

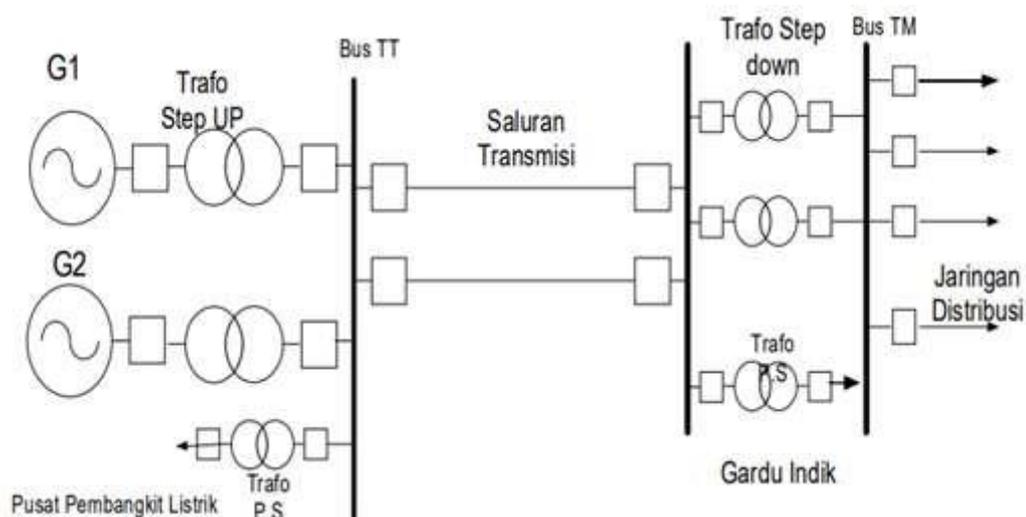
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik merupakan sistem yang berfungsi untuk membangkitkan, mentransmisikan dan mendistribusikan energi listrik dari pusat pembangkitan sampai dengan ke pelanggan tegangan menengah (TM) dan tegangan rendah (TR). Pada dasarnya dapat dikelompokkan atas tiga komponen utama yakni sistem pembangkit, sistem transmisi, dan sistem distribusi.^[2]

Pusat pembangkit listrik akan memproduksi tenaga listrik, pusat pembangkit listrik seperti PLTA, PLTU, PLTG dan PLTD membangkitkan tenaga listrik kemudian dinaikkan transformator *step up* dan disalurkan melalui saluran transmisi, setelah itu tenaga listrik sampai di Gardu Induk (GI) untuk diturunkan tegangannya oleh transformator *step down* menjadi tegangan menengah yang disebut tegangan distribusi primer, tegangan distribusi primer di Indonesia adalah 20 kV, 12 kV dan 6 kV tetapi kebanyakan yang digunakan sekarang 20 kV. *Single line diagram* sistem tenaga listrik tersaji pada Gambar 2.1.^[3]



Gambar 2.1 *Single line diagram* sistem tenaga listrik

^[2]Pandjaitan, Bonar. 1999. *Teknologi Sistem Pengendalian Tenaga Listrik Berbasis SCADA*. Jakarta: Perhalindo. hal. 1

^[3]Hermawan, Ahmad, "Analisis Terhadap Performance Sistem Tenaga Listrik Memakai Metode Aliran Daya". *Jurnal ELTEK*, Vol. 11, No. 1, April 2013, hal. 19



Sistem tenaga listrik dimulai dari pembangkitan energi listrik dengan memanfaatkan sumber daya alam yakni air, batubara, panas bumi dan lain-lain. Sumber daya ini menghasilkan energi mekanik yang berguna untuk menggerakkan generator sehingga menghasilkan energi listrik dengan tegangan sekitar 6kV-20kV. Energi listrik ini disalurkan pada jalur transmisi yang mana tegangannya dinaikan dengan transformator secara *step up* sehingga didapatkan tegangan yang tinggi. Hal ini dikarenakan jalur transmisi yang panjang sehingga tegangan yang tinggi dapat mengurangi *losses* dan efisiensi yang mana bila tegangan tinggi maka arus rendah dan luas penampang konduktor yang digunakan kecil. Energi listrik pada saluran transmisi ini disalurkan dari konduktor-konduktor pada tower menuju gardu induk. Di gardu induk tegangan diturunkan dengan transformator secara *step down* sehingga didapatkan tegangan 20kV dan disalurkan ke distribusi, terdapat dua pelanggan yaitu tegangan menengah 20kV dan tegangan rendah 380V/220V.

2.1.1 Sistem Pembangkit

Sistem pembangkit terdiri atas sejumlah unit-unit pembangkit yang umumnya tersebar luas pada daerah pelayanan sistem interkoneksi jaringan sistem tenaga listrik. Stasiun pembangkit umumnya terdiri dari lebih satu unit pembangkit tergantung dari kebutuhannya dan sarana infrastruktur yang dibutuhkan untuk mendukung pengoperasian sistem-sistem tersebut. Maksud dari pembahasan sistem pembangkitan adalah memberi gambaran tentang berbagai unit pembangkit yang diperlukan sebagai bahan pertimbangan dalam perancangan suatu sistem pengendalian tenaga listrik. Tegangan keluaran generator biasanya berkisar antara 6,6kV hingga 24kV tergantung dari pabrik pembuat, tidak ada standar umum untuk mengatur tegangan keluaran generator. ^[4]

Sistem pembangkitan energi listrik merupakan sistem yang mengubah sumber daya alam seperti air, batubara, panas bumi dan lain-lain yang dapat menghasilkan energi mekanik. Energi mekanik tersebut digunakan untuk menggerakkan generator yang mana generator berfungsi dalam mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi listrik ini yang disalurkan dan dinikmati.

^[4]Pandjaitan, Bonar.1999.*Teknologi Sistem Pengendalian Tenaga Listrik Berbasis SCADA*.Jakarta:Perhalindo.hal.1-2



2.1.2 Sistem Transmisi

Sistem transmisi merupakan rantai penghubung antara pusat-pusat pembangkit listrik dan sistem-sistem distribusi, dan dapat pula menuju ke sistem tenaga yang lain, serta menghubungkan sistem distribusi ke semua beban-beban yang terpisah satu dengan yang lain. Saluran transmisi merupakan media yang digunakan untuk mentransmisikan tenaga listrik dari pembangkit listrik sampai distribusi hingga sampai pada *consumer* pengguna listrik.^[5]

Pada sistem transmisi sebelum energi listrik pembangkitan ditransmisikan, hal pertama yang dilakukan adalah menaikkan tegangan generator terlebih dahulu pada nilai tegangan yang lebih tinggi sesuai dengan tegangan sistem jaringan transmisi yang direncanakan. Di Indonesia level tegangan jaringan listrik adalah 70kV, 150kV dan 500kV.^[6]

Saluran transmisi dibagi menjadi dua yaitu saluran udara (*overhead line*) dan saluran bawah tanah (*underground*). Di Indonesia saluran transmisi banyak menggunakan saluran udara yakni menyalurkan listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada tiang-tiang transmisi dengan perantaraan isolator, sedangkan saluran bawah tanah menyalurkan listrik dengan kabel yang ditanam di bawah tanah. Saluran bawah tanah tidak terpengaruh oleh perubahan cuaca dan lebih estetik karena tidak mengganggu pemandangan. Namun, biaya pembangunannya lebih mahal dan perbaikannya lebih sulit jika terjadi gangguan.^[7]

Sistem transmisi merupakan rantai penghubung energi listrik dari sistem pembangkitan menuju sistem distribusi hingga sampai ke pelanggan. Pada sistem transmisi sebelum energi listrik disalurkan nilai tegangannya perlu dinaikkan terlebih dahulu dengan transformator secara *step up* level tegangan di Indonesia berkisar dari 70kV sampai 500kV. Saluran transmisi dibagi menjadi dua yaitu saluran udara dan bawah tanah. Namun, di Indonesia saluran transmisi banyak menggunakan saluran udara yang menyalurkan dengan konduktor-konduktor yang digantung pada tower dan dilengkapi isolator sebagai hambatannya.

^[5]Tenda, Novendry, “*Penyusutan Daya Listrik Pada Penyulang Jaringan Transmisi Isimu Marisa*”. E-Journal Teknik Elektro dan Komputer, Vol.5, No. 1, Januari-Maret 2016, hal.76

^[6]Pandjaitan, Bonar.1999.*Teknologi Sistem Pengendalian Tenaga Listrik Berbasis SCADA*.Jakarta:Perhalindo.hal.2

^[7]Cekdin, Cekmas., & Barlian, Taufik.2013.*Transmisi Daya Listrik*.Yogyakarta:Andi.hal.1



2.1.3 Sistem Distribusi

Sistem distribusi tenaga listrik meliputi semua jaringan tegangan menengah 20kV dan tegangan rendah 220V/380V hingga meter-meter pelanggan. Distribusi tenaga listrik dilakukan dengan menarik kawat-kawat distribusi baik penghantar udara maupun penghantar di bawah tanah dari mulai gardu induk hingga ke pusat-pusat beban. Setiap elemen jaringan distribusi pada lokasi tertentu dibangun gardu distribusi dimana tegangannya diturunkan dari 20kV menjadi 220/380V. Dari gardu-gardu ini para pelanggan listrik dilayani menjelajah sepanjang pusat permukiman, komersial maupun industri.^[8]

Sistem distribusi merupakan bagian yang bersangkutan langsung dengan pelanggan, pelanggannya dibagi menjadi dua yaitu tegangan menengah 20kV dan tegangan rendah 380V/220V. Pelanggan tegangan menengah untuk listriknya tegangan 20kV langsung disalurkan dan pelanggan tegangan rendah tegangannya dari 20kV diturunkan terlebih dahulu dengan transformator secara *step down* sehingga didapatkan tegangan 380V/220V baru disalurkan.

2.2 Gardu Induk

Gardu Induk merupakan komponen sistem penyaluran tenaga listrik yang sebagai penghubung dalam penyaluran pelayanan tenaga listrik ke konsumen. Gardu Induk memiliki fungsi sebagai berikut:

1. Menerima dan menyalurkan tenaga listrik sesuai dengan kebutuhan pada tegangan tertentu dengan aman dan dapat diandalkan.
2. Penyaluran daya ke gardu induk lainnya dan gardu-gardu distribusi melalui penyulang tegangan menengah 20kV.^[9] Gambar gardu induk tersaji pada Gambar 2.2.

^[8]Pandjaitan, Bonar.1999.*Teknologi Sistem Pengendalian Tenaga Listrik Berbasis SCADA*.Jakarta:Perhalindo.hal.3

^[9]Gunawan, Samuel Marco dkk,“Analisa Perancangan Gardu Induk Sistem Outdoor 150 kV di Tallasa, Kabupaten Takalar, Sulawesi Selatan”. Jurnal Dimensi Teknik Elektro, Vol. 1, No. 1,2013,hal.37



Gambar 2.2 Gardu induk

Gardu induk merupakan bagian dari sistem penyaluran yang mana menerima tegangan dari tower dan diubah menjadi tegangan menengah yang akan disalurkan ke distribusi dan dinikmati pelanggan. Pada gardu induk terdapat tiga bay yaitu bay penghantar, bay transformator dan bay kopel. Bay merupakan rangkaian atau jalur yang tersusun atas peralatan-peralatan pada gardu induk.

2.2.1 Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus Tenaga (PMT) berdasarkan IEEE C37.100:1992 (*Standard definitions for power switchgear*) merupakan peralatan saklar atau *switching* mekanis, yang mampu membuka dan menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal sesuai dengan ratingnya serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal atau gangguan sesuai dengan *ratingnya*. PMT dilengkapi pemadam busur api seperti gas SF₆, minyak, *airblast* dan *vacuum* sehingga dapat berkerja pada kondisi berbeban. PMT tersaji pada Gambar 2.3. ^[10]

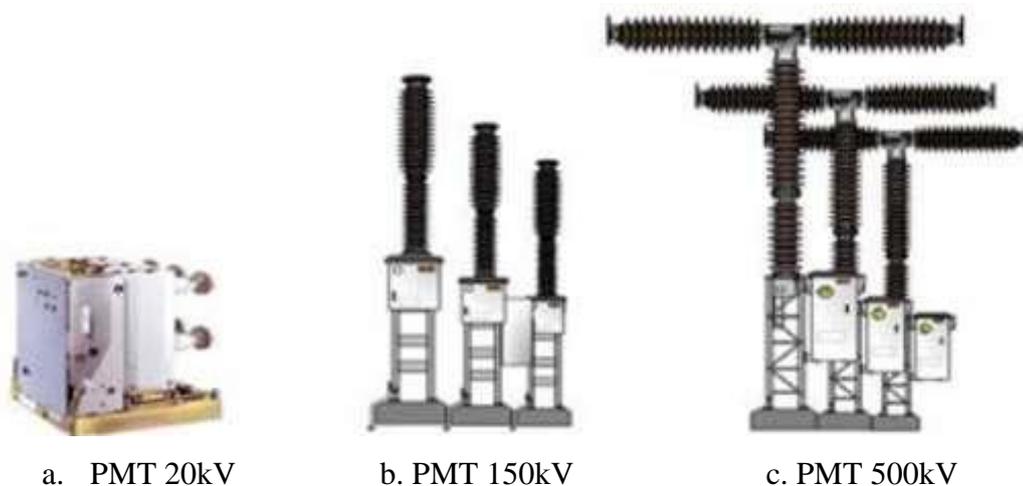
^[10]Tim Penyusun SKDIR 0520.2014.*Buku Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga*.Jakarta Selatan.hal.1



Gambar 2.3 Pemutus tenaga (PMT)

Klasifikasi tegangan pada PMT dibedakan sebagai berikut:

1. PMT tegangan rendah (*Low Voltage*) dengan *range* tegangan 0.1 s/d 1 kV (SPLN 1.1995 - 3.3)
2. PMT tegangan menengah (*Medium Voltage*) dengan *range* tegangan 1 s/d 35 kV (SPLN 1.1995 – 3.4)
3. PMT tegangan tinggi (*High Voltage*) dengan *range* tegangan 35 s/d 245 kV (SPLN 1.1995 – 3.5)
4. PMT tegangan extra tinggi (*Extra High Voltage*) dengan *range* tegangan lebih besar dari 245 kVAC (SPLN 1.1995 – 3.6)^[11] Klasifikasi tegangan PMT tersaji pada Gambar 2.4.



a. PMT 20kV

b. PMT 150kV

c. PMT 500kV

Gambar 2.4 Klasifikasi tegangan PMT

^[11]Tim Penyusun SKDIR 0520.2014.*Buku Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga*.Jakarta Selatan.hal.1

PMT merupakan peralatan pada gardu induk yang berfungsi sebagai saklar mekanis yang dapat mengalirkan arus beban secara normal dan memutus arus beban bila terjadi gangguan sesuai dengan *rating*nya. PMT dapat berkerja dalam kondisi tidak berbeban dan berbeban karena PMT dilengkapi pemadam busur api. PMT memiliki dua bentuk yakni *single pole* dipasang pada bay penghantar dan *three pole* dipasang pada bay transformator. PMT memiliki klasifikasi tegangan yaitu tegangan rendah, tegangan menengah, tegangan tinggi dan tegangan *extra* tinggi.

2.2.2 Pemisah (PMS)

Pemisah (PMS) atau *disconnecting switch* suatu peralatan sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai saklar pemisah rangkaian listrik dalam kondisi bertegangan atau tidak bertegangan tanpa arus beban. PMS *line* yang dilengkapi dengan PMS *ground* terpasang di antara PMT dan beban terpasang secara *interlock* dimana bila PMS *line* terbuka maka PMS *ground* tertutup begitupun sebaliknya hal ini, untuk menghindari kesalahan saat pengoperasian yang mana sebagai proteksi dari kecelakaan. Gambar pemisah tersaji pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pemisah (PMS)

Pemisah sebagai alat untuk memisahkan tegangan pada peralatan instalasi tegangan tinggi memiliki dua fungsi PMS sebagai berikut:

1. Memisahkan peralatan listrik dari peralatan lain atau instalasi lain yang bertegangan. PMS ini boleh dibuka atau ditutup hanya pada rangkaian jaringan yang tidak berbeban karena tidak dilengkapi peredam busur api.

2. PMS *ground* berfungsi sebagai pengamanan dari arus tegangan yang timbul sesudah saluran tegangan tinggi diputuskan atau induksi tegangan dari penghantar atau kabel lainnya. Dalam menjaga keamanan bagi pekerja yang bekerja pada peralatan instalasi.^[12]

Pemisah (PMS) merupakan peralatan pada gardu induk yang berfungsi sebagai saklar pemisah yang membuka dan menutup rangkaian guna memisahkan daerah yang bertegangan dan tidak bertegangan. Namun, dalam keadaan yang tidak berbeban hal ini dikarenakan PMS tidak dilengkapi pemadam busur api. Pada gardu induk PMS terdapat tiga penempatan yaitu PMS bus, PMS *line* dan PMS *ground*. PMS *ground* terpasang *interlock* dengan PMS *line* hal ini untuk pengamanan saat dilakukannya pekerjaan didaerah kerja PMS *ground* berfungsi sebagai pengaman dari arus tegangan atau induksi tegangan. Pada bay transformator hanya menggunakan PMS bus.

2.2.3 Transformator Arus (CT)

Transformator Arus (CT) yaitu peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada intalasi tenaga listrik disisi primer yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi besaran arus yang kecil secara akurat dan teliti untuk keperluan pengukuran dan proteksi. Gambar 2.6 (a) CT *High Voltage* dan Gambar 2.6 (b) CT *Low Voltage*.



a. CT *High Voltage*

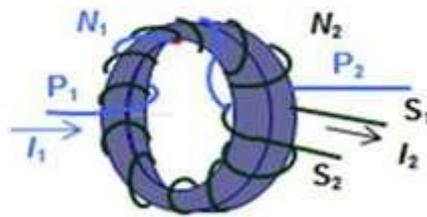


b. CT *Low Voltage*

Gambar 2.6 *Current transformer (CT)*

^[12]Tim Penyusun SKDIR 0520.2014.*Buku Pedoman Pemeliharaan Pemisah*.Jakarta Selatan.hal.1

Prinsip kerja transformator arus sama dengan transformator daya. Jika pada kumparan primer mengalir arus I_1 maka pada kumparan primer timbul gaya gerak magnet sebesar $N_1 I_1$. Gaya gerak magnet ini memproduksi fluks pada inti, kemudian membangkitkan gaya gerak listrik (GGL) pada kumparan sekunder. Jika terminal kumparan sekunder tertutup, maka pada kumparan sekunder mengalir arus I_2 , arus ini menimbulkan gaya gerak magnet $N_2 I_2$ pada kumparan sekunder.^[13] Gambar prinsip kerja pada CT disajikan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Prinsip kerja pada CT

Untuk transformator yang dihubungkan singkat:

$$I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2 \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

$$a = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (2.2)$$

$I_1 > I_2$ sehingga $N_1 < N_2$

a = Perbandingan transformasi

N_1 = Jumlah lilitan primer

N_2 = Jumlah lilitan sekunder^[14]

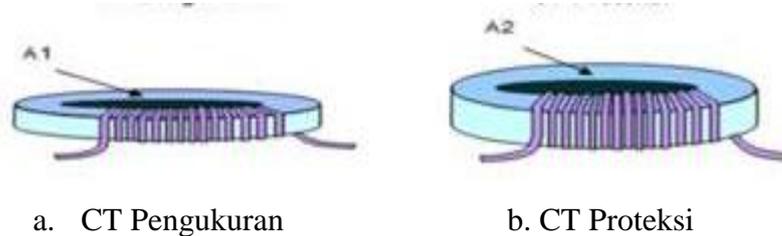
Transformator arus memiliki fungsi dari sebagai berikut:

1. Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi 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 yaitu 1 A dan 5 A.

^[13]Amalia, Devita dkk, "Optimalisasi Pengukuran Arus oleh Current Transformer untuk Meminimalisir Susut Energi pada Pabrik Baja PT.Inti General Yaja Steel Daerah Semarang Barat", Gema teknologi, Vol.18, No.1 April-Oktober 2014, hal.1

^[14] Tim Penyusun SKDIR 0520.2014. Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Arus. Jakarta Selatan. hal.1

4. Transformator arus untuk pengukuran dirancang supaya lebih cepat jenuh dibandingkan transformator arus proteksi sehingga konstruksinya mempunyai luas penampang inti yang lebih kecil tersaji pada Gambar 2.8.



a. CT Pengukuran

b. CT Proteksi

Gambar 2.8 Luas penampang inti CT

Secara fungsi transformator arus dibedakan menjadi dua yaitu:

1. Transformator arus pengukuran
 - a. Memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja dan tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan CT untuk proteksi.
 - b. Penggunaan transformator arus pengukuran untuk Amperemeter, Wattmeter, VARh-meter dan $\cos \varphi$ meter.
2. Transformator arus proteksi
 - a. Memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenalnya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi.
 - b. Penggunaan transformator arus proteksi untuk inputan relai arus lebih (OCR dan GFR), relai beban lebih, relai diferensial, relai daya dan relai jarak. ^[15]

Rasio trafo arus berdasarkan jumlah inti pada sekunder yaitu:

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
Contoh: a. Trafo arus 2 (dua) inti 150 – 300 / 5 – 5 A
b. Trafo arus 4 (empat) inti 800 – 1600 / 5 – 5 – 5 – 5 A

Pada transformator arus terdapat perhitungan untuk arus setting sisi primer dan sekunder disajikan dalam persamaan berikut:

^[15]Tim Penyusun SKDIR 0520.2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Arus*. Jakarta Selatan. hal.3-4

$$I_{CT \text{ primer}} = \frac{I_n \text{ primer}}{\text{Rasio CT primer}} \dots \dots \dots (2.3)$$

$$I_{CT \text{ sekunder}} = \frac{I_n \text{ sekunder}}{\text{Rasio CT sekunder}} \dots \dots \dots (2.4)^{[16]}$$

Transformator arus (CT) merupakan peralatan gardu induk yang berfungsi untuk mentransformasikan besaran arus dari tegangan tinggi menjadi tegangan rendah. Prinsip kerja dari CT sama seperti transformator daya yakni arus mengalir melalui kumparan primer dan menghasilkan gaya gerak magnet yang akan memproduksi fluks kemudian membangkitkan GGL lalu menuju kumparan sekunder. Besaran arus yang kecil ini memiliki ketelitian dan keakuratan yang berguna untuk pengukuran dan proteksi. Pada bay transformator CT dipasang setelah PMT dan sebelum *lightning arrester*.

2.2.4 *Lightning Arrester* (LA)

Lightning Arrester (LA) merupakan peralatan yang berfungsi untuk melindungi peralatan listrik dari tegangan surja (baik surja hubung maupun surja petir) surja mungkin merambat di dalam konduktor. Pada saat peristiwa surja, *travelling wave* atau gelombang berjalan merambat di penghantar sistem transmisi dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Maka, LA dipasang untuk memotong tegangan surja dengan cara mengalirkan arus surja ke tanah dalam orde sangat singkat.^[17] LA disajikan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 *Lightning Arrester* (LA)

^[16]Win, Thida dkk, "Differential Protection of Power Transformer in Substation".IJTSRD, Vol.3, No.5, Agustus2019,hal2166

^[17]Tim Penyusun SKDIR 0520.2014.Buku Pedoman Pemeliharaan *Lightning Arrester*.Jakarta Selatan.hal.2

Lightning Arrester (LA) memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Pada tegangan operasi (rms):
 - a. LA bersifat sebagai insulator.
 - b. Arus bocor ke tanah tetap ada, namun dalam orde mili-Ampere.
2. Pada saat terjadi surja petir atau surja hubung:
 - a. LA bersifat konduktif, dengan nilai resistansi sangat rendah.
 - b. LA mengalirkan arus surja ke tanah dalam orde kilo-Ampere.
 - c. LA segera bersifat insulator setelah surja berhasil dilewatkan.^[18]

Lightning arrester (LA) merupakan peralatan gardu induk yang berfungsi untuk mengamankan dari tegangan surja akibat surja hubung maupun surja petir. Pada saat kondisi normal LA bersifat sebagai insulator namun saat ada gangguan LA bersifat konduktif. Prinsip kerja LA saat ada gangguan akan memotong tegangan surja dengan cara mengalirkan arus surja ke tanah dalam orde sangat singkat sehingga gangguan selesai dan peralatan lain terjaga keamanannya. Pada bay transformator LA dipasang sebelum transformator daya hal ini dikarenakan untuk pengamanan lebih terhadap transformator.

2.2.5 Transformator Daya

Transformator tenaga atau transformator daya merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari dua atau lebih belitan, secara induksi elektromagnetik, mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC 60076 -1 tahun 2011). Transformator menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum ampere dan hukum induksi faraday. Dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet atau fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi.^[19] Transformator mengubah daya (arus dan tegangan) yakni menaikkan dengan cara *step-up* dan menurunkan dengan cara *step-down*. Transformator tenaga tersaji pada Gambar 2.10.

^[18]Tim Penyusun SKDIR 0520.2014.*Buku Pedoman Pemeliharaan Lightning Arrester*.Jakarta Selatan.hal.3

^[19]Tim Penyusun SKDIR 0520.2014.*Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator tenaga*.Jakarta Selatan.hal.1



Gambar 2.10 Transformator daya

Hukum Ampere yang menyatakan bahwa medan magnet dapat dibangkitkan oleh kawat berarus listrik.^[20] Hukum Faraday menyebutkan bahwa apabila suatu kumparan dengan jumlah lilitan N ditempatkan di dalam medan magnet sehingga memotong garis gaya magnet atau fluks yang berubah menurut waktu $d\Phi/dt$ maka pada kumparan tersebut akan timbul GGL induksi. Sehingga GGL induksi tidak hanya timbul karena penghantar yang digerakkan dalam medan magnet saja, melainkan dapat timbul asalkan ada perubahan fluks magnetik.^[21]

Prinsip kerja transformator adalah terdapat gulungan kawat tembaga yang digulungkan pada kaki-kaki transformator yaitu:

1. Gulungan primer (P) adalah gulungan yang dipasangkan pada sumber arus.
2. Gulungan sekunder (S) adalah gulungan yang dipasang pada aliran listrik.

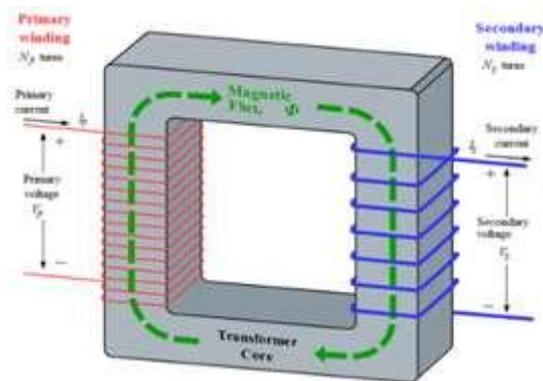
Bekerjanya transformator ini berdasarkan pembangkitan tegangan bolak balik secara induksi didalam gulungan-gulungan kawat yang melingkari garis gaya (fluks) yang berubah. Tegangan bolak-balik V_p mengalir I_p dan aliran I_p akan membangkitkan tegangan induksi V_s pada klem-klem gulungan sekunder.^[22]

Elektromagnetik transformator tenaga disajikan pada Gambar 2.11.

^[20]Kusuma, Indra Sukma Sari dkk, "Studi Pengaruh Medan Magnet Terhadap Jumlah Sel Darah Merah (Eritrosit) Pada Tikus Putih (*Rattusprvegicus*)". Buletin Fisika, Vol.15, No.1, Februari 2014, hal.9

^[21]Jacobus, Liefson dkk, "Rancang Bangun Teslameter Dengan Metode Induksi". JTI UKRIM, Vol.6, No.2, 2014, hal.43

^[22]Anwar, Salwin, "Variabel Tegangan Terhadap Hasil Electroplating Pada Alat Penyepuh Logam". Jurnal Poli Rekayasa, .4, No.1, Oktober 2008, hal.43



Gambar 2.11 Elektromagnetik pada transformator

Perhitungan arus nominal sisi primer dan sekunder disajikan sebagai berikut:

$$I_{\text{nom primer}} = \frac{S}{V_{\text{primer}} \times \sqrt{3}} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$I_{\text{nom sekunder}} = \frac{S}{V_{\text{sekunder}} \times \sqrt{3}} \dots \dots \dots (2.6)^{[23]}$$

Dimana:

$I_{\text{nom primer}}$ = Arus nominal sisi primer (HV)

$I_{\text{nom sekunder}}$ = Arus nominal sisi sekunder (LV)

S = Daya transformator

V_{primer} = Tegangan sisi primer (HV)

V_{sekunder} = Tegangan sisi sekunder (LV)

Transformator daya berfungsi untuk mentransformasikan daya dari tinggi dan rendah secara *step down* dan rendah ke tinggi secara *step up*. Prinsip kerjanya arus mengalir melalui kumparan primer menghasilkan gaya gerak magnet yang akan memproduksi fluks kemudian membangkitkan GGL menuju kumparan sekunder dan menghasilkan gaya gerak magnet dengan prinsip elektromagnetik. Pada bay transformator penempatannya sebelum LA diluar dan menuju kubikel.

2.2.6 Netral Grounding Resistor (NGR)

Netral Grounding Resistor (NGR) merupakan tahanan yang dipasang seri dengan netral sekunder pada transformator sebelum terhubung ke *ground*. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan sisi netral ke tanah. NGR disajikan pada Gambar 2.12. Terdapat dua jenis NGR yaitu:

^[23]Win, Thida dkk, "Differential Protection of Power Transformer in Substation".IJTSRD, Vol.3, No.5, Agustus2019,hal2166

1. Liquid

Resistornya menggunakan larutan air murni yang ditampung di dalam bejana dan ditambahkan garam (NaCl) untuk mendapatkan nilai resistansinya.

2. Solid

NGR jenis padat terbuat dari *Stainless Steel*, FeCrAl, Cast Iron, Copper Nickel atau *Nichrome* yang diatur sesuai nilai tahanannya.^[24]



Gambar 2.12 *Neutral Grounding Resistance* (NGR)

Pembumian titik netral yang melalui tahanan atau resistor. nilainya lebih tinggi dari pada reaktansi sistem pada tempat di mana tahanan tersebut di pasang. Arus gangguan fasa ke tanah ini dibatasi oleh tahanan itu sendiri, maka penentuan nilai tahanan yang tepat sangat perlu dilakukan karena dapat menimbulkan gangguan mekanis yang akan mempengaruhi kinerja sistem tenaga listrik.

Klasifikasi sistem pembumian dengan NGR yakni sebagai berikut:

1. Sistem pembumian dengan tahanan rendah, dengan tahanan 12 dan 40 Ohm serta arus primer 50 – 600 A.
2. Sistem pembumian dengan tahanan tinggi dengan tahanan 200 dan 500 Ohm, serta arus primer 1 – 10 A.

Penggunaan NGR dengan jenis rendah maupun tinggi tergantung dari desain subsistem tenaga listrik, pada dasarnya semakin besar nilai NGRnya maka arus gangguan fasa ke tanahnya semakin kecil.^[25]

^[24]Tim Penyusun SKDIR 0520.2014.*Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator tenaga*.Jakarta Selatan.hal.13

Neutral Grounding Resistance (NGR) merupakan peralatan gardu induk yang berfungsi untuk mengontrol arus gangguan yang mengalir disisi netral yang menuju ke tanah guna pengamanan gangguan arus netral menuju transformator. Pentanahan NGR dipasang pada transformator yang menggunakan belitan bintang (Y) yang ditanahkan dan terpasang pada belitan sekunder transformator. NGR memiliki klasifikasi tahanan pembumian dan arus primernya.

2.2.7 Kubikel 20kV

Kubikel 20 KV gardu induk, kubikel ini merupakan seperangkat peralatan listrik yang dipasang pada gardu distribusi yang berfungsi sebagai pembagi, pemutus, penghubung pengontrol dan proteksi sistem penyaluran tenaga listrik tegangan 20 KV. Kubikel pada dasarnya adalah lemari sebagai tempat terpasangnya peralatan kontrol, pengukuran, proteksi, dan *annunciator*, yang dimaksudkan untuk mempermudah operasi dan pemeliharaan serta keamanan bagi operator (Pusdiklat PLN; 2010).^[26] Kubikel 20kV disajikan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Kubikel 20kV

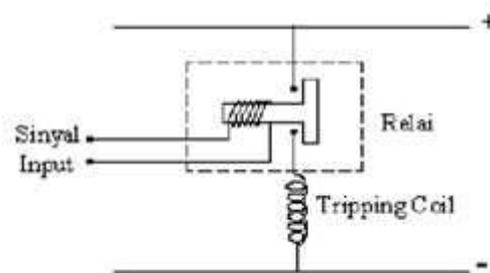
^[25]Manulang, Verta Asi dkk, “*Analisis Sistem Pembumian Netral Generator Pasa Pembangkit Listrik Tenaga Uap Sei.Batu 2x8,5 MW Sanggau*”, 2018.hal 1

^[26]Prasetyo, Wahyu Adi dkk, “*Simulator Kubikel Minimum Untuk Investigasi Gangguan Scada Sistem Distribusi Tenaga listrik 20kV*” Gema Teknologi, Vol.17, No. 4, Oktober 2013-April 2014, hal 164-165

Kubikel 20kV merupakan peralatan gardu induk yang berfungsi sebagai tempat terpasangnya peralatan kontrol, pengukuran, proteksi, dan *annunciator*, yang berguna untuk mempermudah operasi dan pemeliharaan serta keamanan bagi operator. Didalam kubikel terdapat wiring yang menghubungkan setiap peralatan. Inputan kubikel yakni dari keluaran kabel tanah sisi sekunder transformator dari kubikel 20kV akan menuju penyulang yakni distribusi.

2.3 Relai Proteksi

Relai proteksi adalah susunan peralatan yang direncanakan untuk dapat merasakan atau mengukur adanya gangguan atau mulai merasakan adanya ketidaknormalan pada peralatan atau bagian sistem dan secara otomatis dari inputan yang diterimanya, misalnya arus, tegangan, daya, sudut fasa, frekuensi, impedansi dan sebagainya, dengan besaran yang telah ditentukan kemudian memberi isyarat berupa lampu atau bel dan mengambil keputusan untuk seketika ataupun dengan perlambatan waktu membuka pemutus tenaga. Pemutus tenaga umumnya dipasang untuk dapat memisahkan sehingga sistem lainnya tetap dapat beroperasi secara normal. Prinsip kerja relai proteksi digambarkan pada Gambar 2.14.^[27]



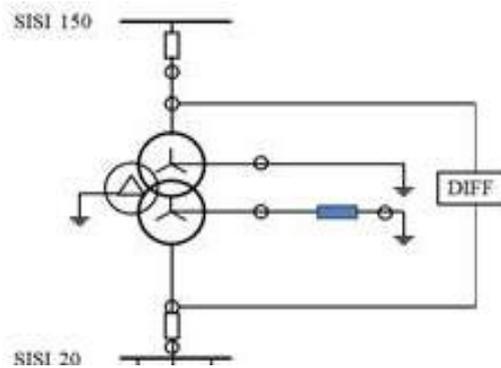
Gambar 2.14 Prinsip kerja relai proteksi

Relai proteksi merupakan peralatan gardu induk yang berfungsi untuk mendeteksi arus gangguan guna mengamankan peralatan lain agar gangguan tidak meluas maka memisahkan peralatan yang normal dan yang terkena gangguan. Prinsip kerjanya saat ada inputan arus gangguan yang diterima relai proteksi apabila arus gangguan melebihi arus settingnya maka relai proteksi berkerja dengan sumber tegangan DC 110V memberikan perintah ke PMT.

^[27]Nasution, Elvy Shanur dkk, “Relai Diferensial Sebagai Proteksi Pada Transformator Daya Pada Gardu Induk”.Regional Development Industri & Health Science, Technology and Art of Life, Vol 2, No 1, 2019, hal.180

2.3.1 Relai Diferensial

Relai diferensial bekerja berdasarkan hukum kirchoff, dimana arus yang masuk pada suatu titik sama dengan arus yang keluar dari titik tersebut. Titik pada proteksi diferensial adalah daerah pengamanan, dalam hal ini dibatasi oleh dua buah transformator arus. Relai ini sangat selektif sehingga biasanya tidak perlu dikoordinasikan dengan relai proteksi lainnya, dan bekerjanya *instant*.^[28] Daerah proteksi relai diferensial disajikan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Daerah proteksi relai diferensial

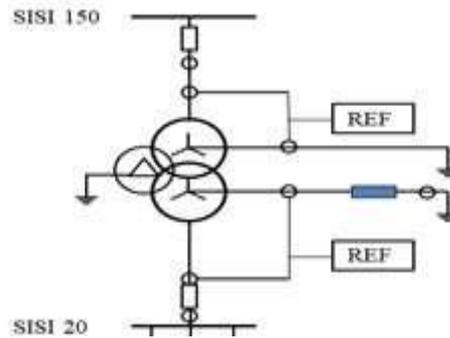
Relai diferensial merupakan proteksi utama yang berfungsi untuk mengamankan transformator dari gangguan fasa-fasa. Pada relai diferensial terdapat arus diferensial, arus *restrain*, arus setting dan *slope* serta *matching factor*. Prinsip kerjanya dengan membandingkan arus pada CT₁ dan CT₂ apabila ada perbedaan arus yang melebihi arus settingnya dan arus *restrain* maka relai akan bekerja dan memerintah PMT untuk *trip*.

2.4.2 Relai *Restricted Earth Fault* (REF)

Restricted Earth Fault (REF) merupakan proteksi utama transformator yang prinsip kerjanya sama dengan diferensial relai membandingkan dua besaran arus dan fasa antara dua titik pada batasan-batasan daerah pengaman, perbedaannya REF untuk pengamanan terhadap gangguan fasa ke tanah, khususnya yang dekat dengan titik bintang transformator atau reaktor. REF dipasang pada belitan transformator atau reaktor dengan konfigurasi bintang (Y) yang ditanahkan.^[29] Daerah proteksi relai REF disajikan pada Gambar 2.16.

^[28]Setijasa, Hery, "Pengujian Relai Diferensial GI". Jurnal Teknik Energi, Vol.9, No. 2, Juni 2013, hal 74

^[29]Tim Penyusun SKDIR 0520.2014. Buku Pedoman Pemeliharaan Proteksi Dan Kontrol Transformator. Jakarta Selatan. hal.9



Gambar 2.16 Daerah proteksi relai REF

Restricted Earth Fault (REF) merupakan relai proteksi utama yang berfungsi untuk mengamankan transformator dari gangguan fasa ke tanah. Prinsip kerjanya sama seperti relai diferensial apabila ada perbedaan arus netral dari perbandingan pengukuran CT yang melebihi arus settingnya maka akan memberikan perintah *trip* ke PMT. Pemasangan relai REF hanya pada belitan transformator bintang (Y).

2.3.3 Relai *Over Current Relai (OCR)*

Over Current Relai (OCR) merupakan peralatan yang mengamankan dari adanya arus lebih, baik yang disebabkan oleh gangguan hubung singkat atau *overload* (beban lebih) yang dapat merusak peralatan sistem tenaga yang berada dalam wilayah proteksinya. Kemudian memberikan perintah *trip* ke PMT sesuai dengan karakteristik waktunya.^[30]

Over Current Relai (OCR) merupakan relai proteksi cadangan yang berfungsi untuk mengamankan transformator dari gangguan fasa-fasa. Prinsip kerjanya saat ada arus gangguan fasa-fasa yang melebihi arus settingnya maka relai memberi perintah *trip* ke PMT. Pemasangan OCR dipasang pada CT₁ dan CT₂ sebagai cadangan apabila relai Diferensial apabila gagal mengamankan.

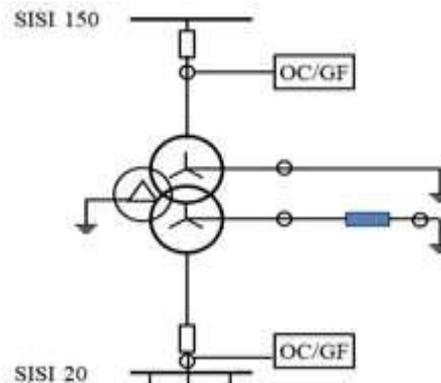
2.3.4 Relai *Ground Fault Relai (GFR)*

Ground Fault Relai (GFR) atau relai hubung tanah pada dasarnya mempunyai prinsip kerja sama dengan OCR adanya arus lebih yang dirasakan relai, baik disebabkan adanya gangguan hubung singkat atau *overload* fasa-tanah kemudian memberikan perintah *trip* ke PMT sesuai dengan karakteristik waktunya.^[31]

Daerah proteksi relai OCR dan GFR disajikan pada Gambar 2.17.

^[30]Rida, Al Khalik, "Evaluasi Koordinasi Relai Arus Lebih (OCR) dan Gangguan Tanah (GFR) pada Gardu Induk Garuda Sakti Pekanbaru". Jom FTEKNIK, Vol.3, No.1, Februari 2016, hal.2

^[31]Ibid, hal.3



Gambar 2.17 Daerah proteksi OCR dan GFR

Pada kondisi normal beban seimbang I_R , I_S , I_T sama besar, sehingga pada kawat netral tidak timbul arus dan relai hubung tanah tidak dialiri arus. Bila terjadi ketidakseimbangan arus atau terjadi gangguan fasa ke tanah, maka relai hubung tanah akan bekerja.^[32]

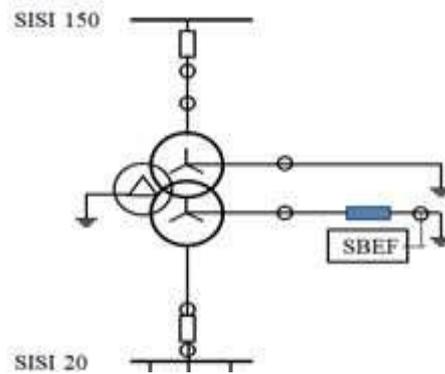
Ground Fault Relai (GFR) merupakan relai proteksi cadangan yang berfungsi untuk mengamankan transformator dari gangguan fasa-tanah. Prinsip kerjanya saat ada arus gangguan fasa-tanah yakni arus netral dari perhitungan ketidakseimbangan arus ketiga fasa yang melebihi arus settingnya maka relai memberi perintah *trip* ke PMT. Pemasangan GFR dipasang pada CT₁ dan CT₂ sebagai cadangan apabila relai REF apabila gagal mengamankan.

2.3.5 Relai *Standby Earth Fault* (SBEF)

Standby Earth Fault (SBEF) merupakan relai proteksi terhadap arus lebih yang berfungsi untuk mengamankan NGR dari hubung singkat fasa ke tanah dengan inputan gangguan dari pengukuran arus netral (I_n) pada CTnya. Oleh karena itu SBEF hanya ada pada transformator yang pentanahannya menggunakan NGR. SBEF ini juga harus dikoordinasikan dengan relai GFR serta harus bekerja paling akhir sebagai pengaman NGR agar gangguan tidak meluas menuju transformator daya.^[33] Daerah proteksi relai SBEF disajikan pada Gambar 2.18.

^[32]Dermawan, Erwin dkk, "Analisa Koordinasi Over Current Relai Dan Ground Fault Relai Di Sistem Proteksi Feeder Gardu Induk 20 kV Jababeka". Jurnal Elektum, Vol.14, No. 2, Juni 2013, hal.45

^[33]Tim Penyusun SKDIR 0520.2014. Buku Pedoman Pemeliharaan Proteksi Dan Kontrol Transformator. Jakarta Selatan. hal.10



Gambar 2.18 Daerah proteksi relay SBEF

Standby Earth Fault (SBEF) merupakan relai proteksi cadangan yang berfungsi untuk mengamankan NGR dari gangguan fasa ke tanah. Prinsip kerjanya saat ada arus gangguan fasa-tanah yakni arus netral pengukuran pada CT_{SBEF} melebihi arus settingnya maka relai memberi perintah *trip* ke PMT. Pemasangan SBEF dipasang pada CT_{SBEF} setelah NGR sebagai pengaman dari arus netral yang menuju NGR dan dapat meluas ke transformator daya.

2.4 Relai MiCOM P14x^[34]

MiCOM merupakan sistem dan layanan dari Schneider yang memiliki konsep fleksibilitas. MiCOM menyediakan kemampuan untuk mendefinisikan suatu solusi aplikasi melalui kemampuan komunikasi yang luas, mengintegrasikannya dengan sistem kontrol catu daya. Komponen dalam MiCOM adalah *Protection* (P), *Control* (C) dan *Measurement* (M). Produk MiCOM mencakup fasilitas yang luas untuk merekam informasi dari perilaku sistem. Mereka juga bisa memberikan pengukuran sistem secara berkala ke pusat kendali yang memungkinkan pemantauan dan kontrol jarak jauh.

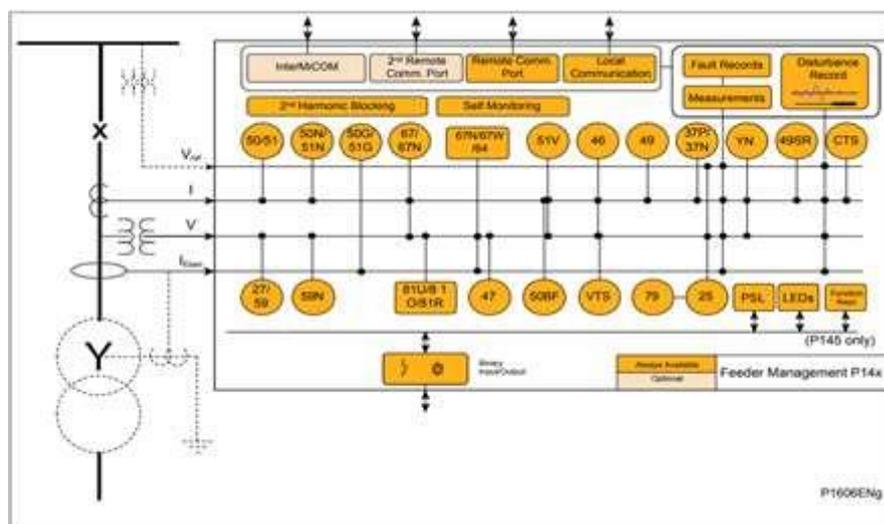
Relai MiCOM P14x dirancang untuk perlindungan berbagai saluran udara dan kabel bawah tanah dari distribusi hingga transmisi tingkat tegangan. Relai mencakup beragam fitur membantu dengan diagnosis sistem tenaga dan analisis kesalahan. P14x menawarkan arus lebih dan perlindungan gangguan-tanah untuk *supply* tambahan untuk memastikan *range* operasi pada Tabel 2.1 sebagai berikut:

^[34]Schneider Elecric.2014.MiCOM P14x Feeder Mangement Relai Technical Manual.France

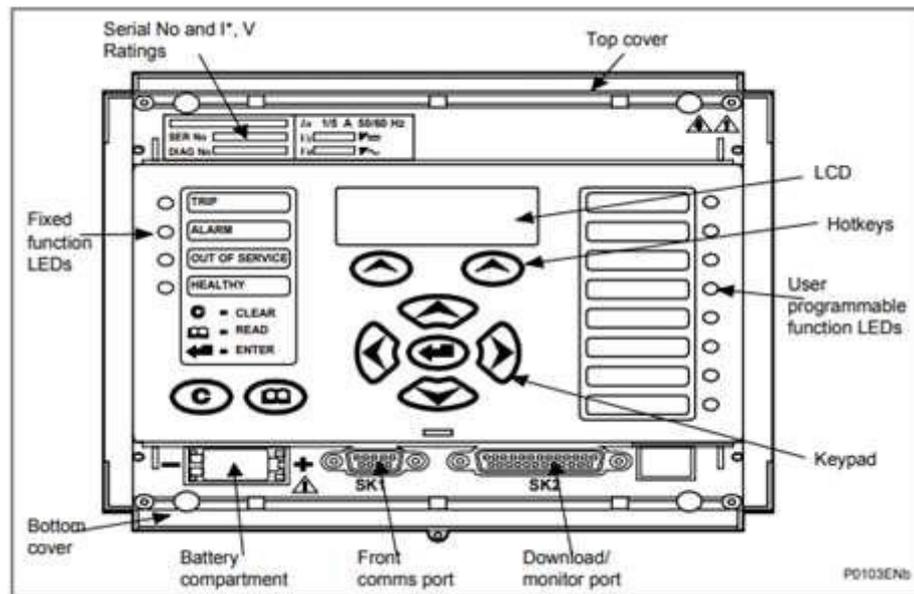
Tabel 2.1 Range supply operasi relai

Supply rating		Range Operasi	
DC	AC	DC	AC
24-32V	-	19-65V	-
48-110V	-	37-150V	32-110V
125-250V	100-240V	87-300V	80-265V

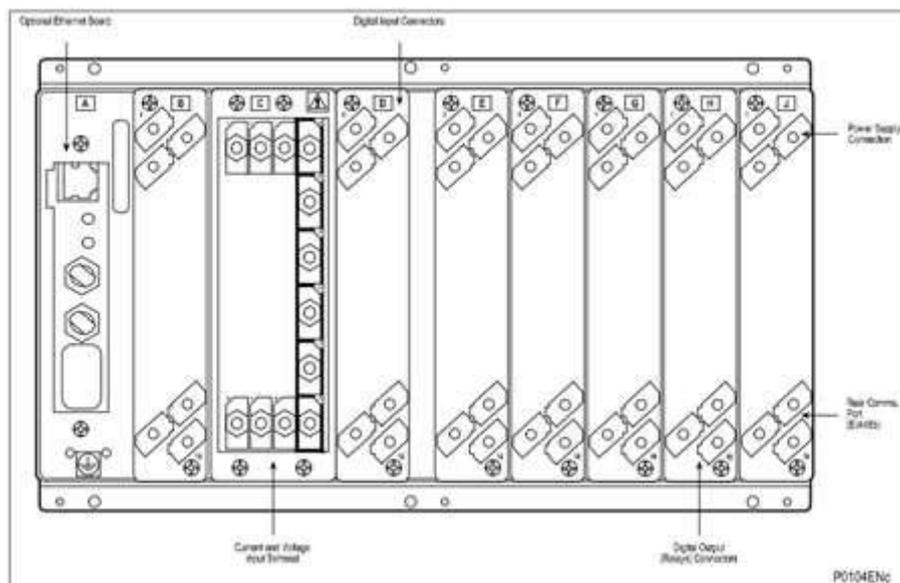
MiCOM P14x memiliki berbagai fungsi yang dipakai untuk relai SBEF untuk mengamankan jika suatu sistem dibumikan melalui impedansi tinggi. Maka, diterapkan perlindungan gangguan tanah membutuhkan karakteristik yang sesuai dan sensitif pengaturan rentang agar efektif. *Sensitive Earth Fault* (SEF) memiliki tiga elemen 50N/51N/67N yang berfungsi menurunkan, mengukur dan perlindungan SEF. Setiap elemen dilengkapi tahap *non-directional*, *directional forward* atau *directional reverse*. Pada pengukuran didapat nilai arus ISEF *magnitude* dan ISEF *angle*. Karakteristik pada SEF dapat berupa DT, IEC S *Inverse*, IEC V *Inverse*, IEC E *Inverse*, UK LT *Inverse*, IEEE M *Inverse*, IEEE V *Inverse*, IEEE E *Inverse*, *Inverse AS*. Relai memiliki spesifikasi rasio CT primer 1A-30kA dan sekunder 1A/5A, waktu kerja PMT 0,10detik-50detik Diagram fungsi-fungsi MiCOM P14x disajikan pada Gambar 2.19, tampak depan MiCOM P14x pada Gambar 2.20 dan tampak belakang pada Gambar 2.21.



Gambar 2.19 Diagram fungsi MiCOM P14x



Gambar 2.20 Tampak depan MiCOM P14x



Gambar 2.21 Tampak belakang MiCOM P14x

MiCOM menyediakan kemampuan untuk mendefinisikan suatu solusi aplikasi melalui kemampuan komunikasi yang luas, mengintegrasikannya dengan sistem kontrol catu daya. Komponen dalam MiCOM adalah *Protection* (P), *Control* (C) dan *Measurement* (M). P14x menawarkan arus lebih integral dan perlindungan gangguan-tanah dan cocok untuk aplikasi pada impedansi yang di-ground.

2.5 Kontaktor^[35]

Kontaktor adalah jenis saklar yang bekerja secara magnetik yaitu kontak bekerja apabila kumparan diberi energi. NEMA(2007), mendefinisikan kontaktor magnetis sebagai alat yang digerakan secara magnetis untuk menyambung dan membuka rangkaian daya listrik. Unit kontaktor terdiri dari koil, beberapa kontak *normally open* (NO) dan beberapa *normally close* (NC). Kontaktor disajikan pada Gambar 2.21.



Gambar 2.22 Kontaktor

Keuntungan penggunaan kontaktor magnetis sebagai pengganti peralatan kontrol yang dioperasikan secara manual meliputi:

1. Kontaktor magnetis dapat menangani arus yang besar atau tegangan yang tinggi sehingga meningkatkan keselamatan dan keamanan instalasi.
2. Kontaktor memungkinkan operasi majemuk dilaksanakan dari satu operator (satu lokasi) *interlocked* untuk mencegah kesalahan dan bahaya operasi.
3. Kontaktor mudah disinkronisasi dengan time relai.
4. Kontaktor dapat dikontrol secara otomatis dengan sensor yang sangat peka.
5. Kontaktor peralatan kontrol dapat dipasangkan pada titik-titik yang jauh.
6. Kontaktor kontrol logikanya dilakukan dengan peralatan pada program seperti *programmable logic controller* (PLC).

Kontaktor merupakan saklar magnetik yang berkerja apabila kumparannya diberi energi yang berguna untuk membuka dan menutup rangkaian. Memiliki kontak utama dan kontak bantu yang terdiri dari kontak NO dan NC. Kontaktor memiliki keuntungan yakni dapat menangani tegangan ada arus yang besar, memungkinkan operasi majemuk, mudah disinkronkan, dapat dikontrol dengan sensor dan berkerja dengan peka.

^[35]Sinaga, Rusman, "Studi Kelayakan Praktek Perancangan Instalasi Mesin Listrik Pada Laboratorium Mesin-mesin Listrik Politeknik Negeri Kupang". Jurnal Ilmiah Flash, Vol.4, No.1, Juni 2018, hal.39

2.6 Relai Elektromekanis

Relai elektromekanis adalah saklar magnetis sebagai alat penghubung pada rangkaian. Relai ini menghubungkan rangkaian beban on dan off dengan pemberian energi elektromagnetis yang membuka dan menutup pada rangkaian. Relai elektromekanis berisi kontak diam dan kontak bergerak. Level tegangan pada kumparan relai yang diberi tegangan, menyebabkan terhubungnya kontak yang disebut tegangan tarik (*pick up voltage*). Kumparan relai dirancang untuk tidak lepas sampai penurunan tegangan pada penurunan tegangan minimum sekitar 85% dari tegangan kerja.^[36] Relai elektromekanis disajikan pada gambar 2.22.



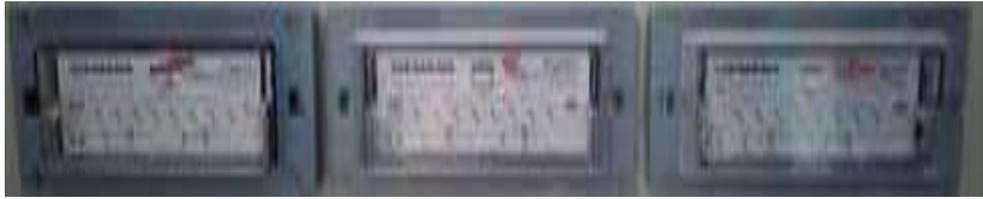
Gambar 2.23 Relai elektromekanis

Relai elektromekanis merupakan saklar magnetis alat penghubung pada rangkaian, aplikasi pada industri dan kontrol proses memerlukan relai sebagai elemen kontrol penting. Relai ini menghubungkan rangkaian beban on dan off dengan pemberian energi elektromagnetis yang membuka dan menutup pada rangkaian yang dilengkapi dengan kontak NO dan NC. Berkerja saat ada level tegangan masuk akan *pickup* terus melebihi setting relai bekerja namun, apabila level tegangan menurun akan *release* kembali normal lagi.

2.7 Lockout

Lockout merupakan peralatan untuk trip PMT dan memberikan informasi jika telah terjadi gangguan pada rangkaian trip PMT. Jika *lockout* kerja dan tidak di reset maka PMT tidak bisa masuk. *Lockout* disajikan pada Gambar 2.23.

^[36]Sinaga, Rusman, "Studi Kelayakan Praktek Perancangan Instalasi Mesin Listrik Pada Laboratorium Mesin-mesin Listrik Politeknik Negeri Kupang". Jurnal Ilmiah Flash, Vol.4, No.1, Juni 2018, hal.39-40



Gambar 2.24 Lockout

2.8 Annunciator

Annunciator adalah peralatan bantu yang berfungsi memberikan tanda peringatan kepada operator. *Annunciator* mengambil input dari masing-masing relai proteksi. *Annunciator* dapat direset setelah operator mencatat dan menekan tombol “*acknowledge*” dan “*reset*”. *Annunciator* dilengkapi dengan alarm. Alarm berupa peringatan sirene suara yang bekerja bersamaan dengan terjadinya gangguan. Alarm dapat dihentikan setelah operator menekan tombol “*acknowledge*”.^[37] *Annunciator* disajikan pada Gambar 2.24.



Gambar 2.25 Annunciator

Annunciator merupakan peralatan bantu yang berfungsi untuk memberikan tanda atau informasi saat adanya gangguan yang dilengkapi dengan adanya alarm maupun led pada papan annunciator. Alarm annunciator dapat dimatikan dengan cara menekan tombol *acknowledge* pada panel. Hal ini guna agar operator dapat menghubungi pihak unit bila gangguan membahayakan.

^[37]Tim Penyusun SKDIR 0520.2014.*Buku Pedoman Pemeliharaan Proteksi Dan Kontrol Transformator*.Jakarta Selatan.hal.10

2.9 Karakteristik Waktu Relai Proteksi^[38]

Karakteristik waktu relai proteksi disajikan pada Gambar 2.25 dan dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu:

1. Relai arus lebih seketika (*instantaneus*)

Relai ini memberikan perintah *trip* pada PMT pada saat terjadi gangguan hubung singkat dan besar arus gangguannya mencapai arus *settingnya* (I_s) dan jangka waktu kerja relai mulai *pick up* sampai relai bekerja sangat singkat tanpa tunda waktu (20 ms - 60 ms).

2. Relai arus lebih waktu tertentu

Relai ini akan memberikan perintah *trip* pada PMT pada saat terjadi gangguan hubung singkat dan besar arus gangguannya mencapai arus *settingnya* (I_s) dan jangka waktu kerja relai mulai *pick up* sampai relai kerja diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya arus yang mengerjakan relai.

3. Relai arus lebih terbalik (*inverse*)

Relai ini akan memberikan perintah *trip* pada PMT pada saat terjadi gangguan bila arus gangguan mencapai nilai arus *settingnya* (I_s) dan jangka waktu kerja relai mulai *pick up* sampai kerja relai diperpanjang berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan. Pada relai ini sumbu tegak merupakan waktu dalam detik dan sumbu datar adalah berapa kali besarnya arus gangguan yang melewati relai terhadap arus penyetelannya ($n \times I_{set}$). Penyetelan waktu ditunjukkan dengan kurva yang sering digunakan dan disebut dengan T_d (*time dial*) atau TMS (*time multiple setting*) yang dirumuskan sebagai berikut (PT. PLN, 2005c):

$$t = \text{TMS} \times \frac{k}{(I_F/I_S)^{a-1}} + c \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana:

t = Waktu dalam detik

TMS = Time Multipler Setting

I_F = Arus Gangguan

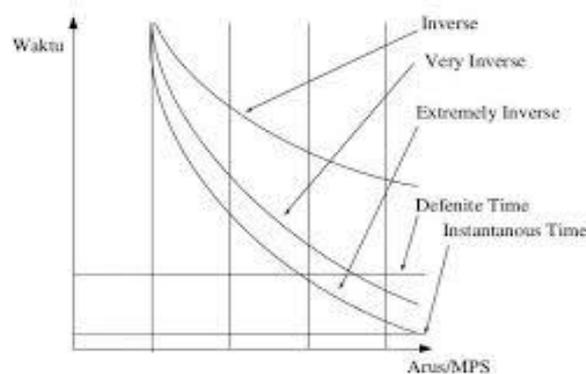
I_S = Arus Setting

$k, a, \text{ dan } c$ = Konstanta karakteristik yang nilainya sesuai Tabel 2.2

^[38]Sutarti, "Analisa Perhitungan Setting Arus dan Waktu Pada Relai Arus Lebih (OCR) Sebagai Proteksi Transformator Daya di Gardu Induk Cawang Lama Jakarta". Jurnal Sains dan Teknologi, Vol.9, No. 1, Maret 2010, hal.27

Tabel 2.2 Konstanta karakteristik waktu relai proteksi

No	Deskripsi	k	c	a
1	<i>Definite time</i>	-	0-100	-
2	<i>Standart inverse</i>	0.14	0	0,02
3	<i>Very inverse</i>	13,5	0	1
4	<i>Extremely inverse</i>	80	0	2
5	<i>Long time inverse</i>	120	0	1



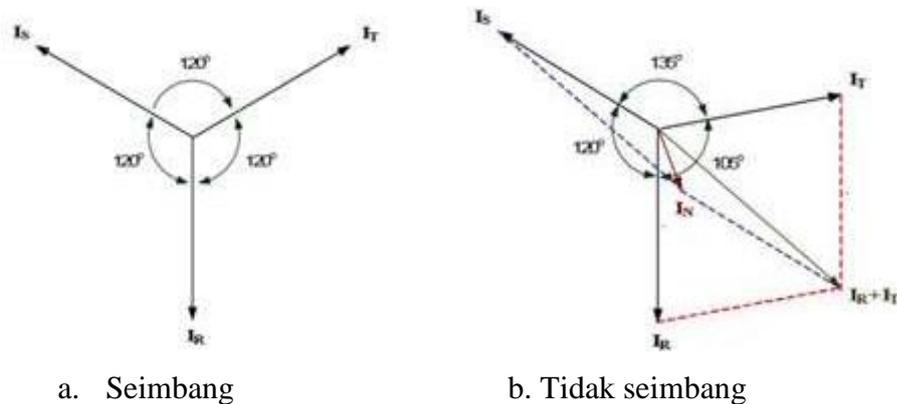
Gambar 2.26 Karakteristik waktu relai proteksi

Karakteristik waktu pada relai proteksi berfungsi untuk menentukan waktu kapan relai proteksi memberikan perintah *trip* ke PMT saat arus gangguan telah melebihi arus setting relai. Karakteristik waktunya terbagi menjadi waktu seketika (*instantaneous*), waktu tertentu dan waktu terbalik (*inverse*). Pada karakteristik waktu terbalik (*inverse*) terdapat nilai konstanta karakteristik yang akan menentukan waktu *trip* relai proteksi.

2.10 Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban adalah suatu keadaan dimana satu atau dua syarat dari beban seimbang tidak terpenuhi sebagai berikut:

1. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
2. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
3. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 2.27 Vektor diagram arus

Pada Gambar 2.26 (a) menunjukkan bahwa penjumlahan ketiga vektor arus (I_R, I_S, I_T) sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N). Sedangkan pada Gambar 2.26 (b) menunjukkan bahwa penjumlahan ketiga vektor arus (I_R, I_S, I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung pada besar faktor ketidakseimbangannya. Arus yang mengalir pada kawat netral yang merupakan arus bolak-balik adalah penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris. Dalam sistem ini jumlah arus saluran sama dengan arus netral sebagai persamaan berikut:

$$I_N = I_R + I_S + I_T \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana:

I_N = Arus Netral

I_R = Arus fasa R

I_S = Arus fasa S

I_T = Arus fasa T^[39]

Ketidakseimbangan beban merupakan keadaan dimana satu atau dua syarat beban tidak terpenuhi yakni adanya perbedaan vektor dan sudut arus yang mengakibatkan gangguan. Penjumlahan ketiga vektor arus (I_R, I_S, I_T) yang tidak sama dengan nol menimbulkan arus netral (I_N) atau arus gangguan. Keseimbangan beban terjalin apabila nilai vektor arus (I_R, I_S, I_T) sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N). Maka nilai vektor arus dan sudut harus seimbang dan sesuai agar tidak timbul arus gangguan yang mengganggu keseimbangan beban.

^[39]Siregar, Rizky Syahputra dkk, "Perhitungan Arus Netral, Rugi-Rugi, dan Efisiensi Transformator Distribusi 3 Fasa 20 KV/400V Di PT. PLN (Persero) Rayon Medan Timur Akibat Ketidakseimbangan Beban". Journal of Electrical Technology, Vol.2, No.3, Oktober 2017, hal.79-80



2.11 Gangguan Sistem Tenaga Listrik

Gangguan dibedakan menjadi dua kategori yaitu sebagai berikut:

1. Gangguan sistem (*System Fault*)

Gangguan yang terjadi di sistem tenaga listrik (sisi primer) seperti pada generator, transformator, SUTT, SKTT dan lain sebagainya. Gangguan sistem dapat dikelompokkan sebagai gangguan sistem aktif dan pasif yaitu:

- a. Gangguan sistem aktif tidak terisolir dengan benar adalah gangguan sistem aktif yang ditandai dengan sistem proteksi tidak selektif dalam mengisolir gangguan, waktu pemutusan gangguan tidak sesuai dan sistem proteksi tidak bekerja pada saat dibutuhkan. Contoh gangguannya yaitu petir, isolator pecah, konduktor putus, pohon dan lain sebagainya.
- b. Gangguan sistem pasif tidak terisolir dengan benar adalah gangguan yang ditandai dengan ketidakstabilan sistem (*power swing*), kenaikan dan penurunan tegangan dan frekuensi serta pembebanan berlebih.

2. Gangguan non sistem (*Non System Fault*)

Gangguan yang menyebabkan PMT terbuka bukan karena adanya gangguan di sisi primer (yang bertegangan) tetapi disebabkan adanya gangguan disisi sekunder peralatan seperti relai yang bekerja sendiri atau kabel kontrol yang terluka atau oleh sebab interferensi dan lain sebagainya. Jenis gangguan non-sistem yaitu:

- a. Kerusakan komponen relai,
- b. Kabel kontrol terhubung singkat,
- c. Interferensi atau induksi pada kabel kontrol.^[40]

Gangguan pada sistem tenaga listrik terdiri atas gangguan sistem dan gangguan non sistem. Gangguan sistem ini dibagi menjadi gangguan sistem aktif yang ditandai sistem proteksi tidak bekerja dengan selektif dalam mengisolir gangguan pada waktu pemutusannya disesuaikan dan gangguan sistem pasif yang ditandai ketidakstabilan sistem, kenaikan dan penurunan tegangan dan frekuensi serta pembebanan yang lebih. Gangguan non sistem gangguan yang disebabkan adanya gangguan disisi sekunder peralatan seperti relai yang bekerja sendiri atau kabel kontrol yang terluka atau oleh sebab interferensi.

^[40]Tim Penyusun SKDIR 0520.2014.*Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Arus*. Jakarta Selatan.hal.23-24



2.12 ETAP 12.6.0

ETAP merupakan program analisa grafik transient kelistrikan yang dapat dijalankan dengan menggunakan program Microsoft® Windows® 2000, XP, Vista, 7, dan 8. ETAP merupakan alat analisa yang komprehensif untuk desain dan *testing power* sistem. Program ETAP dibuat oleh perusahaan *Operation Technology, Inc* (OTI) dari tahun 1983. ETAP versi 12.6.0 merupakan salah satu produk OTI. ETAP dapat menganalisa *Load Flow Analysis, Short Circuit Analysis, Harmonic Analysis, Transient Stability Analysis, Relai Coordination, Optimal Power Flow Analysis, Reliabilily Analysis, DC Load Flow Analysis, DC Short Circuit Analysis, Battery Sizing Cable* dan *Raceways Ground Grid*.

ETAP memudahkan untuk membuat dan mengedit *single line diagram* (SLD), sistem kabel bawah tanah, sistem kabel tiga dimensi, dan *grounding grid* tiga dimensi. Program ini didesain dengan tiga konsep utama yaitu:

1. Operasi Nyata Secara Virtual (*Virtual Reality Operation*)

Pengoperasian seperti ketika menutup dan atau membuka CB, menempatkan elemen yang rusak, mengganti status operasi motor dan lain sebagainya. ETAP versi 12.6.0 memasukan konsep-konsep baru untuk menentukan koordinasi peralatan pengaman secara langsung dari single line diagram.

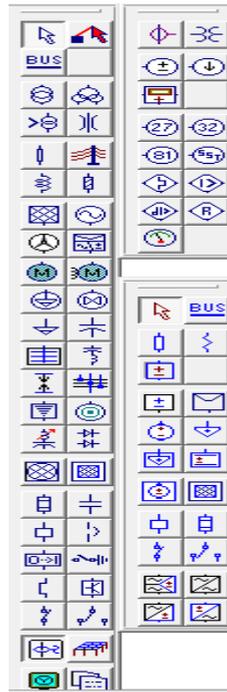
2. Data Gabungan Total (*Total Integration Data*)

Menggabungkan pemikiran elektrik, mekanika dan yang berkaitan dengan listrik dari unsur yang terdapat pada sistem dalam database yang sarna. Seperti sebuah kabel, tidak hanya terdiri dari data peralatan listrik dan dimensi fisik, tetapi juga informasi yang mengindikasikan jalur yang dilalui.

3. Kesederhanaan dalam memasukkan data (*Simplicity in Data Entry*)

Data editor dapat mempercepat proses pemasukan data dengan permintaan data minimum untuk pembelajaran tertentu. Untuk mencapai tujuan ini, ETAP telah membangun struktur editor properti dengan cara yang paling logis untuk memasukkan data untuk berbagai jenis analisis atau desain.^[41] Gambar *toolbar* pada ETAP 12.6.0 disajikan pada gambar 2.27.

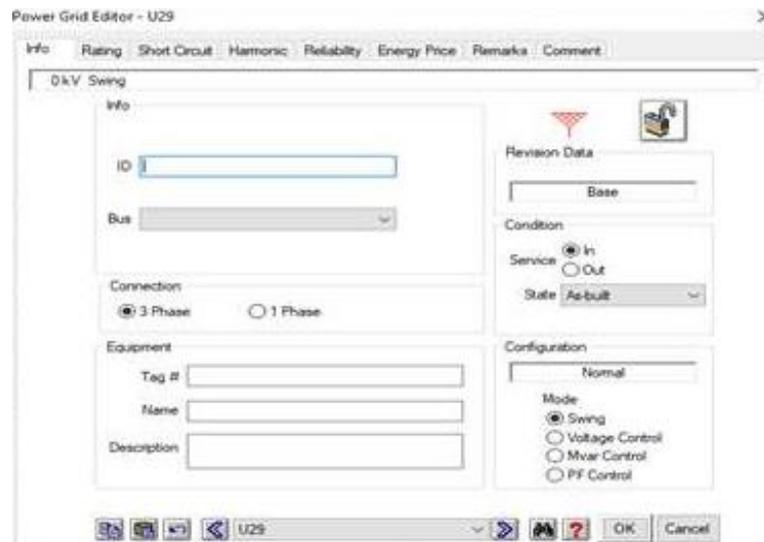
^[41]Pramono, Tri Joko dkk, "Analisis Drop Tegangan Pada Jaringan Tegangan Menengah Dengan Menggunakan Simulasi Program ETAP". Jurnal Energi & Kelistrikan, Vol.10, No.1, Juni 2018, hal.29-30



Gambar 2.28 *Toolbar* pada ETAP 12.6.0

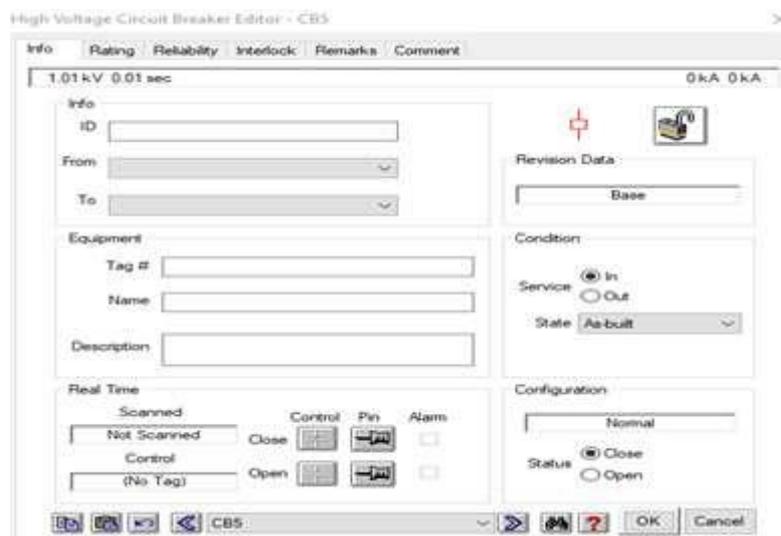
Berikut cara penggunaan ETAP 12.6.0 untuk koordinasi relai proteksi pada bay transformator dengan simulasi *relai coordination*:

1. Buka aplikasi ETAP 12.6.0.
2. Buat lembar kerja baru dengan memilih menu *file* kemudian pilih *new project*.
3. Masukkan nama lembar kerja dan pilih standar sistem *metric* lalu klik ok.
4. Membuat SLD pada lembar kerja sesuai dengan SLD jaringan yang akan dianalisa terdiri atas *power grid*, PMT, transformator, CT, relai proteksi dan beban.
5. Memasukkan data dan parameter setiap peralatan.
 - a. Data untuk *power grid*
 - *Double klik* pada simbol *power grid* pada lembar kerja.
 - Pada bagian info masukkan ID, pilih koneksi dan mode.
 - Pada bagian *rating* masukkan nominal tegangan.
 - Pada bagian *short circuit* masukkan data *rating* dan impedansi hubung singkat lalu *klik ok*.

Gambar 2.29 Pengaturan *power grid* pada ETAP 12.6.0

b. Data untuk PMT

- *Double klik* pada simbol PMT pada lembar kerja.
- Pada bagian info masukkan ID dan pilih status.
- Pada bagian *rating* pilih standar pengukuran dan masukkan nominal tegangan dan arus lalu *klik ok*.

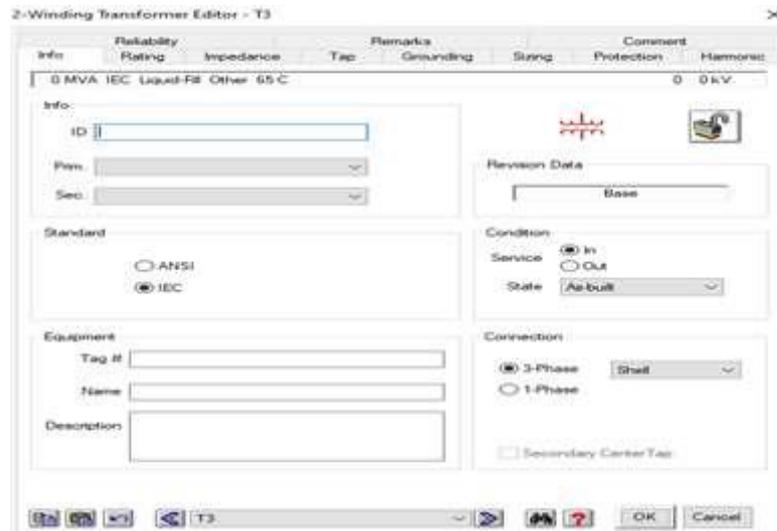


Gambar 2.30 Pengaturan PMT pada ETAP 12.6.0

c. Data untuk transformator

- *Double klik* pada simbol transformator pada lembar kerja.
- Pada bagian info masukkan ID dan pilih standar, koneksi dan kondisi.
- Pada bagian *rating* masukkan nominal daya, tegangan primer dan sekunder.

- Pada bagian impedansi pilih *typical Z&X/R*.
- Pada bagian *grounding* masukkan data vector group, belitan primer dan sekunder transformator lalu *klik ok*.



Gambar 2.31 Pengaturan transformator pada ETAP 12.6.0

d. Data untuk relai proteksi

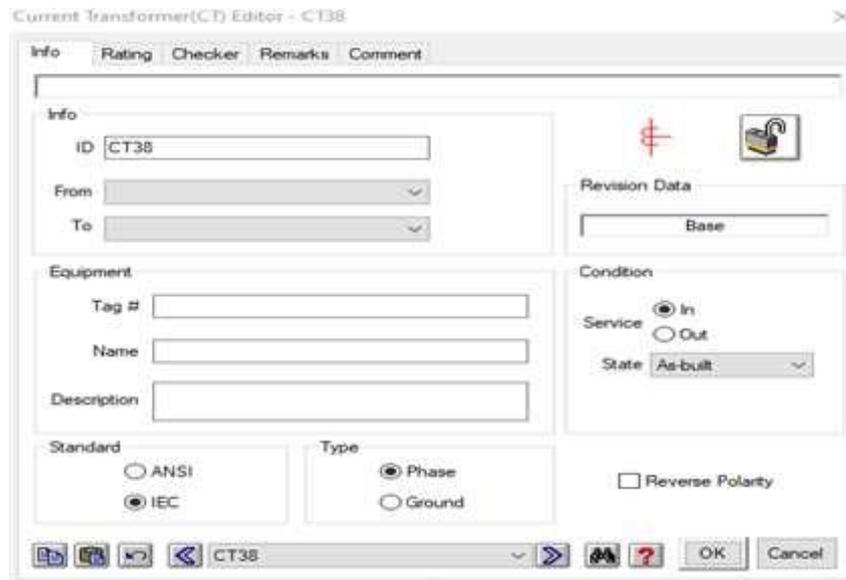
- *Double klik* pada simbol relai proteksi pada lembar kerja.
- Pada bagian info masukkan ID dan pilih kondisi.
- Pada bagian output masukkan ID PMT dan zona *tripnya*.
- Pada bagian OCR masukkan data relai nilai pickup dan time dial serta pilih karakteristik waktunya.



Gambar 2.32 Pengaturan relai proteksi pada ETAP 12.6.0

e. Data untuk CT

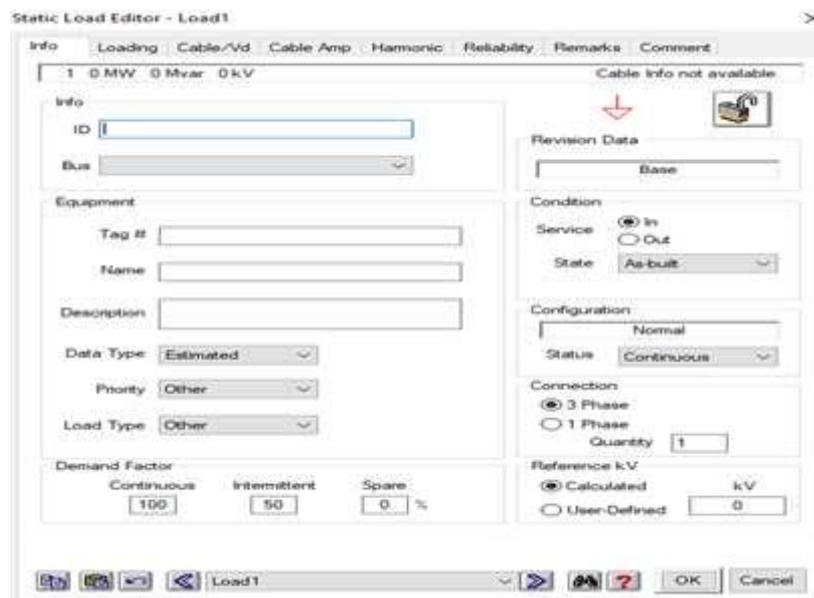
- *Double klik* pada simbol CT pada lembar kerja.
- Pada bagian info masukkan ID dan pilih standar dan kondisi.
- Pada bagian *rating* masukkan rasio primer dan sekunder lalu *klik ok*.



Gambar 2.33 Pengaturan CT pada ETAP 12.6.0

f. Data untuk beban

- *Double klik* pada simbol beban pada lembar kerja.
- Pada bagian info masukkan ID dan pilih koneksi dan kondisi.
- Pada bagian *loading* masukkan nilai *rating* lalu *klik ok*.



Gambar 2.34 Pengaturan beban pada ETAP 12.6.0



6. Pilih simbol *star-protective device coordination* untuk simulasi koordinasi relai proteksi.

2.13 Standar Pengujian Relai Proteksi

Pengujian individual relai proteksi harus mengacu pada akurasi dari pabrikan, dan dapat dilihat dari manual buku pabrikan. Standar akurasi ini terdiri dari akurasi arus *pick up*, akurasi waktu kerja dan *setting* terhadap *pick up*. Kesalahannya harus lebih kecil atau sama dengan akurasi yang dinyatakan dibuku manual pabrikan.

Kesalahan (error) dinyatakan dari persamaan berikut:

$$Error = \frac{(Setting-Pickup)}{Setting} \times 100 \dots\dots\dots(2.8)$$

Drop off to pick up ratio merupakan salah satu parameter akurasi relai yang menyatakan seberapa jauh rele akan reset setelah mengalami pick up pada kisaran nilai setting disajikan pada persamaan berikut:

$$Deviasi = \frac{Reset}{Pickup} \times 100 \dots\dots\dots(2.9)$$

Dibawah ini beberapa akurasi untuk beberapa jenis relai proteksi.

Elektromekanik : arus $\pm 10\%$, waktu kerja $\pm 5\%$, do/pu 95% - 98%

Elektrostatik : arus $\pm 5\%$, waktu kerja $\pm 5\%$, do/pu 95% - 98%

Numerik atau digital : arus $\pm 5\%$, waktu kerja $\pm 5\%$, do/pu 95% - 98%

Untuk kerja waktu *instantaneous*:

Level tegangan 500 kV dan 275 kV : maks 20 ms

Level tegangan 150 kV : maks 30 ms

Level tegangan 70 kV : maks 35 ms

Level tegangan 20 kV : maks 40 ms

Pengujian fungsi sistem proteksi hingga PMT dilakukan untuk memastikan bahwa sistem proteksi berfungsi dengan benar mulai dari peralatan primer hingga PMT dilakukan melalui injeksi primer, dan memastikan gangguan yang terjadi akan menghasilkan *alarm* dan *annunciator* yang benar ke panel kontrol.^[42]

^[42]Tim Penyusun SKDIR 0520.2014.*Buku Pedoman Pemeliharaan Proteksi Dan Kontrol Transformator*.Jakarta Selatan.hal.31-32