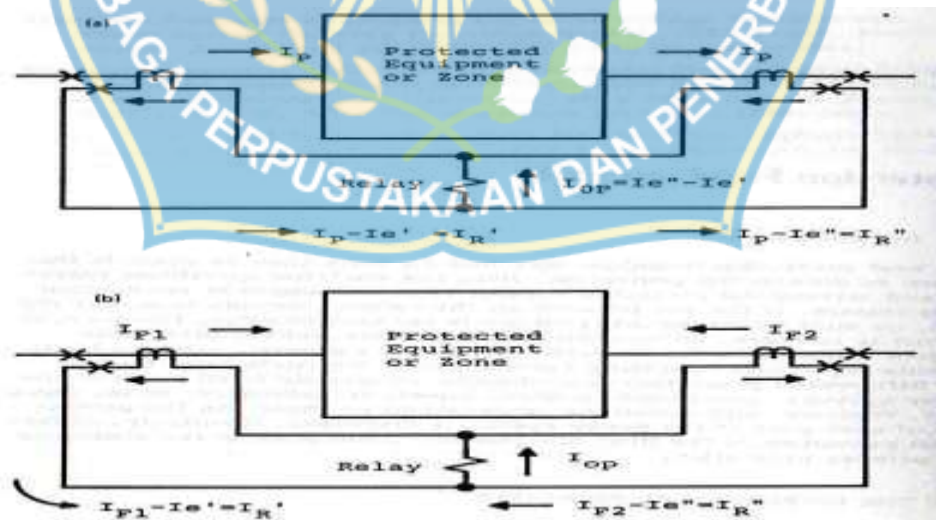
diferensial, pada dasarnya sama dengan tipe *over current* (arus lebih), relai ini tidak dihubungkan dalam sirkuit diferensial.

Teknik dasar dari proteksi diferensial diperlihatkan dalam Gambar 2.22 dan guna penyederhanaan hanya dua sirkuit dari daerah proteksi yang diperlihatkan dalam gambar. Sirkuit-sirkuit ganda mungkin saja digunakan, namun prinsip dasarnya adalah sama. Jumlah arus yang menuju daerah proteksi akan sama dengan jumlah arus yang meninggalkan daerah proteksi pada saat operasi normal. Demikian pula halnya bila digunakan sistem diferensial tegangan.

Pada operasi normal dan untuk semua gangguan eksternal, arus-arus sekunder dalam relai proteksi adalah perbedaan arus-arus eksitasi dari CT yang terhubung. I_p adalah arus primer yang menuju atau meninggalkan zona proteksi. $I_p - I_e$ adalah arus sekunder yang besarnya sama dengan arus primer dibagi dengan rasio CT dikurang arus eksitasi. Meski digunakan CT dari tipe dan rasio yang sama, arus relai I_{op} akan selalu ada meskipun kecil dan tidak pernah nol. Hal ini karena adanya susut antara zona proteksi dan perbedaan kecil antara CTs. Dengan asumsi bahwa tidak ada CT yang mengalami kejenuhan berarti bila dilalui arus-arus AC simetris maksimum. Dengan CT dan rasio yang berbeda, perbedaan yang cukup besar akan muncul dan harus diminimisasi dan pengaturan arus pick-up (angkat) relai tidak akan beroperasi pada setiap kondisi.

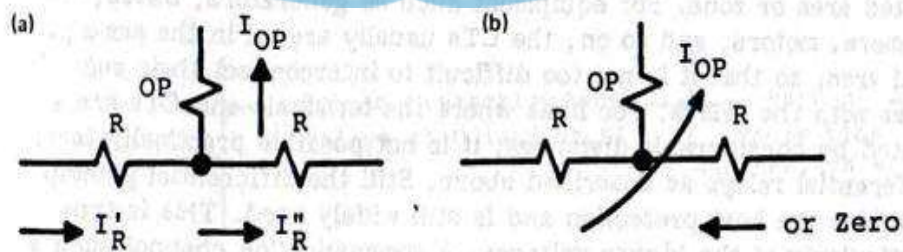
Selama gangguan eksternal unjuk kerja transien dari beberapa CT akibat kenaikan arus yang tiba-tiba dan komponen DC *offset* dapat menghasilkan arus-arus operasi transien yang besar. Oleh karena itu sulit dan tidak praktis digunakan relai *instantaneous*. Relai-relai *time-delay* dapat digunakan dengan kehati-hatian yang tinggi.

Untuk gangguan internal, Gambar 2.22b memperlihatkan bahwa arus operasi relai diferensial esensinya adalah jumlah arus-arus masukan yang menuju gangguan. Besaran ini merupakan arus gangguan total dengan basis arus sekunder. Kecuali untuk gangguan internal yang sangat kecil, pemindaian yang baik dapat digunakan untuk mendeteksi masalah dalam zona diferensial. Untuk memicu agar relai diferensial dapat beroperasi tidak memerlukan sumbangan arus gangguan dari semua sirkuit, terutama untuk sirkuit-sirkuit yang tidak mengalami gangguan.



Gambar 2.22. (a). Kondisi normal (b). Gangguan internal

Untuk memperoleh sensitivitas yang tinggi terhadap adanya gangguan internal ringan dengan sekuritas yang tinggi terhadap gangguan-gangguan eksternal, maka kebanyakan digunakan relai diferensial tipe persentase. Gambar 2.23. memperlihatkan skema sederhana dari relai jenis ini, sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 2.22. rangkaian sekunder dari CT dihubungkan dengan belitan penahan dari relai. Arus-arus yang merintang operasi relai tersebut. Selain itu, yang berhubungan dengan kumparan penahan adalah kumparan kerja. Arus pada kumparan ini yang akan mengoperasikan relai diferensial. Relai diferensial dapat berupa relai diferensial tetap atau *variable presentase*. Tipikal karakteristik beberapa tipe relai jenis ini diperlihatkan pada Gambar 2.23. Absis dari kurva karakteristik tersebut adalah arus penahan, yang dapat berupa arus *smaller R*"₂ atau arus *larger R*"₁ tergantung desain. Kordinat dari kurva karakteristik adalah arus operasi OP I yang dibutuhkan untuk mengoperasikan atau menggerakkan relai. Relai diferensial persentase tipe tetap yang ada, yaitu antara 10% dan 50% yang memiliki Tap untuk merubah persentase.



Gambar 2.23. (a). Gangguan eksternal (b). Gangguan internal

Untuk relai diferensial persentase 50%, arus gangguan eksternal 10 A membutuhkan selisih atau arus operasi sebesar 5 A atau lebih agar relai dapat beroperasi. Untuk tipe 10%, diperlukan selisih atau arus operasi sebesar 1 A. Relai tipe persentase variabel tidak memiliki Tap persentase. Pada arus yang rendah, persentase rendah pada tingkatan ini unjuk kerja CT berada pada tingkat terbaik. Pada arus-arus gangguan yang besar, dimana unjuk kerja relai tidak sebaik pada saat arus rendah dibutuhkan persentase yang tinggi. Hal ini dapat meningkatkan sensitivitas dan sekuritas relai.



Gambar 2.24. Tipikal karakteristik tipe relai diferensial

Perlu untuk dikenali bahwa karakteristik seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 2.24. digunakan hanya untuk gangguan eksternal atau aliran arus langsung. Relai diferensial sangat sensitif terhadap gangguan internal dimana arus-arus pada kumparan penahan dalam arah berlawanan atau salah satu arus Nol. Relai-relai ini dikalibrasi dengan arus langsung satu kumparan penahan dan kumparan operasi sedangkan kumparan lain tidak

dialiri arus. Tipikal arus angkat untuk relai rel diferensial dalam orde 0,14 A sampai 3,0 A tergantung dari tipe Tap dan aplikasi.

2. Settingan Relai

Relai disetting berdasarkan arus diferensial yang terjadi pada keadaan normal, dimana pada saat itu beban yang digunakan adalah beban maksimum. Beban maksimum tersebut sebesar 120% dari daya kompleks (Stevenson Jr., 1990).

Relai harus di-setting lebih besar dari arus diferensial yang didapatkan saat keadaan normal, sehingga semua kondisi yang menghasilkan arus diferensial lebih kecil dari setting arus relai akan dianggap sebagai kondisi normal sehingga relai tidak *pick-up*, dan apabila arus diferensial yang dihasilkan melebihi setting-an akan dianggap sebagai gangguan, sehingga relai *pick-up*.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian studi proteksi transformator Daya dilakukan pada Gardu Induk Panakkukang kelistrikan Sulawesi Selatan. Pengambilan data sebagian besar dilakukan di Area Penyaluran dan Pengaturan Beban (AP2B) PT. PLN (Persero) Wilayah Sulsel, Sultra dan Sulbar (Sulselrabar). Waktu Penelitian: 3 bulan (April-Juni) 2013.

B. Jenis Penelitian

. Adapun jenis penelitian ini adalah penelitian lapangan yang dimana sebagian besar datanya diperoleh dari pengamatan langsung atau dengan kata lain penulis melakukan survey langsung dengan objek yang akan diteliti. Penelitian ini merupakan jenis penelitian studi *literature* dan analisa data.

C. Jenis Data dan Sumber Data yang Diperlukan

Data-data akan diambil dengan teknik dokumentasi dan teknik survey di PT. PLN (Persero) wilayah Sulselrabar. Data-data yang diperlukan antara lain: data pembebanan trafo tahun 2012, diagram segaris sistem proteksi trafo, spesifikasi trafo, serta data primer dan sekunder trafo.

D. Instrumentasi Penelitian

Alat yang diperlukan dalam penelitian ini terdiri dari perangkat keras berupa 1 unit komputer dan perangkat lunak Microsoft Excel.

E. Langkah-Langkah Penelitian

Langkah-langkah penelitian dimulai dengan pengumpulan *literature*, pengambilan *literature*, pengambilan dan pemrosesan data awal, perumusan langkah-langkah:

1. Studi kepustakaan
2. Pengambilan data di PLN
3. Pengolahan atau analisis terdiri atas:
 - a. Pembuatan atau penentuan setelan relai diferensial
 - b. Menyimpulkan hasil penelitian
4. Penyusunan laporan.

F. Kerangka Pikir



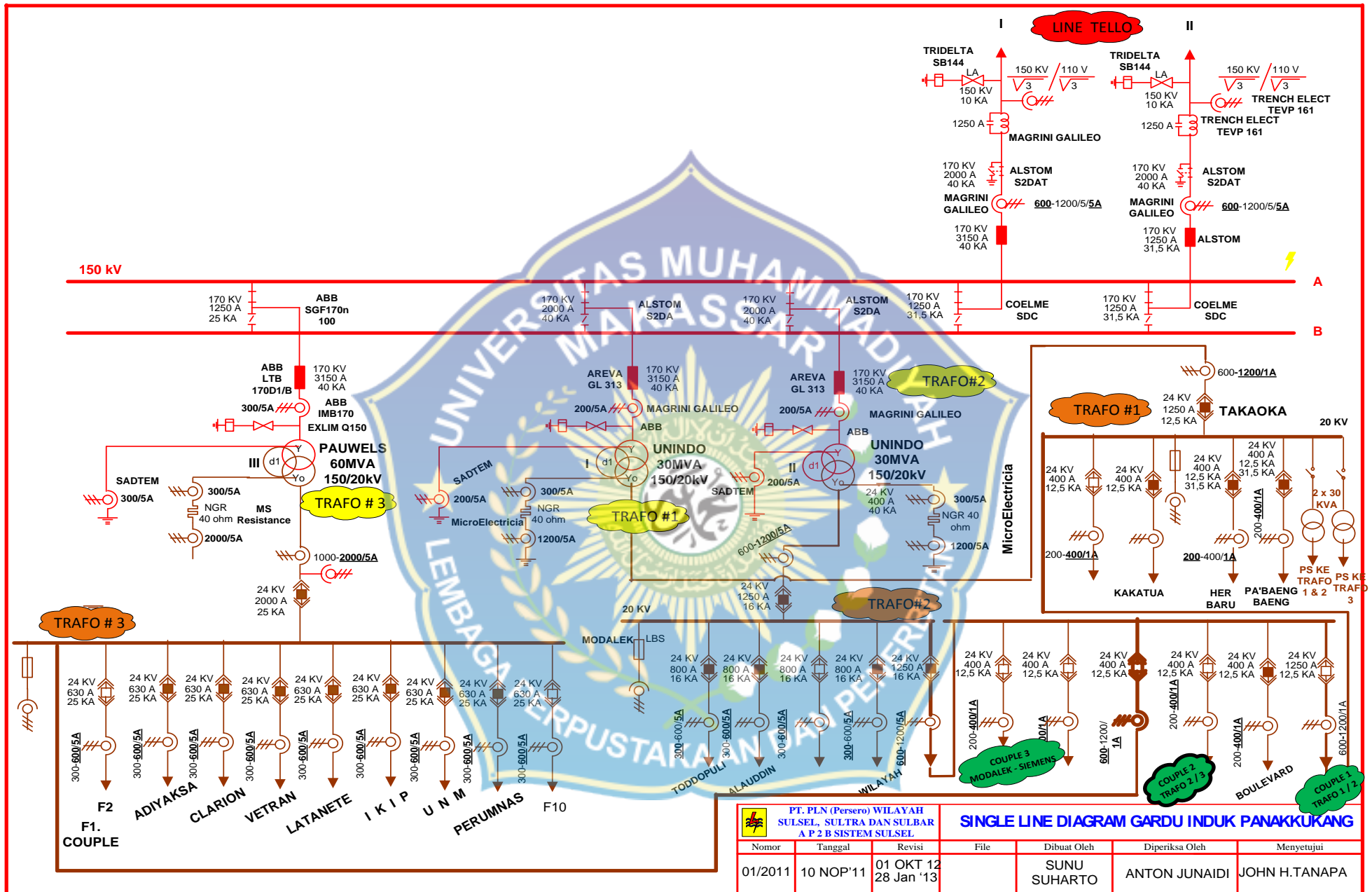
Gambar 3.1. Kerangka pikir

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Umum

Besarnya tegangan kerja Gardu Induk Panakkukang 150/20 KV dengan kapasitas 120 MVA. Gardu Induk Panakkukang merupakan jenis gardu pasangan luar yang lokasinya berada di pinggiran kota, tepatnya di jalan Letjend Hertasning. Gardu Induk Panakkukang merupakan unit transmisi dari gardu induk Tello dan menyuplai daya listrik ke seluruh wilayah Panakkukang dengan 14 buah *feeder*. *Feeder 1* melayani Pa'baeng-baeng dan sekitarnya, *feeder 2* melayani Hertasning Baru dan sekitarnya, *feeder 3* melayani Kakatua, *feeder 4* melayani daerah Veteran, *feeder 5* melayani Boulevard, *feeder 6* melayani Perumnas, *feeder 7* melayani Clarion, *feeder 8* Latanete, *feeder 9* melayani IKIP, *feeder 10* melayani Wilayah, *feeder 11* melayani adiyaksa, *feeder 12* melayani Alauddin, *feeder 13* melayani UNM dan *feeder 14* melayani Toddopuli. Hal ini dapat dilihat pada *single-line* diagram gardu induk.



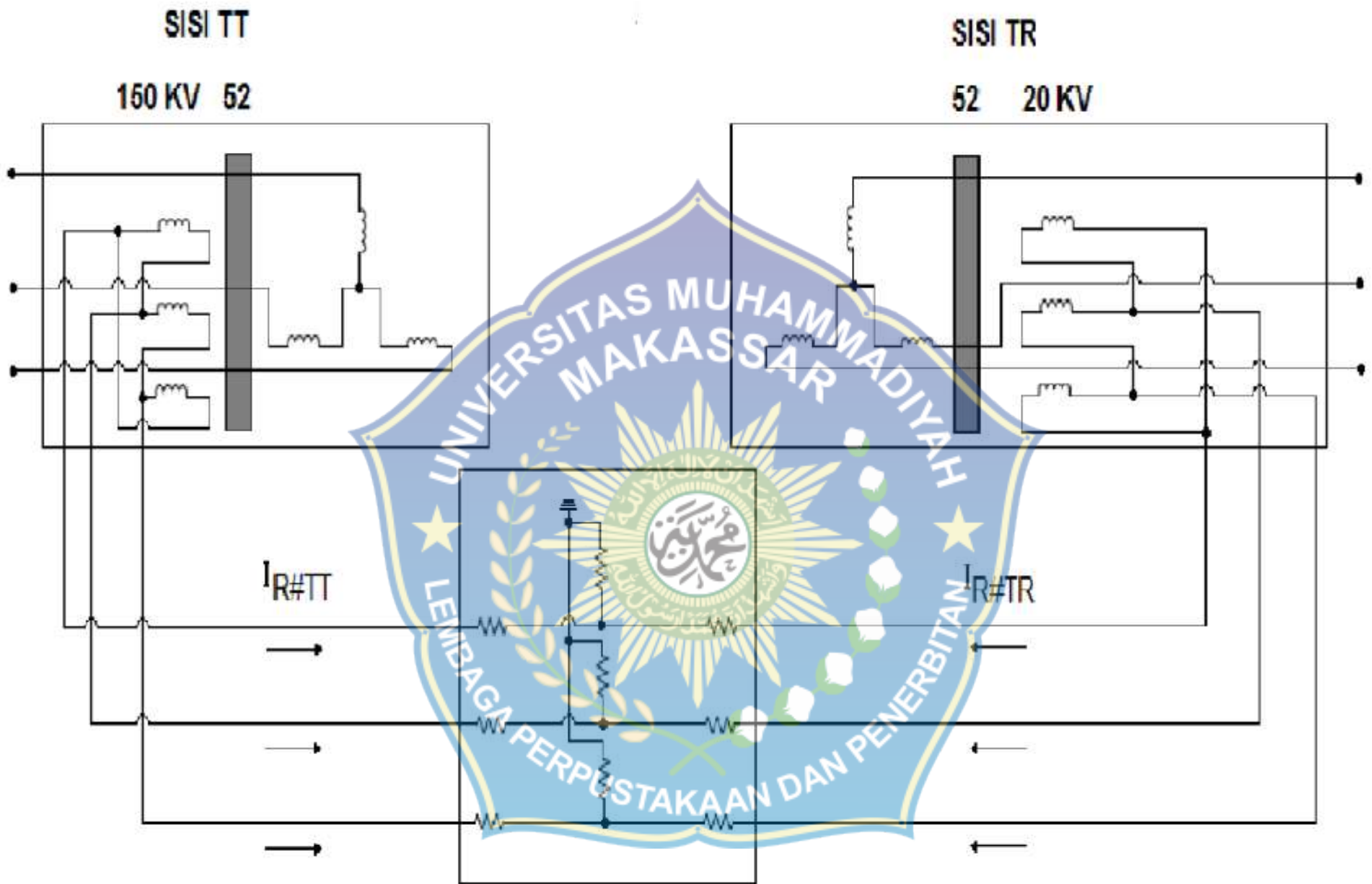
Gambar 4.1 single Line Gardu Induk Panakukang

Transformator daya yang digunakan pada Gardu Induk Panakkukang adalah transformator daya tiga fase yang berkapasitas 120 MVA dengan tegangan kerja 150/20 KV dan menggunakan sistem pendingin ONAF (*Oil Natural Air Force*).

Berdasarkan hasil penelitian, maka pada Gardu Induk Panakkukang 150/20 KV telah dilengkapi dengan berbagai sistem proteksi untuk mendeteksi dan melindungi alat dari setiap gangguan yang akan terjadi pada transformator daya pada gardu induk tersebut.

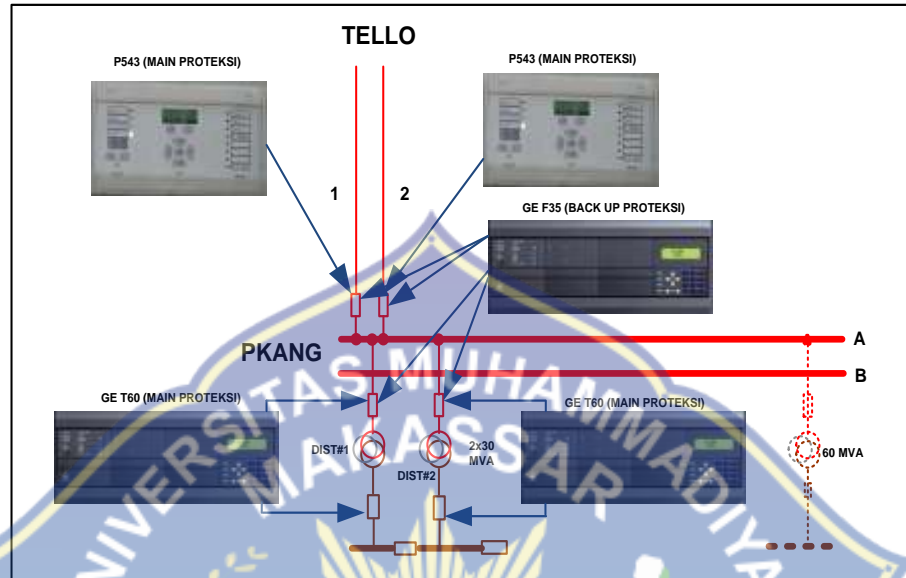
B. Relai Diferensial

Relai diferensial adalah salah satu relai pengaman utama sistem tenaga listrik yang bekerja seketika tanpa koordinasi relai disekitarnya sehingga waktu kerja dapat dibuat secepat mungkin. Proteksi relai diferensial bekerja dengan prinsip keseimbangan arus (*current balance*). Gangguan-gangguan tersebut, antara lain hubung singkat di dalam kumparan dan hubung singkat antara fase kumparan. Prinsip kerja relai diferensial pada transformator berdasarkan sirkulasi arus masukan atau perbandingan besarnya arus sisi primer dengan arus sisi sekunder. Relai diferensial yang digunakan untuk memproteksi transformator daya disini adalah relai diferensial dengan persen *slope* yang tersedia adalah 15%, 25% dan 40%.



Gambar 4.2. Relai diferensial trafo#1 dan trafo#2

Analisa unjuk kerja sistem proteksi desain proteksi G.I Panakkukang.



Gambar 4.3. Skema proteksi diferensial trafo G.I Panakkukang

C. Perhitungan Setelan Relai Diferensial untuk Trafo#1 dan Trafo#2 (30 MVA)

Trafo#1 dan Trafo#2 memiliki spesifikasi daya nominal yang sama, yakni 30 MVA. Berdasarkan Stevenson (1990), beban maksimum trafo adalah sebesar 120% dari daya nominal. Sehingga,

$$S_{maks} = 36 \text{ MVA} \quad : 36.000.000 \text{ VA}$$

Sedangkan, data tegangan nominal trafo tersebut di atas adalah sebagai berikut:

$$V_1 = 150 \text{ kV} \quad : 150.000 \text{ V}$$

$$V_2 = 20 \text{ kV} \quad : 20.000 \text{ V}$$

Sementara itu, data rasio trafo arus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$CT_1 : 200/5$$

$$CT_2 : 1.200/5$$

Arus pada sisi tegangan-tinggi (TT) transformator daya saat ia mengalirkan beban maksimum yang diharapkan adalah:

$$I_1 = \frac{S_{maks}}{V_1 \times \sqrt{3}}$$

$$I_1 = \frac{36.000.000}{150.000 \times \sqrt{3}}$$

$$I_1 = 138,564 \text{ A}$$

Arus tersebut juga sama dengan yang mengalir pada sisi primer dari trafo arus CT#2.

Sedangkan arus pada sisi tegangan-rendah (TR) pada saat transformator daya mengalirkan beban maksimum yang diharapkan adalah:

$$I_2 = \frac{S_{maks}}{V_2 \times \sqrt{3}}$$

$$I_2 = \frac{36.000.000}{20.000 \times \sqrt{3}}$$

$$I_2 = 1039,230 \text{ A}$$

Sisi TT, Trafo#1 menggunakan trafo arus dengan rasio sebesar 200/5 sehingga arus yang mengalir ke relai diferensial dari sisi ini adalah:

$$I_{1s} = \frac{I_1}{\left(\frac{200}{5}\right)}$$

$$I_{1s} = \frac{138,564}{40}$$

$$= 3,464 \text{ A}$$

Oleh karena arus tersebut di atas (I_{1s}) adalah arus pada kumparan delta dari CT#1, maka arus relai, I_{R_TT} (Gambar 4.2) sebagai berikut:

$$I_{R_TT} = I_{1s} \times \sqrt{3}$$

$$I_{R_TT} = 3,464 \times \sqrt{3}$$

$$= 6 \text{ A}$$

Jadi arus yang dibaca relai dari sisi TT trafo daya adalah enam Ampere.

Sisi TR, Trafo#1 menggunakan trafo arus dengan rasio sebesar 1.200/5 sehingga arus yang mengalir ke relai diferensial dari sisi ini adalah:

$$I_{2s} = \frac{I_2}{CT\#1}$$

$$= \frac{I_2}{1.200/5}$$

$$= \frac{1039,230}{240}$$

$$= 4,330 \text{ A}$$

Oleh karena arus tersebut di atas (I_{2s}) adalah arus pada kumparan delta dari CT#2, maka arus relai, I_{R_TR} (Gambar 4.2) sebagai berikut:

$$I_{R_TR} = I_{2s} \times \sqrt{3}$$

$$I_{R_{TR}} = 4,330x\sqrt{3}$$

$$I_{R_{TR}} = 7,5 \text{ A}$$

Arus diferensial (torsi operasi) adalah:

$$I_{Dif} = |(I_{R_{TR}} - I_{R_{TT}})|$$

$$I_{Dif} = |(7,5 - 6)|$$

$$= 1,5 \text{ A}$$

Demikian pula arus *restraining* (torsi lawan) adalah:

$$I_{Rest} = \left| \frac{I_{R_{TT}} + I_{R_{TR}}}{2} \right|$$

$$= \left| \frac{6 + 7,5}{2} \right|$$

$$= 6,75 \text{ A}$$

Sehingga, rasio arus diferensial (I_{Dif}) dengan arus *restraining* (I_{Rest}) adalah:

$$\% = \frac{I_{Dif}}{I_{Rest}} \times 100\%$$

$$= \frac{1,5}{6,75} \times 100\%$$

$$= 22,22\%$$

Sebagai faktor pengaman, harus ditambahkan paling sedikit 5% (Stevenson, 1990), pada nilai yang diperoleh di atas sehingga menghasilkan,

$$(\%) = 22,22 + 5 = 27,22\%$$

Oleh karena itu, nilai setelan yang dipilih untuk relai Trafo#1 adalah 40%. Sebagaimana yang telah disebutkan di atas bahwa Trafo#1 identik

dengan Trafo#2, sehingga setelan untuk Trafo#2 sama dengan Trafo#1 yaitu 40% juga.

D. Perhitungan Setelan Relai Diferensial untuk Trafo#3 (60 MVA)

Daya Nominal untuk Trafo#3

$$S = 72 \text{ MVA} \quad : 72.000.000 \text{ VA}$$

Adapun data tegangan nominal trafo tersebut di atas adalah sebagai berikut:

$$V_1 = 150 \text{ kV} \quad : 150.000 \text{ V}$$

$$V_2 = 20 \text{ kV} \quad : 20.000 \text{ V}$$

Sementara itu, data rasio trafo arus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$CT_1 : 300/5$$

$$CT_2 : 2.000/5$$

Arus pada sisi tegangan-tinggi (TT) transformator daya saat ia mengalirkan beban maksimum yang diharapkan adalah:

$$I_1 = \frac{S_{maks}}{V_1 \times \sqrt{3}}$$

$$I_1 = \frac{72.000.000}{150.000 \times \sqrt{3}}$$

$$I_1 = 277,128 \text{ A}$$

Arus di sisi primer trafo#3 adalah 277,128 A

Sedangkan arus pada sisi tegangan-rendah (TR) pada saat transformator daya mengalirkan beban maksimum yang diharapkan adalah:

$$I_2 = \frac{S_{maks}}{V_2 \times \sqrt{3}}$$

$$I_2 = \frac{72.000.000}{20.000 \times \sqrt{3}}$$

$$I_2 = 2.078,461 \text{ A}$$

Arus di sisi sekunder trafo#3 adalah 2.078,461 A

Pada sisi 150 kV digunakan perbandingan CT 300/5, maka arus yang mengalir ke relai diferensial dari sisi ini adalah:

Arus sekunder CT di primer transformator daya

$$I_{1s} = \frac{I_1}{\left(\frac{300}{5}\right)}$$

$$I_{1s} = \frac{277,128}{60}$$

$$= 4,619 \text{ A}$$

$$I_{2s} = \frac{I_2}{\left(\frac{2.000}{5}\right)}$$

$$I_{2s} = \frac{2078,461}{400}$$

$$= 5,196 \text{ A}$$

Untuk menyeimbangkan arus yang dihasilkan dari CT dengan Δ pada sisi 150 kV adalah:

$$I_{R_{TT}} = I_{is} \times \sqrt{3}$$

$$I_{R_{TT}} = 4,619 \times \sqrt{3}$$

$$= 8 \text{ A}$$

$$I_{R_{TR}} = I_{2s} \times \sqrt{3}$$

$$I_{R_{TR}} = 5,196 \times \sqrt{3}$$

$$I_{R_{TR}} = 9 \text{ A}$$

$$I_{Dif} = |(I_{R_{TR}} - I_{R_{TT}})|$$

$$= |(9 - 8)|$$

$$= 1 \text{ A}$$

$$I_{Rest} = \left| \frac{I_{R_{TT}} + I_{R_{TR}}}{2} \right|$$

$$= \left| \frac{(8+9)}{2} \right|$$

$$= 8,5 \text{ A}$$

$$\% = \frac{I_{Dif}}{I_{Rest}} \times 100\%$$

$$= \frac{1}{8,5} \times 100\%$$

$$= 11,77\%$$

Sebagai faktor pengaman, harus ditambahkan paling sedikit 5% pada setelan yang diperoleh di atas sehingga menghasilkan,

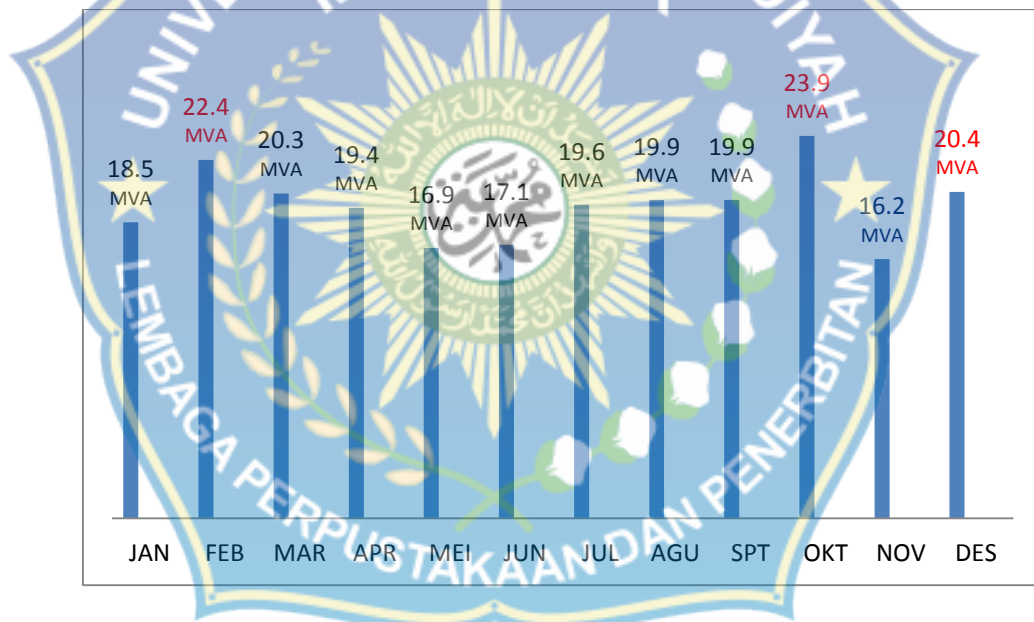
$$(\%) = 11,77 + 5 = 16,77\%$$

Nilai setelan yang dipilih untuk trafo#3 adalah 25%.

E. Analisis Kinerja Relai Saat Beban Maksimum

1. Tiga Bulan Dengan Beban Tertinggi Selama Tahun 2012 Untuk Trafo#1

Gambar 4.4 menampilkan grafik beban bulanan Trafo#1 selama pengoperasian pada tahun 2012. Tiga bulan dengan beban tertinggi yakni: Februari (22,4 MVA), Oktober (23,9 MVA) dan bulan Desember (20,4 MVA). Beban bulanan berfluktuasi dari 16,2 MVA (minimum) hingga 23,9 MVA (maksimum).



Gambar 4.4. Grafik beban bulanan, tahun 2012 untuk Trafo#1

1.1 Trafo#1 Bulan Februari 2012

Daya Nominal untuk Trafo#1, 30 MVA

$$S_{\text{feb}} = 36 \text{ MVA} \quad : 36.000.000 \text{ VA}$$

$$V_1 = 150 \text{ kV} \quad : 150.000 \text{ V}$$

$$V_2 = 20 \text{ kV} \quad : 20.000 \text{ V}$$

$$I_s = 473 \text{ A}$$

Rasio

$$CT_1 : 200/5$$

$$CT_2 : 1.200/5$$

Arus sekunder CT di primer transformator daya adalah:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{V_p}{V_s}$$

$$I_p = \frac{V_s}{V_p} \times I_s$$

$$I_p = \frac{20.000}{150.000} \times 473$$
$$= 63,067 \text{ A}$$

Sehingga arus sekunder CT di sisi tegangan tinggi (TT) adalah

$$I_{1s} = \frac{I_p}{CT\#1}$$
$$= \frac{63,067}{200/5}$$

$$= 1,577 \text{ A}$$

Sementara arus sekunder CT di sisi tegangan rendah (TR) adalah

$$I_{2s} = \frac{I_s}{CT\#1}$$
$$= \frac{473}{1.200/5}$$

$$= 1,971 \text{ A}$$

$$I_{1s\Delta} = I_{1s}x\sqrt{3}$$

$$I_{1s\Delta} = 1,577x\sqrt{3}$$

$$= 2,731\text{A}$$

$$I_{2s\Delta} = I_{2s}x\sqrt{3}$$

$$I_{2s\Delta} = 1,97x\sqrt{3}$$

$$= 3,414 \text{ A}$$

$$I_{Dif} = |(I_{2s\Delta} - I_{1s\Delta})|$$

$$= |(3,414 - 2,731)|$$

$$= 0,683 \text{ A}$$

$$I_{Rest} = \left| \frac{I_{1s\Delta} + I_{2s\Delta}}{2} \right|$$

$$= \left| \frac{(2,731 + 3,414)}{2} \right|$$

$$= 3,072 \text{ A}$$

$$\% = \frac{I_{Dif}}{I_{Rest}} x 100\%$$

$$= \frac{0,683}{3,072} x 100\%$$

$$= 22,22\%$$

1.2 Trafo#1 Bulan Oktober 2012

Daya Nominal untuk Trafo#1, 30 MVA

$$S = 36 \text{ MVA} \quad : 36.000.000 \text{ VA}$$

$$V_1 = 150 \text{ kV} \quad : 150.000 \text{ V}$$

$$V_2 = 20 \text{ kV} \quad : 20.000 \text{ V}$$

$$I_s = 729 \text{ A}$$

Rasio

$$CT_1 : 200/5$$

$$CT_2 : 1.200/5$$

Arus sekunder CT di primer transformator daya

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{V_p}{V_s}$$

$$I_p = \frac{V_s}{V_p} \times I_s$$

$$I_p = \frac{20.000}{150.000} \times 729$$

$$= 97,200 \text{ A}$$

Sehingga arus sekunder CT di sisi tegangan tinggi (TT)

$$I_{1s} = \frac{I_p}{CT\#1}$$

$$= \frac{97,200}{200/5}$$

$$= 2,430 \text{ A}$$

Sementara arus sekunder CT disisi tegangan rendah (TR) adalah:

$$I_{2s} = \frac{I_s}{CT\#1}$$
$$= \frac{729}{1.200/5}$$

$$= 3,038 \text{ A}$$

$$I_{1s\Delta} = I_{1s} \times \sqrt{3}$$

$$I_{1s\Delta} = 2,430 \times \sqrt{3}$$

$$= 4,209 \text{ A}$$

$$I_{2s\Delta} = I_{2s} \times \sqrt{3}$$

$$I_{2s\Delta} = 3,038 \times \sqrt{3}$$

$$= 5,261 \text{ A}$$

$$I_{Dif} = |(I_{2s\Delta} - I_{1s\Delta})|$$

$$= |(5,261 - 4,209)|$$

$$= 1,052 \text{ A}$$

$$I_{Rest} = \left| \frac{I_{1s\Delta} + I_{2s\Delta}}{2} \right|$$

$$= \left| \frac{(4,209 + 5,261)}{2} \right|$$

$$= 4,735 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \% &= \frac{I_{Dif}}{I_{Rest}} \times 100\% \\ &= \frac{1,052}{4,735} \times 100\% \\ &= 22,22\% \end{aligned}$$

1.3 Trafo#1 Bulan Desember 2012

Daya Nominal untuk Trafo#1, 30 MVA

$$S = 36 \text{ MVA} \quad : 36.000.000 \text{ VA}$$

$$V_1 = 150 \text{ kV} \quad : 150.000 \text{ V}$$

$$V_2 = 20 \text{ kV} \quad : 20.000 \text{ V}$$

$$I_s = 520 \text{ A}$$

Rasio

$$CT_1 \quad : 200/5$$

$$CT_2 \quad : 1.200/5$$

Arus sekunder CT di primer transformator daya adalah:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{V_p}{V_s}$$

$$I_p = \frac{V_s}{V_p} \times I_s$$

$$I_p = \frac{20.000}{150.000} \times 520$$

$$= 69,333 \text{ A}$$

Sehingga arus sekunder CT di sisi tegangan tinggi (TT) adalah:

$$\begin{aligned}
 I_{1s} &= \frac{I_p}{CT\#1} \\
 &= \frac{69,333}{200/5} \\
 &= 1,733 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Sementara arus sekunder CT di sisi tegangan rendah (TR) adalah:

$$\begin{aligned}
 I_{2s} &= \frac{I_s}{CT\#1} \\
 &= \frac{520}{1.200/5} \\
 &= 2,167 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$I_{1s\Delta} = I_{1s}x\sqrt{3}$$

$$\begin{aligned}
 I_{1s\Delta} &= 1,733x\sqrt{3} \\
 &= 3,002 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$I_{2s\Delta} = I_{2s}x\sqrt{3}$$

$$\begin{aligned}
 I_{2s\Delta} &= 2,167x\sqrt{3} \\
 &= 3,753 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$I_{Dif} = |(I_{2s\Delta} - I_{1s\Delta})|$$

$$= |(3,753 - 3,002)|$$

$$= 0,751 \text{ A}$$

$$I_{Rest} = \left| \frac{I_{1s\Delta} + I_{2s\Delta}}{2} \right|$$

$$= \left| \frac{(3,002 + 3,753)}{2} \right|$$

$$= 3,377 \text{ A}$$

$$\% = \frac{I_{Dif}}{I_{Rest}} \times 100\%$$

$$= \frac{0,751}{3,377} \times 100\%$$

$$= 22,22\%$$



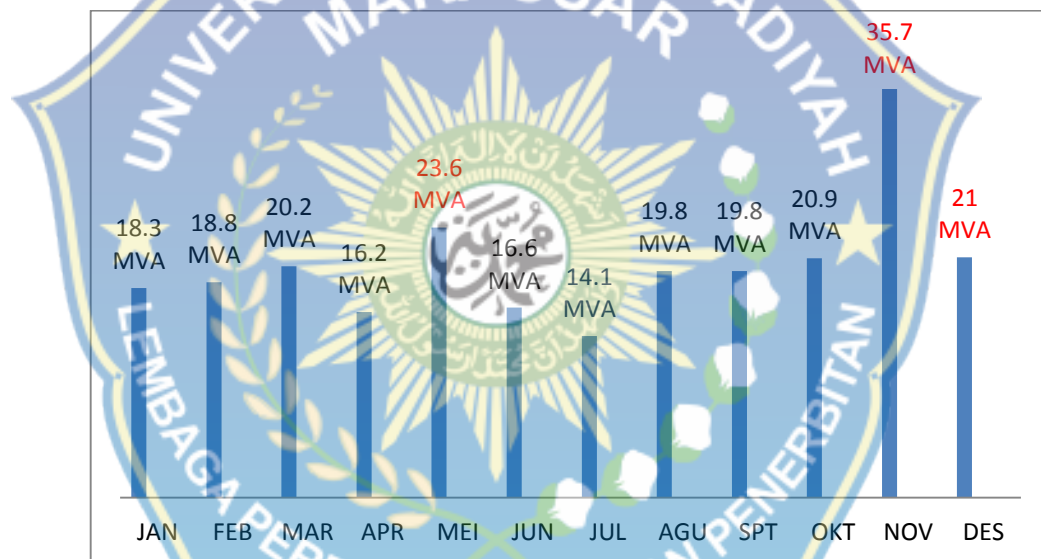
Gambar 4.5. Grafik persentase relai diferensial Trafo#1

Tabel 4.1. analisis data pembebanan trafo#1 tahun 2012

Bulan	VP	VS	IP	Is	R.Ct	R.Ct	CT#1	CT#2	Arus Relai Sisi TT	Arus Relai Sisi TR	Arus Diferensial	Arus Restraining	Slope %
					Tt 40	Tr 240							
Januari			101.333	760			2.533	3.167	4.388	5.485	1.097	4.936	22.222
Februari			63.067	473			1.577	1.971	2.731	3.414	0.683	3.072	22.222
Maret			72.533	544			1.813	2.267	3.141	3.926	0.785	3.533	22.222
April			76.667	575			1.917	2.396	3.320	4.150	0.830	3.735	22.222
Mei			69.467	521			1.737	2.171	3.008	3.760	0.752	3.384	22.222
Juni			80.267	602			2.007	2.508	3.476	4.345	0.869	3.910	22.222
Juli			58.400	438			1.460	1.825	2.529	3.161	0.632	2.845	22.222
Agustus			70.400	528			1.760	2.200	3.048	3.811	0.762	3.429	22.222
September			72.533	544			1.813	2.267	3.141	3.926	0.785	3.533	22.222
Oktober			97.200	729			2.430	3.038	4.209	5.261	1.052	4.735	22.222
November			64.800	486			1.620	2.025	2.806	3.507	0.701	3.157	22.222
Desember			69.333	520			1.733	2.167	3.002	3.753	0.751	3.377	22.222

2. Tiga Bulan Dengan Beban Tertinggi Selama Tahun 2012 Untuk Trafo#2

Gambar 4.6 menampilkan grafik beban bulanan Trafo#2 selama pengoperasian pada tahun 2012. Tiga bulan dengan beban tertinggi yakni: Mei (23,6 MVA), November (35,7 MVA) dan bulan Desember (21 MVA). Beban bulanan berfluktuasi dari 14,1 MVA (minimum) hingga 35,7 MVA (maksimum).



Gambar 4.6. Grafik beban bulanan, tahun 2012 untuk Trafo#2

2.1 Trafo#2 Bulan Mei 2012

Daya Nominal untuk Trafo#2, 30 MVA

$$S = 36 \text{ MVA} \quad : \quad 36.000.000 \text{ VA}$$

$$V_1 = 150 \text{ kV} \quad : \quad 150.000 \text{ V}$$

$$V_2 = 20 \text{ kV} \quad : \quad 20.000 \text{ V}$$

$$I_s = 500 \text{ A}$$

Rasio

$$CT_1 : 200/5$$

$$CT_2 : 1.200/5$$

Arus sekunder CT di primer transformator daya adalah:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{V_p}{V_s}$$

$$I_p = \frac{V_s}{V_p} \times I_s$$

$$I_p = \frac{20.000}{150.000} \times 500$$

$$= 66,667 \text{ A}$$

Sehingga arus sekunder CT di sisi tegangan tinggi (TT) adalah:

$$I_{1s} = \frac{I_p}{CT}$$

$$= \frac{500}{200/5}$$

$$= 1,667 \text{ A}$$

Sementara arus sekunder CT di sisi tegangan rendah (TR) adalah:

$$I_{2s} = \frac{I_s}{CT}$$

$$= \frac{500}{1.200/5}$$

$$= 2,083 \text{ A}$$

$$I_{1s\Delta} = I_{1s}x\sqrt{3}$$

$$I_{1s\Delta} = 1,667x\sqrt{3}$$
$$= 2,887 \text{ A}$$

$$I_{2s\Delta} = I_{2s}x\sqrt{3}$$

$$I_{2s\Delta} = 2,083x\sqrt{3}$$
$$= 3,608 \text{ A}$$

$$I_{Dif} = |(I_{2s\Delta} - I_{1s\Delta})|$$
$$= |(3,608 - 2,887)|$$
$$= 0,722 \text{ A}$$

$$I_{Rest} = \left| \frac{I_{1s\Delta} + I_{2s\Delta}}{2} \right|$$
$$= \left| \frac{(2,887 + 3,608)}{2} \right|$$
$$= 3,248 \text{ A}$$

$$\% = \frac{I_{Dif}}{I_{Rest}} x 100\%$$

$$= \frac{0,722}{3,248} x 100\%$$

$$= 22,22\%$$

2.2 Trafo #2 Bulan Oktober

Daya Nominal untuk Trafo#2, 30 MVA

$$S = 36 \text{ MVA} \quad : \quad 36.000.000 \text{ VA}$$

$$V_1 = 150 \text{ kV} \quad : \quad 150.000 \text{ V}$$

$$V_2 = 20 \text{ kV} \quad : \quad 20.000 \text{ V}$$

$$I_s = 653 \text{ A}$$

Rasio

$$CT_1 \quad : \quad 200/5$$

$$CT_2 \quad : \quad 1.200/5$$

Arus sekunder CT di primer transformator daya adalah:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{V_p}{V_s}$$

$$I_p = \frac{V_s}{V_p} \times I_s$$

$$I_p = \frac{20.000}{150.000} \times 653$$

$$= 87,067 \text{ A}$$

Sehingga arus sekunder CT di sisi tegangan tinggi (TT) adalah:

$$I_{1s} = \frac{I_p}{CT}$$

$$= \frac{87,067}{200/5}$$

$$= 2,177 \text{ A}$$

Sementara arus sekunder CT di sisi tegangan rendah (TR) adalah:

$$I_{2s} = \frac{I_s}{CT}$$

$$= \frac{653}{1.200/5}$$

$$= 2,721 \text{ A}$$

$$I_{1s\Delta} = I_{1s}x\sqrt{3}$$

$$I_{1s\Delta} = 2,177x\sqrt{3}$$

$$= 3,770$$

$$I_{2s\Delta} = I_{2s}x\sqrt{3}$$

$$I_{2s\Delta} = 2,721x\sqrt{3}$$

$$= 4,713 \text{ A}$$

$$I_{Dif} = |(I_{2s\Delta} - I_{1s\Delta})|$$

$$= |(4,713 - 3,770)|$$

$$= 0,943 \text{ A}$$

$$I_{Rest} = \left| \frac{I_{1s\Delta} + I_{2s\Delta}}{2} \right|$$

$$= \left| \frac{(4,713+3,770)}{2} \right|$$

$$= 4,241 \text{ A}$$

$$\% = \frac{I_{Dif}}{I_{Rest}} x 100\%$$

$$= \frac{0,943}{4,241} x 100\%$$

$$= 22,22\%$$

2.3 Trafo#2 Bulan November

Daya Nominal untuk Trafo#2, 30 MVA

$$S = 36 \text{ MVA} \quad : \quad 36.000.000 \text{ VA}$$

$$V_1 = 150 \text{ kV} \quad : \quad 150.000 \text{ V}$$

$$V_2 = 20 \text{ kV} \quad : \quad 20.000 \text{ V}$$

$$I_s = 450 \text{ A}$$

Rasio

$$CT_1 : 200/5$$

$$CT_2 : 1.200/5$$

Arus sekunder CT di primer transformator daya adalah:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{V_p}{V_s}$$

$$I_p = \frac{V_s}{V_p} \times I_s$$

$$I_p = \frac{20.000}{150.000} \times 450$$

$$= 60 \text{ A}$$

Sehingga arus sekunder CT di sisi tegangan tinggi (TT) adalah:

$$I_{1s} = \frac{I_p}{CT}$$

$$= \frac{60}{200/5}$$

$$= 1,5 \text{ A}$$

Sementara arus sekunder CT di sisi tegangan rendah (TR) adalah:

$$I_{2s} = \frac{I_s}{CT}$$
$$= \frac{450}{1.200/5}$$

$$= 1,875 \text{ A}$$

$$I_{1s\Delta} = I_{1s}x\sqrt{3}$$

$$I_{1s\Delta} = 1,5x\sqrt{3}$$
$$= 2,598 \text{ A}$$

$$I_{2s\Delta} = I_{2s}x\sqrt{3}$$

$$I_{2s\Delta} = 1,875x\sqrt{3}$$
$$= 3,248 \text{ A}$$

$$I_{Dif} = |(I_{2s\Delta} - I_{1s\Delta})|$$
$$= |(3,248 - 2,598)|$$
$$= 0,650 \text{ A}$$

$$I_{Rest} = \left| \frac{I_{1s\Delta} + I_{2s\Delta}}{2} \right|$$
$$= \left| \frac{(2,598 + 3,248)}{2} \right|$$
$$= 2,923 \text{ A}$$

$$\% = \frac{I_{Dif}}{I_{Ref}} x 100\%$$

$$= \frac{0,650}{2,923} \times 100\%$$

$$= 22,22\%$$

Sebagai faktor pengaman harus ditambah paling sedikit 5 % sehingga nilai slopenya menjadi 27,22%



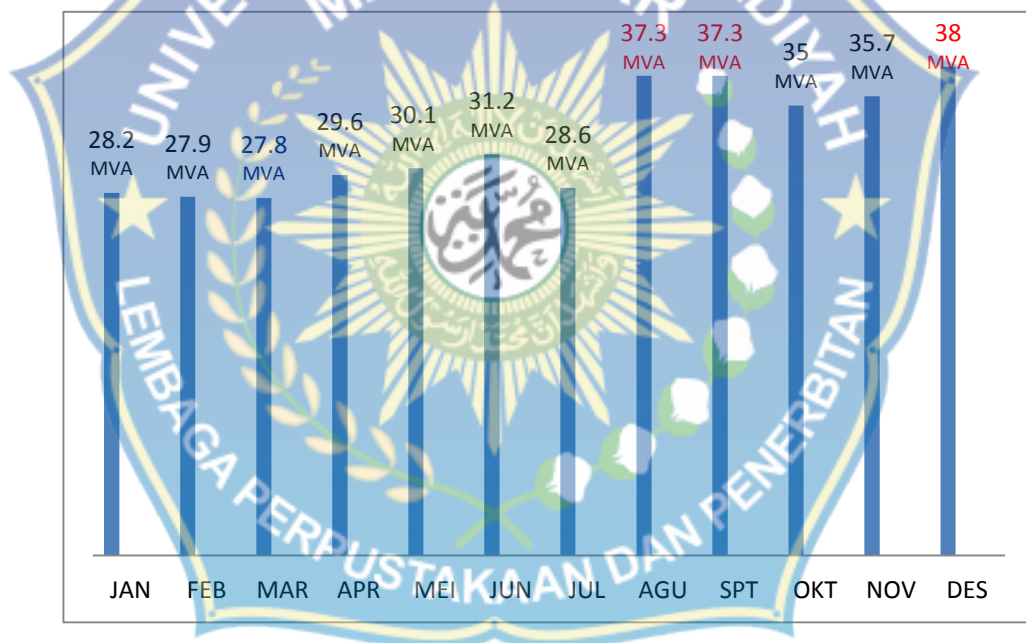
Gambar 4.7. Grafik persentase relai diferensial Trafo#2

Tabel 4.2. Analisis Data Pembebanan Trafo#2 Tahun 2012

Bulan	VP	VS	IP	Is	R.Ct	R.Ct	CT#1	CT#2	Arus Relai Sisi TT	Arus Relai Sisi TR	Arus Diferensial	Arus Restraining	Slope %
					Tt 40	Tr 240							
Januari			50.133	376			1.253	1.567	2.171	2.714	0.543	2.442	22.222
Februari			56.000	420			1.400	1.750	2.425	3.031	0.606	2.728	22.222
Maret			65.600	492			1.640	2.050	2.841	3.551	0.710	3.196	22.222
April			67.733	508			1.693	2.117	2.933	3.666	0.733	3.300	22.222
Mei			66.667	500			1.667	2.083	2.887	3.608	0.722	3.248	22.222
Juni			77.333	580			1.933	2.417	3.349	4.186	0.837	3.767	22.222
Juli			58.267	437			1.451	1.821	2.523	3.154	0.631	3.838	22.222
Agustus			66.933	502			1.673	2.092	2.898	3.623	0.725	3.261	22.222
September			65.467	491			1.637	2.046	2.835	3.543	0.709	3.189	22.222
Oktober			87.067	653			2.177	2.721	3.770	4.713	0.943	4.241	22.222
November			60.000	450			1.500	1.875	2.598	3.248	0.650	2.923	22.222
Desember			66.400	498			1.660	2.075	2.875	3.598	0.719	3.235	22.222

3. Tiga Bulan Beban Tertinggi Selama Tahun 2012 Untuk Trafo#3, 60 MVA Gardu Induk Panakkukang

Gambar 4.8 menampilkan grafik beban bulanan Trafo#3 selama pengoperasian pada tahun 2012. Tiga bulan dengan beban tertinggi yakni: Agustus (37,3 MVA), September (37,3 MVA) dan bulan Desember (38 MVA). Beban bulanan berfluktuasi dari 27,8 MVA (minimum) hingga 38 MVA (maksimum).



Gambar 4.8. Grafik beban tahunan 2012 untuk Trafo#3

3.1 Trafo#3 Bulan September

Daya Nominal untuk Trafo#3, 60 MVA

$$S = 72 \text{ MVA} \quad : 72.000.000 \text{ VA}$$

$$V_1 = 150 \text{ kV} \quad : 150.000 \text{ V}$$

$$V_2 = 20 \text{ kV} \quad : \quad 20.000 \text{ V}$$

$$I_s = 943 \text{ A}$$

Rasio

$$CT_1 : 300/5$$

$$CT_2 : 2.000/5$$

Arus sekunder CT di primer transformator daya adalah:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{V_p}{V_s}$$

$$I_p = \frac{V_s}{V_p} \times I_s$$

$$I_p = \frac{20.000}{150.000} \times 943$$

$$= 125,733 \text{ A}$$

Sehingga arus sekunder CT di sisi tegangan tinggi (TT) adalah:

$$I_{1s} = \frac{I_p}{CT}$$

$$= \frac{125,733}{300/5}$$

$$= 2,096 \text{ A}$$

Sementara arus sekunder CT di sisi tegangan rendah (TR) adalah:

$$I_{2s} = \frac{I_s}{CT}$$

$$= \frac{943}{2.000/5}$$

$$= 2,358 \text{ A}$$

$$I_{1s\Delta} = I_{1s} x \sqrt{3}$$

$$I_{1s\Delta} = 2,096 x \sqrt{3}$$

$$= 3,630 \text{ A}$$

$$I_{2s\Delta} = I_{2s} x \sqrt{3}$$

$$I_{2s\Delta} = 2,358 x \sqrt{3}$$

$$= 4,083 \text{ A}$$

$$I_{Dif} = |(I_{2s\Delta} - I_{1s\Delta})|$$

$$= |(4,083 - 3,630)|$$

$$= 0,453 \text{ A}$$

$$I_{Rest} = \left| \frac{I_{1s\Delta} + I_{2s\Delta}}{2} \right|$$

$$= \left| \frac{(3,630 + 4,083)}{2} \right|$$

$$= 3,856 \text{ A}$$

$$\% = \frac{I_{Dif}}{I_{Rest}} x 100\%$$

$$= \frac{0,453}{3,856} x 100\%$$

$$= 11,77 \%$$

3.2 Trafo#3 Bulan November

Daya Nominal untuk Trafo#3, 60 MVA

$$S = 72 \text{ MVA} \quad : \quad 72.000.000 \text{ VA}$$

$$V_1 = 150 \text{ kV} \quad : \quad 150.000 \text{ V}$$

$$V_2 = 20 \text{ kV} \quad : \quad 20.000 \text{ V}$$

$$I_s = 1040 \text{ A}$$

Rasio

$$CT_1 : 300/5$$

$$CT_2 : 2.000/5$$

Arus sekunder CT di primer transformator daya adalah:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{V_p}{V_s}$$

$$I_p = \frac{V_s}{V_p} \times I_s$$

$$I_p = \frac{20.000}{150.000} \times 1.040$$

$$= 138,667 \text{ A}$$

Sehingga arus sekunder CT di sisi tegangan tinggi (TT)

$$I_{1s} = \frac{I_p}{CT}$$

$$= \frac{138,667}{300/5}$$

$$= 2,311 \text{ A}$$

Sementara arus sekunder CT di sisi tegangan rendah (TR) adalah:

$$\begin{aligned} I_{2s} &= \frac{I_s}{CT} \\ &= \frac{1.040}{2.000/5} \\ &= 2,600 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{1s\Delta} &= I_{1s} x \sqrt{3} \\ I_{1s\Delta} &= 2,311 x \sqrt{3} \\ &= 4,003 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{2s\Delta} &= I_{2s} x \sqrt{3} \\ I_{2s\Delta} &= 2,600 x \sqrt{3} \\ &= 4,503 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{Dif} &= |(I_{2s\Delta} - I_{1s\Delta})| \\ &= |(4,503 - 4,003)| \\ &= 0,500 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{Rest} &= \left| \frac{I_{1s\Delta} + I_{2s\Delta}}{2} \right| \\ &= \left| \frac{(4,003 + 4,503)}{2} \right| \\ &= 4,253 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\% = \frac{I_D}{I_R} x 100\%$$

$$= \frac{0,500}{4,253} \times 100\%$$

$$= 11,77 \%$$

3.3 Trafo#3 Bulan Desember

Daya Nominal untuk Trafo#3, 60 MVA

$$S = 72 \text{ MVA} \quad : 72.000.000 \text{ VA}$$

$$V_1 = 150 \text{ kV} \quad : 150.000 \text{ V}$$

$$V_2 = 20 \text{ kV} \quad : 20.000 \text{ V}$$

$$I_s = 1120 \text{ A}$$

Rasio

$$CT_1 : 300/5$$

$$CT_2 : 2000/5$$

Arus sekunder CT di primer transformator daya adalah:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{V_p}{V_s}$$

$$I_p = \frac{V_s}{V_p} \times I_s$$

$$I_p = \frac{20.000}{150.000} \times 1.120$$

$$= 149,333 \text{ A}$$

Sehingga arus sekunder CT di sisi tegangan tinggi (TT) adalah:

$$\begin{aligned}
 I_{1s} &= \frac{I_p}{CT} \\
 &= \frac{149,333}{300/5} \\
 &= 2,489 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Sementara arus sekunder CT di sisi tegangan rendah (TR) adalah:

$$\begin{aligned}
 I_{2s} &= \frac{I_s}{CT} \\
 &= \frac{1.120}{2.000/5} \\
 &= 2,800 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$I_{1s\Delta} = I_{1s} \times \sqrt{3}$$

$$I_{1s\Delta} = 2,489 \times \sqrt{3}$$

$$= 4,311 \text{ A}$$

$$I_{2s\Delta} = I_{2s} \times \sqrt{3}$$

$$I_{2s\Delta} = 2,800 \times \sqrt{3}$$

$$= 4,850 \text{ A}$$

$$I_{Dif} = |(I_{2s\Delta} - I_{1s\Delta})|$$

$$= |4,850 - 4,311|$$

$$= 0,539 \text{ A}$$

$$I_{Rest} = \left| \frac{I_{1s\Delta} + I_{2s\Delta}}{2} \right|$$

$$= \left| \frac{(4,311+4,850)}{2} \right|$$

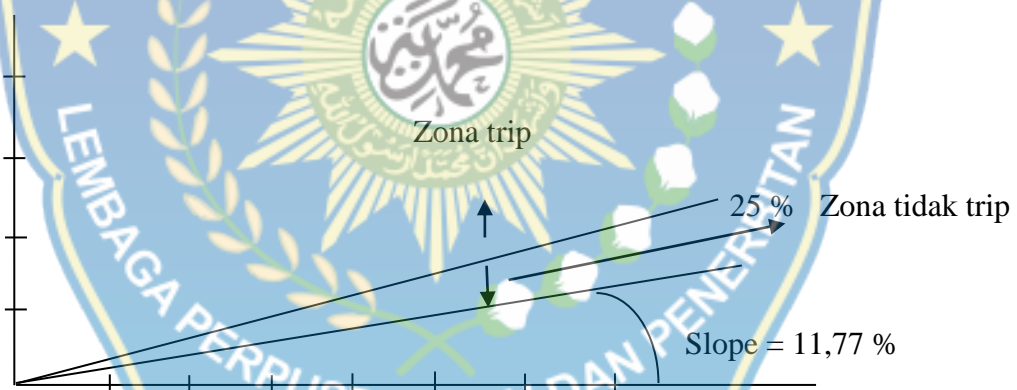
$$= 4,580 \text{ A}$$

$$\% = \frac{I_D}{I_R} \times 100\%$$

$$= \frac{0,539}{4,580} \times 100\%$$

$$= 11,77 \%$$

Sebagai faktor pengaman harus ditambah paling sedikit 5 % sehingga nilai slopenya menjadi 16,77 %.



Gambar 4.9. Grafik persentase relai diferensial Trafo#3

Tabel 4.3. Analisis Data Pembebanan Trafo#3 Tahun 2012

Bulan	VP	VS	IP	Is	R.Ct	R.Ct	CT#1	CT#2	Arus Relai Sisi TT	Arus Relai Sisi TR	Arus Diferensial	Arus Restraining	Slope %
					Tt 60	Tr 400							
Januari			101.333	760			1.689	1.900	2.925	3.291	0.366	3.108	11.765
Februari			97.200	729			1.620	1.823	2.806	3.157	0.351	2.981	11.765
Maret			137.333	1030			2.289	2.575	3.964	4.460	0.496	4.212	11.765
April			160.267	1202			2.671	3.005	4.627	5.205	0.578	4.916	11.765
Mei			129.733	973			2.162	2.433	3.745	4.213	0.468	3.979	11.765
Juni			118.667	890			1.978	2.225	3.426	3.854	0.428	3.640	11.765
Juli			131.200	984			2.187	2.460	3.787	4.261	0.473	4.024	11.765
Agustus			134.607	1010			2.244	2.525	3.887	4.373	0.486	4.130	11.765
September			125.733	943			2.096	2.358	3.630	4.083	0.454	3.856	11.765
Oktober			141.333	1060			2.356	2.650	4.080	4.590	0.510	4.335	11.765
November			138.667	1040			2.311	2.600	4.003	4.503	0.500	4.253	11.765
Desember			149.333	1120			2.489	2.800	4.311	4.850	0.539	4.580	11.765

BAB V

PENUTUP

A. Simpulan

1. Trafo#1 dengan daya 30 MVA, tegangan 150/20 KV, disetel pada *slope* 40%. Trafo#2 yang identik dengan trafo#1, karena itu juga disetel dengan *slope* yang sama, 40%. Sementara itu, Trafo#3 dengan daya 60 MVA dan dengan tegangan 150/20 KVA disetel pada *slope* 25%.
2. Tiga bulan dengan beban tertinggi pada tahun 2012 untuk Trafo#1 yakni: Februari (22,4 MVA), Oktober (23,9 MVA) dan bulan Desember (20,4 MVA), menghasilkan persen *slope* sebesar 22,22%. Oleh karena itu, relai diferensial Trafo#1 yang disetel pada 40%, tidak *trip* (tetap memblok) dan ini sesuai dengan kondisi yang seharusnya. Sementara itu, tiga bulan dengan beban tertinggi untuk Trafo#2 yakni: Mei (23,6 MVA), November (35,7 MVA) dan bulan Desember (21 MVA). Identik dengan Trafo#1, beban maksimum Trafo#2 menghasilkan persen *slope* 22,22%, sehingga ia juga tidak *trip*. Sedangkan untuk Trafo#3, tiga bulan dengan beban tertinggi yakni: September (37,3 MVA), November (35,7 MVA) dan bulan Desember (38 MVA). Beban maksimum Trafo#3 menghasilkan persen *slope* sebesar 11,77%. Nilai *slope* beban maksimum tersebut, juga masih berada di bawah *slope* setelan (25%), dan karena itu relai diferensial

tetap memblok. Hal ini juga sesuai dengan kondisi yang seharusnya, yang mana relai memang tidak *trip* untuk kondisi beban maksimum.

B. Saran

Sesuai dengan topik penelitian ini yang hanya membahas salah satu jenis relai proteksi di trafo Gardu Induk Panakkukang, yaitu relai diferensial, maka perlu juga dilanjutkan studi diatas dengan jenis relai lain yang dimilikinya. Hal tersebut didasari oleh fakta urgensi fungsi dari trafo tersebut. Studi relai proteksi trafo tersebut secara lengkap, diharapkan akan memberikan informasi kinerja sistem proteksi trafo tersebut secara lebih komprehensif.



DAFTAR PUSTAKA

Arismunandar, Kuwahara. 1991. *Teknik Tenaga Listrik Jilid III Gardu Induk*. PT. Pradnya Paramita: Jakarta: 44-51.

[http://www.crayonpedia.org/mw/Transformator Daya, Switchgear, Relay Protection, Excitacy dan Control System 12.1.](http://www.crayonpedia.org/mw/Transformator_Daya_Switchgear_Relay_Protection_Excitacy_dan_Control_System_12.1.), 9 April 2013, pkl. 09.27

Kasim, Syarifuddin. 2007. *Dasar-Dasar Proteksi STL* : 11-18.

PT. PLN. *Koordinasi Relai Arus Lebih dan Gangguan Tanah dengan Fasilitas Lotus*. 1 (3): 21-31.

Ram, Badri dan Vishwakarma.1995. *Power System Protection and Switchgear*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited: New Delhi: 100-114.

Stevenson. W. D. Jr. 1990. *Analisis Sitem Tenaga Listrik* , Edisi Keempat. Penerbit Erlangga: Jakarta: 45-70.

Sumanto. 1996. *Teori Transformator*. Erlangga: Yogyakarta: 17-31.

Badaruddin. 2010. *Modul XIII Sistem Proteksi Perlindungan Transformator daya*, Jakarta.

Soebagio. 2012. *Transformator*, ITS Press, Surabaya.

Arismunandar, Kuwara.1993. *Teknik tenaga listrik*, Jilid II, Pradnya Paramita, Jakarta.

Zuhal. 1995. *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.

L

A

M

P

I

R



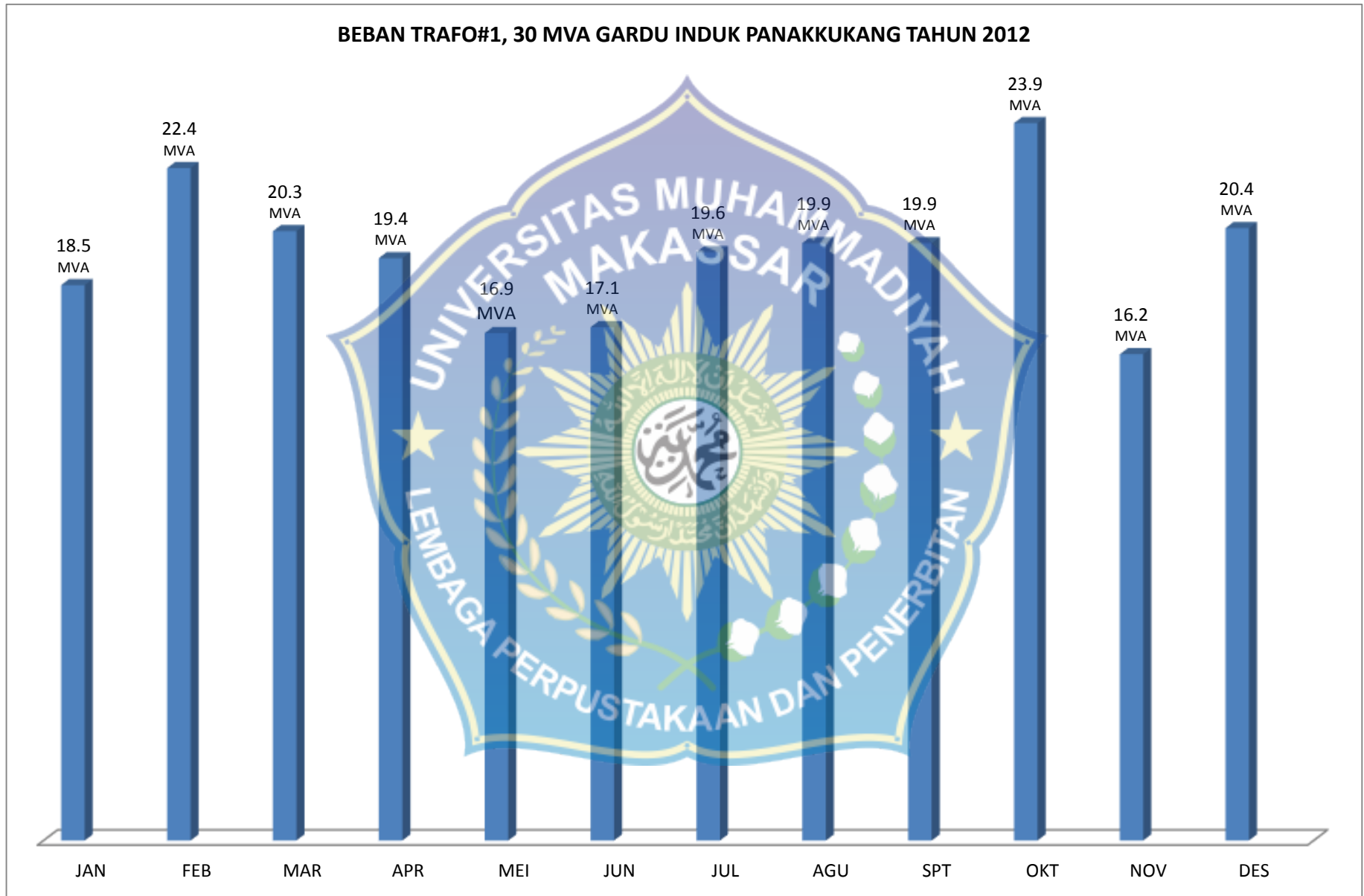
A

N



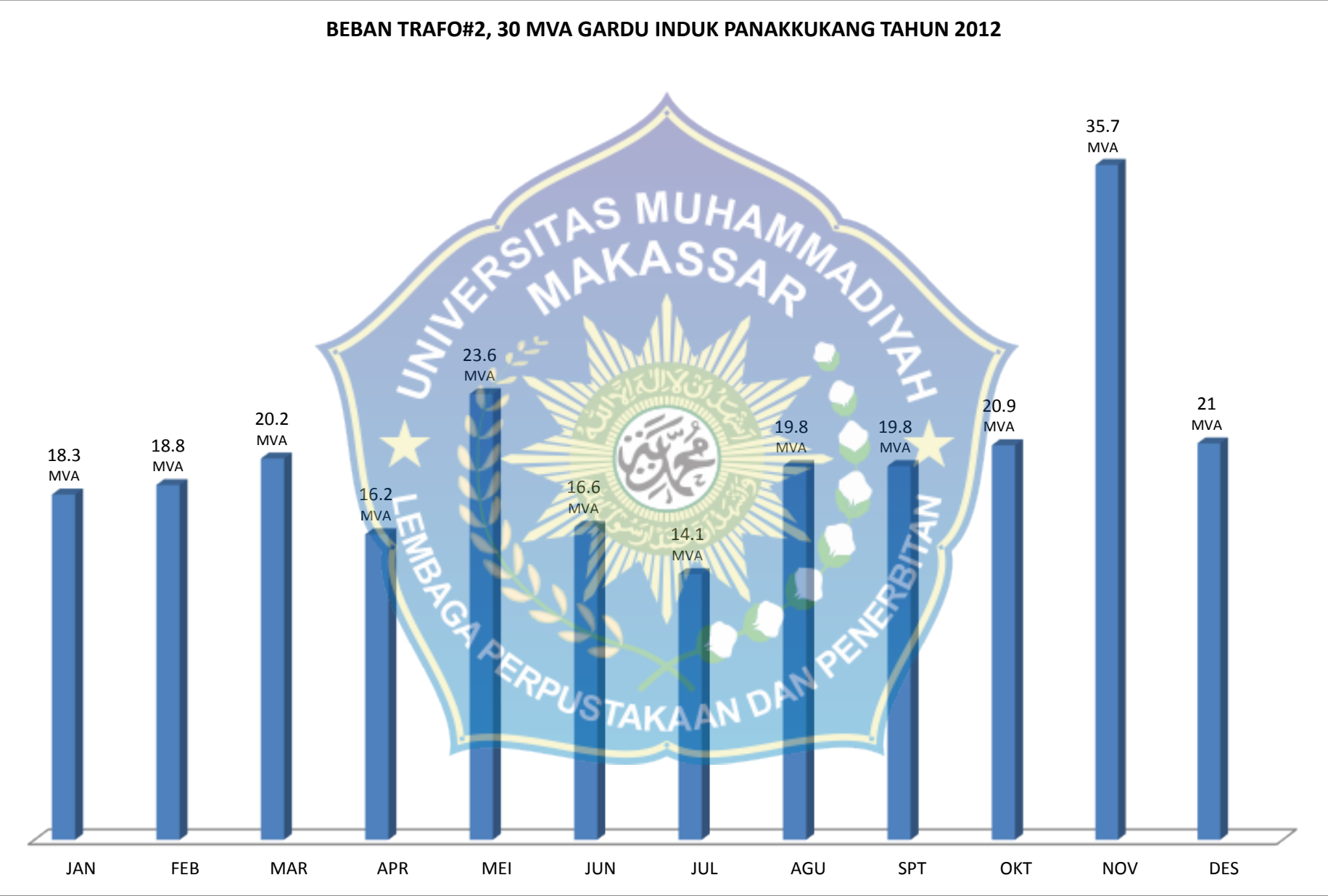
LAMPIRAN 1

BEBAN TRAF0#1, 30 MVA GARDU INDUK PANAKKUKANG TAHUN 2012



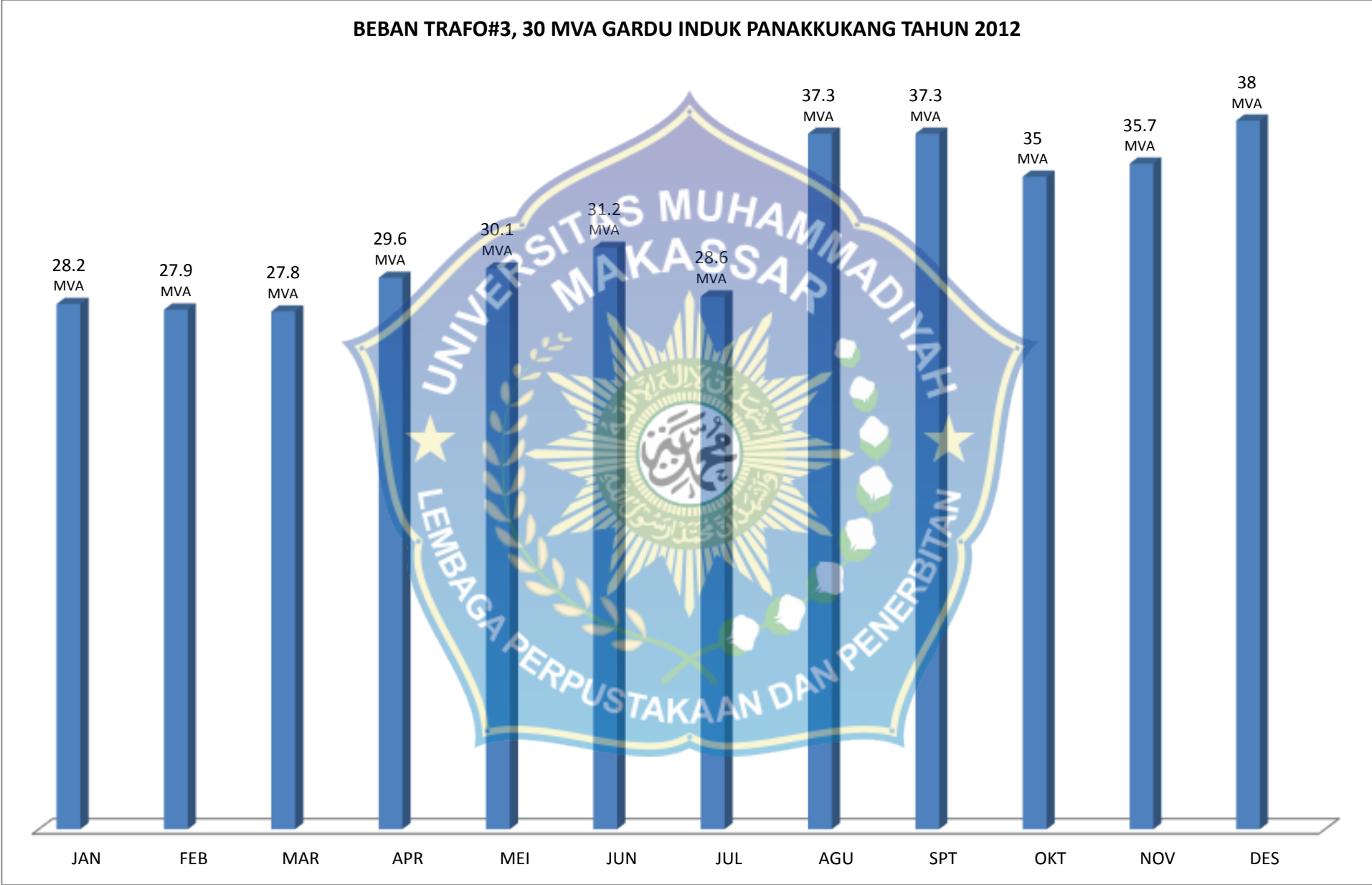
LAMPIRAN 2

BEBAN TRAFIK#2, 30 MVA GARDU INDUK PANAKKUKANG TAHUN 2012



LAMPIRAN 3

BEBAN TRAF0#3, 30 MVA GARDU INDUK PANAKKUKANG TAHUN 2012



LAMPIRAN 4

TRAFO#1, 30 MVA GARDU INDUK PANAKKUKANG

Merk : Unindo
 Type : 016 / BAD - DIR / VII / 2003
 Serial no. : P30 Lec 315 01
 Instr. Manual : IM 315

	HV / TT	LV / TR	Tersier	
Rated power ONAN / ONAF	18 / 30	18 / 30	-	MVA
Rated voltage	150	20	10	KV
System highest voltage	170	24	12	KV
Rated current ONAN / ONAF	69.28 / 115.47	519.62 / 866.03	75 / 28	A
insulation level				
line (Bil / frequncy test)	650 / 275	125 / 50	75 / 28	KV
neutral (Bil / frequncy test)	95 / 38	125 / 50	-	KV

impedance voltage HV - LV : 12.18%
 reference power : 30 MVA
 Standard : IEC 76
 Freq : 50 Hz
 Type of cooling : ONAN / ONAF
 Vector Group : YnYn0 (D5)
 Top oil : 50 °C
 Winding : 55 °C
 mass core & winding : 39600 kg
 mass untanking : 6300 kg
 weight of oil : 13900 kg
 total weight : 64800 kg
 Type of oil : mineral oil



LAMPIRAN 5

TRAFO#2, 30 MVA GARDU INDUK PANAKKUKANG

Merk	: Unindo		
Type	: 016 / BAD - DIR / VII / 2003		
Serial no.	: P30 Lec 315 02		
Instr. Manual	: IM 315		
	HV / TT	LV / TR	Tersier
Rated power ONAN / ONAF	18 / 30	18 / 30	-
Rated voltage	150	20	10
System highest voltage	170	24	12
Rated current ONAN / ONAF	69.28 / 115.47	519.62 / 866.03	75 / 28
insulation level			
line (Bil / frequncy test)	650 / 275	125 / 50	75 / 28
neutral (Bil / frequncy test)	95 / 38	125 / 50	-
impedance voltage HV - LV	12.18%		
reference power	: 30 MVA		
Standard	: IEC 76		
Freq	: 50 Hz		
Type of cooling	: ONAN / ONAF		
Vector Group	: YnYn0 (D5)		
Top oil	: 50 °C		
Winding	: 55 °C		
mass core & winding	: 39600 kg		
mass untanking	: 6300 kg		
weight of oil	: 13900 kg		
total weight	: 64800 kg		
Type of oil	: mineral oil		



LAMPIRAN 6

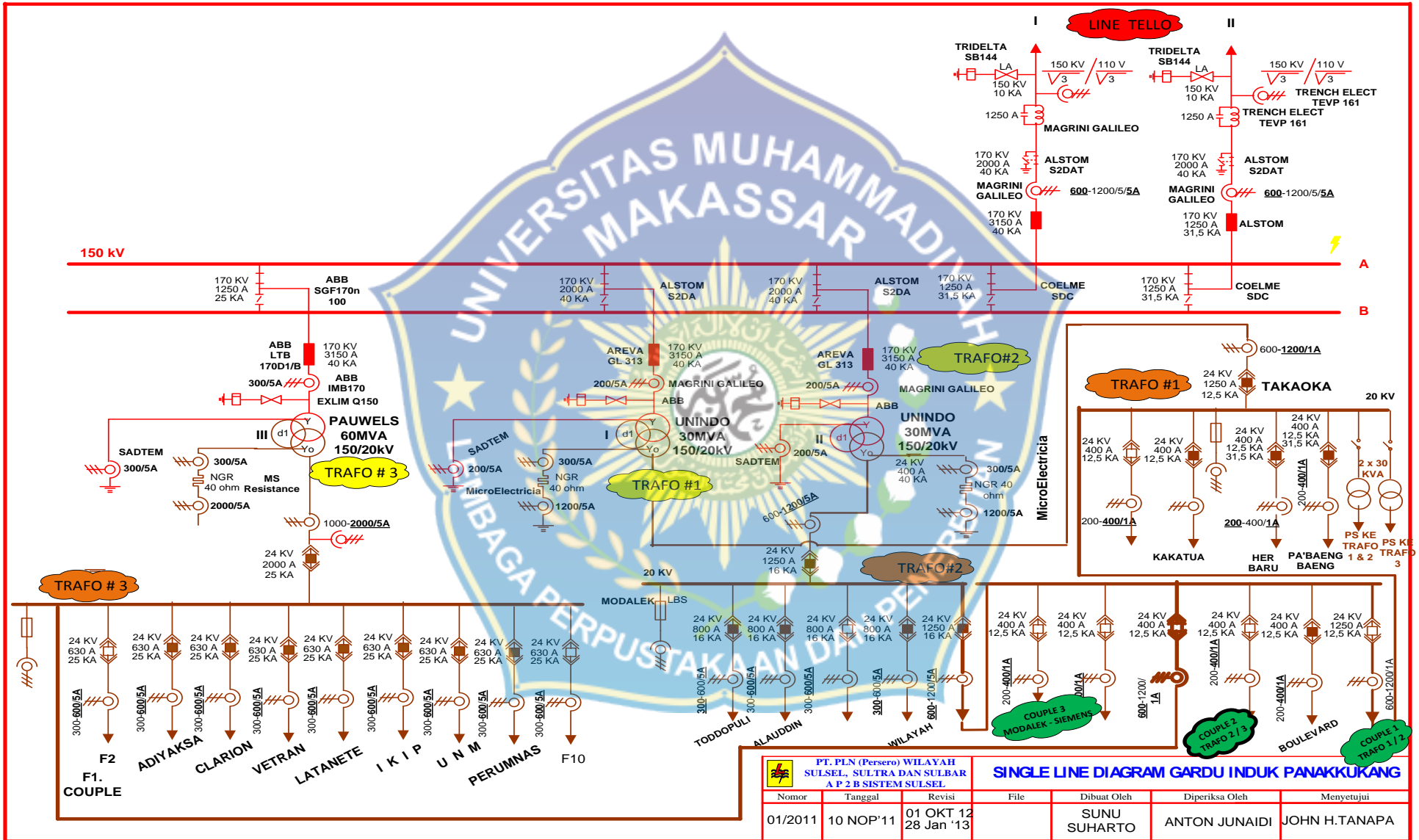
TRAFO#3, 60 MVA GARDU INDUK PANAKKUKANG

Merk	: PAUWELS TRAFO ASIA
Year of manufacture	: 2007
Standart	: IEC 60076
Rated power	: 40 / 60 MVA
Cooling	: Onan / Onaf -67/100%
Freq	: 50 Hz
Phases	: 3
Type of oil	: Nyas nitro libra
Mass	: Total ; 77200 kg Oil ; 16500 kg Untanking ; 44200 kg
Insulation levels	: LI650 AC 275 LI650 AC 38 LI125 AC 50 LI75 AC 28
Connection symbol	: Yyn0 (d1)
Tap changer	: MRMS111300 Y-72,5 +ED100S



LAMPIRAN 7

SINGLE LINE GARDU INDUK PANAKKUKANG



SINGLE LINE DIAGRAM GARDU INDUK PANAKKUKANG

Nomor	Tanggal	Revisi	File	Dibuat Oleh	Diperiksa Oleh	Menyetujui
01/2011	10 NOP'11	01 OKT 12 28 Jan '13		SUNU SUHARTO	ANTON JUNAIDI	JOHN H.TANAPA

LAMPIRAN 8

ANALISIS DATA PEMBEBANAN TRAF0#1, 30 MVA TAHUN 2012

Bulan	VP	VS	IP	Is	R.Ct	R.Ct	CT#1	CT#2	Arus Relai Sisi TT	Arus Relai Sisi TR	Arus Diferensial	Arus Restraining	Slope %
					Tt 40	Tr 240							
Januari			101.333	760			2.533	3.167	4.388	5.485	1.097	4.936	22.222
Februari			63.067	473			1.577	1.971	2.731	3.414	0.683	3.072	22.222
Maret			72.533	544			1.813	2.267	3.141	3.926	0.785	3.533	22.222
April			76.667	575			1.917	2.396	3.320	4.150	0.830	3.735	22.222
Mei			69.467	521			1.737	2.171	3.008	3.760	0.752	3.384	22.222
Juni			80.267	602			2.007	2.508	3.476	4.345	0.869	3.910	22.222
Juli			58.400	438			1.460	1.825	2.529	3.161	0.632	2.845	22.222
Agustus			70.400	528			1.760	2.200	3.048	3.811	0.762	3.429	22.222
September			72.533	544			1.813	2.267	3.141	3.926	0.785	3.533	22.222
Oktober			97.200	729			2.430	3.038	4.209	5.261	1.052	4.735	22.222
November			64.800	486			1.620	2.025	2.806	3.507	0.701	3.157	22.222
Desember			69.333	520			1.733	2.167	3.002	3.753	0.751	3.377	22.222

LAMPIRAN 9

ANALISIS DATA PEMBEBANAN TRAF0#2, 30 MVA TAHUN 2012

Bulan	VP	VS	IP	Is	R.Ct	R.Ct	CT#1	CT#2	Arus Relai Sisi TT	Arus Relai Sisi TR	Arus Diferensial	Arus Restraining	Slope %
					Tt 40	Tr 240							
Januari			50.133	376			1.253	1.567	2.171	2.714	0.543	2.442	22.222
Februari			56.000	420			1.400	1.750	2.425	3.031	0.606	2.728	22.222
Maret			65.600	492			1.640	2.050	2.841	3.551	0.710	3.196	22.222
April			67.733	508			1.693	2.117	2.933	3.666	0.733	3.300	22.222
Mei			66.667	500			1.667	2.083	2.887	3.608	0.722	3.248	22.222
Juni			77.333	580			1.933	2.417	3.349	4.186	0.837	3.767	22.222
Juli			58.267	437			1.451	1.821	2.523	3.154	0.631	3.838	22.222
Agustus			66.933	502			1.673	2.092	2.898	3.623	0.725	3.261	22.222
September			65.467	491			1.637	2.046	2.835	3.543	0.709	3.189	22.222
Oktober			87.067	653			2.177	2.721	3.770	4.713	0.943	4.241	22.222
November			60.000	450			1.500	1.875	2.598	3.248	0.650	2.923	22.222
Desember			66.400	498			1.660	2.075	2.875	3.598	0.719	3.235	22.222

LAMPIRAN 10

ANALISIS DATA PEMBEBANAN TRAF0#3, 60 MVA TAHUN 2012

Bulan	VP	VS	IP	Is	R.Ct	R.Ct	CT#1	CT#2	Arus Relai Sisi TT	Arus Relai Sisi TR	Arus Diferensial	Arus Restraining	Slope %
					Tt 60	Tr 400							
Januari			101.333	760			1.689	1.900	2.925	3.291	0.366	3.108	11.765
Februari			97.200	729			1.620	1.823	2.806	3.157	0.351	2.981	11.765
Maret			137.333	1030			2.289	2.575	3.964	4.460	0.496	4.212	11.765
April			160.267	1202			2.671	3.005	4.627	5.205	0.578	4.916	11.765
Mei			129.733	973			2.162	2.433	3.745	4.213	0.468	3.979	11.765
Juni			118.667	890			1.978	2.225	3.426	3.854	0.428	3.640	11.765
Juli			131.200	984			2.187	2.460	3.787	4.261	0.473	4.024	11.765
Agustus			134.607	1010			2.244	2.525	3.887	4.373	0.486	4.130	11.765
September			125.733	943			2.096	2.358	3.630	4.083	0.454	3.856	11.765
Oktober			141.333	1060			2.356	2.650	4.080	4.590	0.510	4.335	11.765
November			138.667	1040			2.311	2.600	4.003	4.503	0.500	4.253	11.765
Desember			149.333	1120			2.489	2.800	4.311	4.850	0.539	4.580	11.765