

PENGESAHAN

ANALISA GANGGUAN HUBUNG SINGKAT TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DI PT. PLN (PERSERO) P3B SUMATERA UPT PEMATANG SIANTAR

TUGAS AKHIR

Oleh :

WIKMAN RIKY PARNINGOTAN SIBURIAN
NPM : 17330007

Lulus Sidang Tugas Akhir Tanggal : 21 September 2024
Periode Semester Genap T.A 2023/2024

Disahkan dan disetujui oleh :

Pembimbing I



Dr. Ir. Timbang Pangaribuan, MT
NIDN : 0121026402

Pembimbing II



Ir. Lestina Siagian, M.Si
NIDN : 0120125901

Diketahui oleh :

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Ir. Lestina Siagian, M.Si
NIDN : 0120125901

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ir. Timbang Pangaribuan, M.T
NIDN : 0121026402

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Energi listrik memiliki peran yang sangat esensial dalam kehidupan manusia dan dibutuhkan untuk berbagai keperluan, seperti rumah tangga, industri, bisnis, serta keperluan umum. Saat ini, hampir semua kegiatan manusia bergantung pada energi listrik. Permintaan akan energi listrik terus meningkat setiap tahunnya. Seiring dengan pertumbuhan suatu masyarakat modern, kebutuhan energi listrik biasanya akan bertambah seiring dengan peningkatan aktivitas ekonomi dan penambahan jumlah penduduk di wilayah tersebut (Muliawandana, et al., 2019)

Untuk memenuhi kebutuhan listrik di semua sektor, diperlukan sistem tenaga listrik yang andal sehingga pasokan listrik dapat terjaga dan distribusinya merata ke seluruh wilayah yang memerlukannya (Samangun, et al., 2017).

PT PLN (Perusahaan Listrik Negara) adalah perusahaan penyedia tenaga listrik yang didirikan oleh pemerintah dan diberikan wewenang serta tanggung jawab untuk mengelola dan mendistribusikan tenaga listrik melalui kuasa usaha, karena energi listrik merupakan kebutuhan yang sangat penting dalam kehidupan manusia. PLN merupakan perusahaan di Indonesia yang bertugas untuk menjalankan tanggung jawab ini, mulai dari pembangkitan, transmisi, hingga distribusi listrik. Sistem distribusi tenaga listrik dimulai dari pembangkit, di mana listrik disalurkan melalui gardu induk transformator Step Up, kemudian dialirkan melalui saluran transmisi bertegangan 150 kV. Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan menjadi 20 kV dengan transformator Step Down di gardu induk distribusi. Selanjutnya, tegangan diturunkan lagi dari 20 kV menjadi tegangan rendah 220/380V hingga sampai ke konsumen (Khair, et al., 2021).

Daya listrik, atau Electrical Power, adalah jumlah energi yang dihasilkan atau diserap dalam sebuah rangkaian listrik. Sumber energi, seperti tegangan listrik, menghasilkan daya listrik, sementara beban yang terhubung dengannya menyerap daya tersebut. Dengan kata lain, daya listrik merupakan tingkat konsumsi energi dalam sebuah rangkaian. Sumber tegangan menghasilkan energi listrik, dan beban yang terhubung menyerapnya. Secara sederhana, daya listrik adalah besarnya energi yang dikonsumsi dalam suatu rangkaian listrik (Ardiansyah & Wahyono, 2022).

Salah satu elemen utama pada gardu listrik adalah transformator. Transformator berperan dalam Gardu Induk (GI) untuk mengubah atau menurunkan tegangan yang dialirkan melalui saluran transmisi, dari tegangan ekstra tinggi atau tegangan tinggi menjadi tegangan menengah atau tegangan distribusi yang kemudian disalurkan kepada konsumen. Transformator beroperasi selama 24 jam tanpa henti, yang seringkali menyebabkan transformator mengalami beban puncak pada waktu-waktu tertentu yang tidak dapat diprediksi. Beban puncak ini terjadi karena ketidaksinkronan penggunaan beban oleh konsumen, yang pada akhirnya menyebabkan aliran arus netral pada transformator (Kurniawan, et al., 2017).

Transformator memiliki peran yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Namun, selama operasinya, transformator sering mengalami gangguan baik internal maupun eksternal. Gangguan ini dapat menyebabkan tegangan dan arus gangguan yang tinggi, di mana besarnya arus gangguan hubung singkat dapat menyebabkan kebocoran pada isolasi gulungan transformator dan menghasilkan panas berlebih. Akibatnya, operasi sistem tenaga listrik secara keseluruhan dapat terganggu atau bahkan menyebabkan pemadaman listrik (Arjana, 2016).

Oleh karena itu, peneliti tertarik untuk mengkaji gangguan pada transformator distribusi di PT PLN (Persero) P3B UPT Pematang Siantar. Setelah mengidentifikasi berbagai gangguan pada transformator distribusi, akan dilakukan analisis mendalam terkait gangguan tersebut di PT PLN (Persero) P3B UPT Pematang Siantar. Hal ini bertujuan untuk menemukan gangguan yang paling merugikan serta mengidentifikasi akar penyebabnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa besar arus hubung singkat yang terjadi di Gardu Distribusi Pada Jaringan Tegangan Menengah (JTM) di PT PLN (Persero) P3B UPT Pematang Siantar.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengidentifikasi besarnya arus hubung singkat yang terjadi di Gardu Distribusi pada Jaringan Tegangan Menengah (JTM) di PT PLN (Persero) P3B UPT Pematang Siantar.
2. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan ketahanan transformator melalui pengembangan sistem proteksi yang prediktif. Sistem proteksi diharapkan mampu mendeteksi dini potensi gangguan dan melaksanakan tindakan pencegahan secara proaktif.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Untuk menganalisis permasalahan gangguan pada transformator distribusi di PT PLN (Persero) P3B UPT Pematang Siantar.
2. Diharapkan penelitian ini dapat membantu dalam mengidentifikasi atau menganalisis faktor-faktor yang menyebabkan gangguan pada transformator distribusi.
3. Dengan adanya penelitian yang berkelanjutan mengenai transformator distribusi, diharapkan kinerja, efisiensi, keandalan, dan keselamatan dapat terus ditingkatkan.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diterapkan dalam penelitian ini adalah:

1. Studi kasus ini hanya berfokus pada Gardu Distribusi di PT PLN (Persero) P3B UPT Pematang Siantar.
2. Data mengenai gangguan hubung singkat yang diambil hanya mencakup bagian transformator distribusi dari PT PLN (Persero) P3B UPT Pematang Siantar.

1.6 Metodologi Penelitian

1. Identifikasi tujuan penelitian: Menetapkan dengan jelas tujuan penelitian untuk menentukan jenis gangguan yang terjadi pada transformator distribusi di PT PLN (Persero) P3B UPT Pematang Siantar.
2. Tinjauan pustaka: Melakukan tinjauan literatur mengenai gangguan yang terjadi pada transformator distribusi.
3. Pengumpulan data: Menentukan jenis data yang diperlukan untuk penelitian.
4. Analisis data: Menganalisis data yang telah dikumpulkan, lalu memilih metode statistik untuk menganalisis data gangguan atau menggunakan teknik pemodelan matematis untuk memprediksi dampak gangguan pada transformator distribusi.
5. Evaluasi: Menyimpulkan hasil dari penelitian.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I: PENDAHULUAN

Bab ini mencakup semua aspek yang diuraikan dalam tugas akhir ini, termasuk latar belakang masalah, tujuan penulisan, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan metode penelitian.

BAB II: LANDASAN TEORI

Bab ini menjelaskan teori-teori mengenai transformator, bagian-bagian umum dari transformator, prinsip kerja transformator, jenis-jenis gangguan pada transformator distribusi, serta sistem proteksi yang ada pada transformator distribusi.

BAB III: METODE PENELITIAN

Bab ini menguraikan langkah-langkah penelitian dan teknik pengumpulan data yang dilakukan oleh penulis.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas analisis gangguan pada transformator dan menyajikan hasil dari penelitian.

BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dan saran terkait gangguan yang terjadi pada transformator di PT PLN (Persero) P3B UPT Pematang Siantar.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari empat komponen: pembangkit tenaga listrik, transmisi, saluran distribusi, dan pelanggan. Pada tahap pertama, yaitu pembangkit tenaga listrik, tegangan yang dihasilkan adalah tegangan menengah (TM). Selanjutnya, pada tahap kedua, tegangan ini ditingkatkan menjadi tegangan tinggi (TT) atau ekstra tinggi (TET), yang kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi menuju saluran distribusi hingga sampai ke pelanggan. Tegangan rendah biasanya digunakan untuk kebutuhan listrik rumah tangga, sementara tegangan menengah digunakan oleh industri atau pabrik.

2.2 Proses Penyaluran Tenaga Listrik

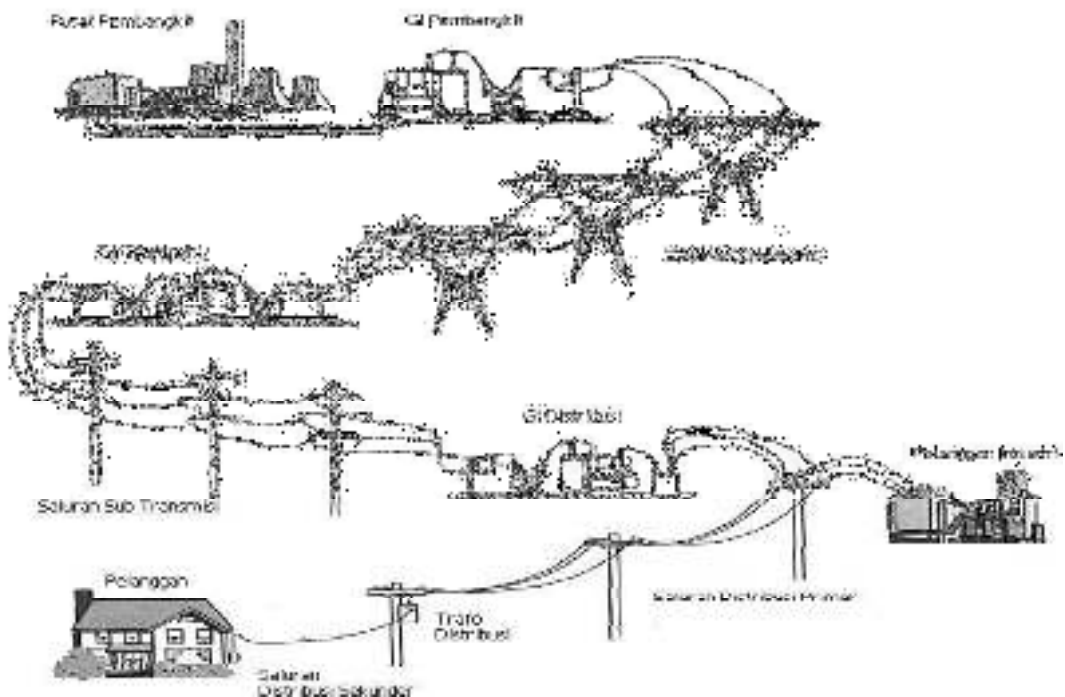
Dalam sistem tenaga listrik, penyediaan kebutuhan energi listrik terdiri dari tiga komponen utama, yaitu:

1. Pembangkit
2. Sistem transmisi
3. Sistem distribusi

Pusat-pusat listrik seperti Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Diesel (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Gas dan Uap (PLTGU), serta Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) menghasilkan listrik. Tegangan yang dihasilkan awalnya adalah tegangan menengah, yang kemudian ditingkatkan oleh trafo penaik tegangan, atau dikenal sebagai transformator step-up. Setelah itu, tegangan tersebut dialirkan melalui saluran transmisi. Umumnya, PLN menggunakan tegangan 66 kV, 150 kV, dan 500 kV. Sebelum memasuki saluran distribusi, tegangan tinggi atau ekstra tinggi dari saluran transmisi diturunkan kembali ke tegangan menengah di gardu induk menggunakan trafo penurun tegangan, yang juga

disebut transformator step-down. PLN biasanya mengoperasikan tegangan menengah sebesar 20 kV, 12 kV, dan 6 kV setelah menerima listrik.

Setelah tenaga listrik disalurkan melalui jaringan distribusi primer, tegangannya diturunkan di gardu distribusi menjadi tegangan rendah sebesar 380/220 volt, kemudian dialirkan melalui jaringan tegangan rendah ke rumah-rumah pelanggan (konsumen). Jaringan ini dikenal sebagai Jaringan Distribusi Sekunder. Proses penyaluran tenaga listrik dari pembangkit hingga sampai ke pelanggan dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Proses penyaluran tenaga listrik sampai pelanggan

Gambar 2.1 menunjukkan bahwa sistem distribusi terdiri dari dua bagian: distribusi primer (tegangan menengah) dan distribusi sekunder (tegangan rendah). Distribusi dapat dilakukan melalui saluran udara atau bawah tanah. Sebagian besar saluran distribusi PLN menggunakan kabel udara karena lebih ekonomis

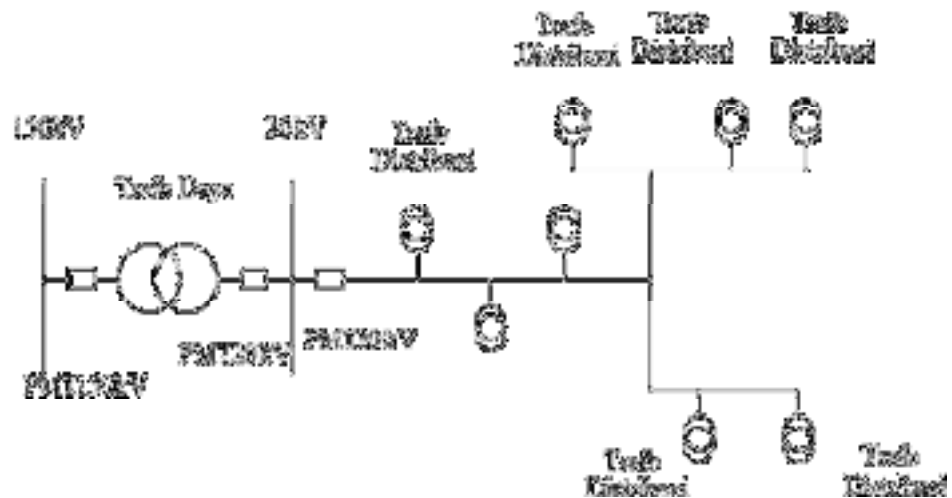
dibandingkan kabel bawah tanah, meskipun kabel udara lebih rentan terhadap gangguan, seperti sambaran petir.

2.3 Bentuk Jaringan Distribusi Primer Dan Sekunder

Terdapat lima model jaringan yang ditemukan dalam sistem distribusi tegangan menengah (Primer, 20 kV), yaitu: jaringan Radial, jaringan hantaran penghubung (*Tie Line*), jaringan lingkaran (*Loop*), jaringan *Spindle*, dan sistem *Gugus* atau *Kluster*.

1. Jaringan *Radial*

Sistem distribusi ini merupakan yang paling sederhana dan ekonomis, terdiri dari beberapa penyulang yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 di bawah.



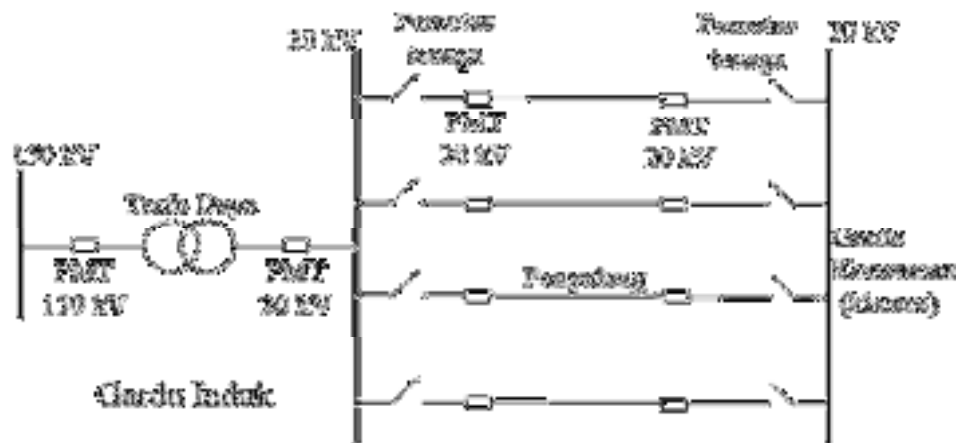
Gambar 2.2 Jaringan distribusi *Radial*

Konsumen dapat mengakses gardu distribusi melalui penyulang ini. Gardu distribusi dilengkapi dengan trafo untuk konsumen, yang dapat dipasang di atas tiang atau di dalam bangunan beton. Sistem ini memiliki

keuntungan karena kesederhanaannya dan biaya yang lebih rendah dibandingkan sistem lainnya. Namun, keandalan sistem ini tidak setinggi sistem lainnya. Ketidakandalan ini disebabkan oleh fakta bahwa gardu distribusi hanya mendapatkan pasokan dari satu jalur utama, sehingga seluruh gardu akan mengalami pemadaman jika jalur utama tersebut mengalami gangguan.

2. Jaringan hantaran Penghubung (*Tie Line*)

Pelanggan penting yang tidak boleh mengalami pemadaman, seperti bandara, rumah sakit, dan lainnya, menggunakan sistem distribusi Tie Line, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 di bawah ini.

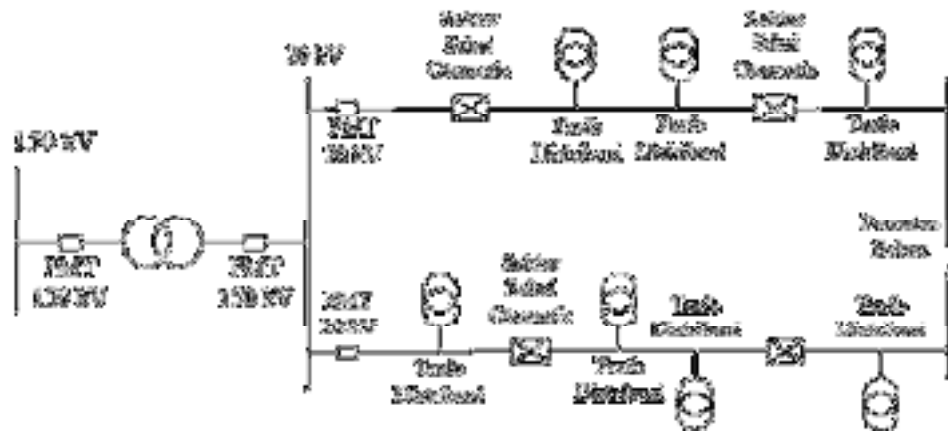


Gambar 2.3 Jaringan hantaran penghubung (*Tie Line*)

Sistem ini dilengkapi dengan dua penyulang bersamaan dengan *Automatic Change Over Switch* atau *Automatic Transfer Switch*. Setiap penyulang terhubung ke gardu pelanggan tertentu, dan jika salah satu penyulang mengalami gangguan, pasokan listrik akan dialihkan ke penyulang lainnya, sehingga pelanggan tidak mengalami pemadaman listrik yang berkepanjangan atau bahkan pemadaman sama sekali.

3. Jaringan lingkaran (*Loop*)

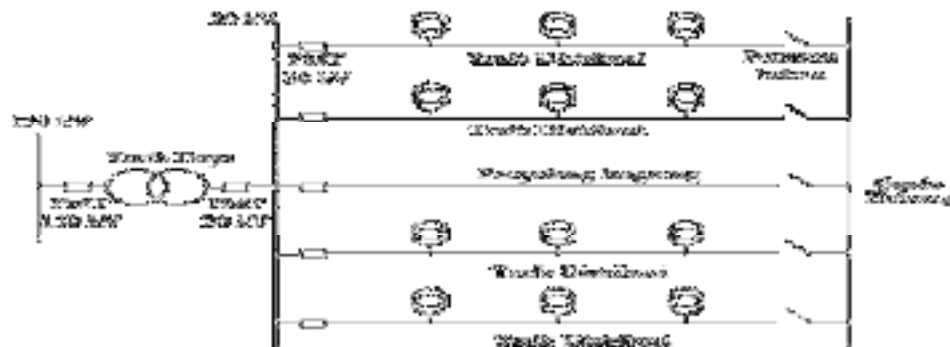
Tingkat keandalan Jaringan Tegangan Menengah dengan Struktur Lingkaran (Loop) relatif lebih baik, karena dapat disuplai dari beberapa gardu induk, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Jaringan distribusi lingkaran (*Loop*)

4. Jaringan *Spindel*

Sistem *Spindel*, yang ditunjukkan pada Gambar 2.5, merupakan kombinasi dari pola jaringan *Radial* dan *Ring*. *Spindel* terdiri dari beberapa penyulang atau feeder yang menerima tegangan dari Gardu Induk dan berakhir di Gardu Hubung (GH).

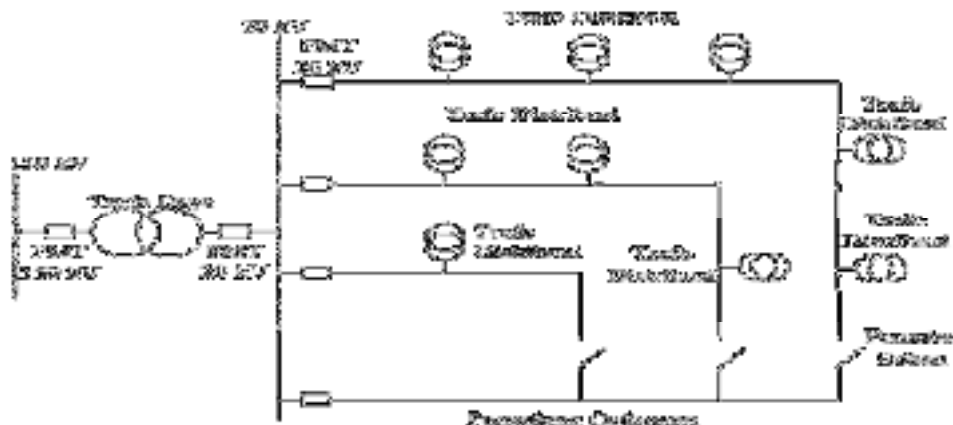


Gambar 2.5 Jaringan distribusi *Spindel*

Jaringan tegangan menengah (JTM) yang menggunakan kabel tanah atau saluran kabel tanah tegangan menengah (SKTM) biasanya mengadopsi pola spindel, yang terdiri dari beberapa penyulang aktif dan satu penyulang cadangan (express) yang dihubungkan melalui gardu hubung. Namun, dalam operasionalnya, sistem Spindel berfungsi sebagai sistem Radial. Dalam setiap penyulang aktif terdapat gardu distribusi yang bertugas mendistribusikan tegangan kepada konsumen, baik yang menggunakan tegangan rendah (TR) maupun tegangan menengah (TM).

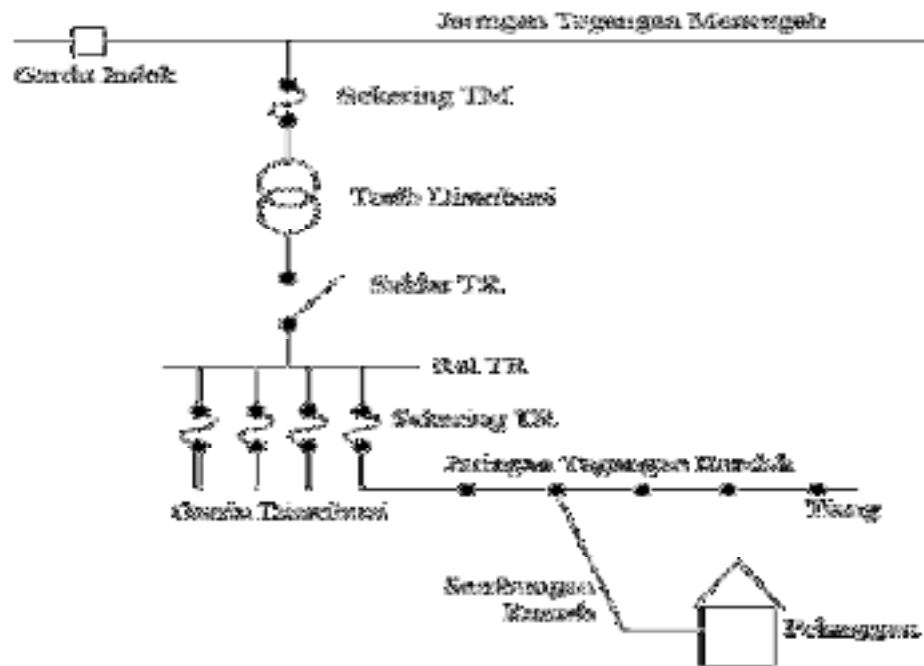
5. Jaringan Sistem gugus atau Kluster

Kota besar dengan kerapatan beban yang tinggi biasanya menggunakan konfigurasi gugus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Sistem ini dilengkapi dengan penyulang cadangan dan saklar pemutus beban.



Gambar 2.6 Jaringan distribusi *Kluster*

Berikut adalah cara kerja penyulang ini: jika salah satu penyulang yang melayani konsumen mengalami gangguan, penyulang cadangan akan mengambil alih fungsinya. Gambar 2.7 di bawah ini menunjukkan sistem distribusi sekunder, yang mencakup gardu trafo hingga konsumen atau pengguna akhir.



Gambar 2.7 Skema sistem distribusi sekunder

Sistem distribusi, yang terletak di lokasi yang dekat dengan konsumen, berfungsi untuk menerima daya dari trafo distribusi (sebagai sumber daya) dan juga untuk mengirimkan serta mendistribusikan daya ke konsumen. Oleh

karena itu, kualitas listrik dalam sistem ini sangat penting.

2.4 Macam-Macam Saluran

Sistem kelistrikan umumnya memiliki dua jenis saluran: saluran udara dan saluran bawah tanah. Pemilihan jenis saluran tersebut tergantung pada berbagai faktor, seperti pentingnya tingkat kontinuitas pelayanan, biaya, atau penampilan.

2.4.1 Saluran Udara

Saluran udara dirancang untuk daerah dengan kepadatan beban rendah atau sangat rendah, seperti pinggiran kota, desa, atau kota kecil, serta tempat-tempat terpencil dengan densitas rendah. Pemasangan saluran udara dilakukan dengan merentangkan fase satu ke fase lainnya di antara tiang-tiang, sehingga beban dapat ditransmisikan dari gardu induk hingga ke titik akhir. Dari sudut pandang ekonomi, saluran udara sering digunakan untuk melayani daerah yang sedang berkembang sebagai langkah awal. Sebagai contoh, kota-kota besar dengan mayoritas perumahan juga menggunakan saluran udara. Kawat penghantar saluran udara dapat terbuat dari tembaga atau aluminium. Meskipun tembaga memiliki daya hantar arus yang lebih tinggi secara teknis, kawat aluminium lebih populer karena harganya yang lebih terjangkau.

Saluran udara memiliki beberapa keuntungan, antara lain:

1. Biaya atau investasi yang dibutuhkan untuk membangun saluran udara jauh lebih rendah dibandingkan saluran bawah tanah.
2. Saluran udara lebih mudah diterapkan di daerah dengan tanah berbatu.
3. Jarak antar fase dapat diperpanjang untuk penggunaan tegangan ekstra tinggi.
4. Proses pemeliharaan dan identifikasi lokasi gangguan jauh lebih mudah.

Namun, saluran udara juga memiliki beberapa kerugian, yaitu:

1. Frekuensi gangguan yang lebih tinggi dan rentan terhadap kondisi cuaca dan lingkungan.

2. Medan elektromagnetik yang dipancarkan, terutama pada tegangan tinggi, sering dianggap berbahaya bagi keselamatan manusia.

2.4.2 Saluran Bawah Tanah

Sistem penyaluran listrik dengan saluran bawah tanah dilakukan dengan menanam atau menempatkan kabel di bawah tanah. Kabel saluran bawah tanah biasanya terbuat dari tembaga atau aluminium, sementara isolasi umumnya menggunakan kertas dan dilindungi secara mekanis dengan timah hitam. Untuk tegangan menengah, minyak juga bisa digunakan sebagai bahan isolasi. Dua jenis kabel saluran bawah tanah yang paling umum adalah GPLK (Gewapend Papier Lood Kabel) dan NKBA (Normalkabel mit Bleimantel Ausenumheullung), yang keduanya menggunakan bahan isolasi XLPE (Cross-Linked Polyethylene).

Di kawasan yang padat dengan beban tinggi, seperti kota-kota besar, biasanya menggunakan jaringan bawah tanah. Kabel bawah tanah juga dipilih untuk wilayah yang ingin menjaga estetika. Kabel ini dapat ditanam langsung atau diletakkan dalam pipa pelindung.

Saluran bawah tanah memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan, yaitu:

1. Saluran kabel bawah tanah tidak terlihat, sehingga tidak mengganggu pemandangan.
2. Kelebihan lainnya adalah saluran bawah tanah tidak terpengaruh oleh hujan, petir, dan angin. Namun, harga instalasi awalnya jauh lebih tinggi dibandingkan dengan saluran udara, dan meskipun pemeliharaan serta proses identifikasi gangguan lebih mudah, biayanya tetap menjadi pertimbangan.

2.5 Gangguan Pada Sitem Distribusi Tenaga Listrik

Sering kali, gangguan terjadi dalam operasi sistem tenaga listrik, yang dapat mengganggu penyaluran tenaga listrik kepada konsumen. Gangguan adalah kondisi di mana sistem penyaluran tenaga listrik tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Menurut definisi ANSI/IEEE Standard 100-1992, gangguan adalah suatu keadaan

fisik yang disebabkan oleh kegagalan perangkat, komponen, atau elemen untuk menjalankan fungsinya dengan benar. Hubungan abnormal (termasuk busur api) yang secara kebetulan atau disengaja terjadi pada impedansi relatif rendah antara dua titik dengan potensi berbeda disebut hubungan singkat.

2.5.1 Jenis Gangguan

Sistem distribusi saluran 20 kV umumnya mengalami dua jenis gangguan: gangguan internal dan gangguan eksternal. Gangguan internal dapat disebabkan oleh kegagalan atau kerusakan peralatan jaringan dan pemutus beban. Sementara itu, gangguan eksternal dapat disebabkan oleh jatuhnya pohon atau ranting pada penghantar, sambaran petir, serta interaksi manusia atau hewan. Ada dua kategori gangguan yang dapat terjadi pada jaringan distribusi:

a. Berdasarkan durasi gangguan:

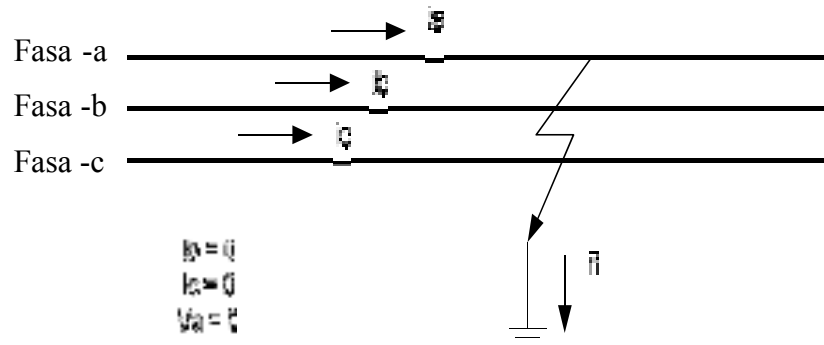
Gangguan permanen (stasioner) Ini adalah gangguan yang diakibatkan oleh kerusakan peralatan. Jika pemutus tenaga dibuka, gangguan tersebut tidak akan hilang dan tetap ada. Tindakan perbaikan pada sumber gangguan diperlukan untuk menghilangkan gangguan permanen.

Gangguan sementara Ini adalah gangguan yang bersifat sementara dan dapat kembali normal, baik secara otomatis maupun manual, dengan menutup kembali peralatan yang terhubung. Namun, jika gangguan sementara terjadi terlalu sering, hal ini dapat merusak peralatan dan berpotensi menyebabkan gangguan permanen.

b. Berdasarkan jenis gangguan:

Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah Gangguan asimetris ini sering terjadi pada sistem tenaga listrik dan memerlukan metode komponen simetris untuk menganalisis tegangan dan arus saat gangguan. Dengan menghubungkan-singkat semua sumber tegangan dalam sistem dan mengganti titik gangguan (node) dengan sumber tegangan yang sama besarnya dengan tegangan sesaat sebelum gangguan, analisis dapat dilakukan. Metode ini memungkinkan representasi sistem tiga fase yang tidak

seimbang menggunakan teori komponen simetris, yang mencakup elemen urutan positif, negatif, dan nol.



Gambar 2.8 Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

Keterangan :

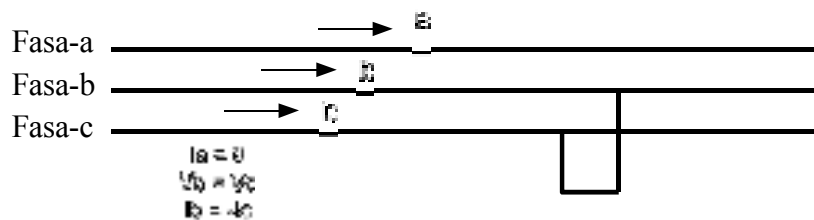
V_f = Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadinya gangguan

Z_0 = Impedansi urutan nol dilihat dari titik gangguan

Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan

Z_2 = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan

1. Gangguan hubung singkat dua fasa



Gambar 2.9 Gangguan hubung singkat dua fasa

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2}$$

Keterangan :

V_f = Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadinya gangguan

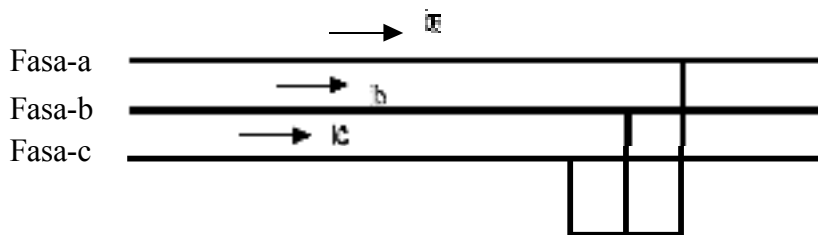
Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan

Z_2 = Impedansi urutan negatif dilihat dari titik gangguan

Karena tidak ada gangguan yang terhubung ke tanah, arus saluran tidak memiliki komponen urutan nol pada gangguan hubung singkat fase ke fase.

2. Gangguan hubung singkat tiga fase

Dalam kategori gangguan simetris, gangguan hubung singkat tiga fase terjadi ketika arus dan tegangan di setiap fase tetap seimbang setelah terjadinya gangguan. Oleh karena itu, sistem seperti ini hanya dapat dianalisis menggunakan komponen urutan positif:



Gambar 2.10 Gangguan hubung singkat tiga fase

Dalam kategori gangguan simetris, gangguan hubung singkat tiga fase terjadi ketika arus dan tegangan di setiap fase tetap seimbang setelah terjadinya gangguan. Oleh karena itu, sistem seperti ini hanya dapat dianalisis menggunakan komponen urutan positif:

$$I_A = I_{A1}$$

dan

$$I_A = \frac{V_f}{Z_1}$$

Keterangan:

V_f = Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadinya gangguan

Z_1 = Impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan

2.5.2 Penyebab Gangguan Pada Sistem Jaringan Distribusi

Kegagalan isolasi yang terjadi antara konduktor dan kawat penghantar lainnya, antara konduktor dan kawat penghantar fase, atau antara konduktor fase dan tanah dapat menyebabkan putusnya kawat tanah. Gangguan pada jaringan distribusi bisa disebabkan oleh berbagai faktor, seperti tegangan berlebih, kesalahan mekanis, material yang rusak atau cacat, konduktor yang terputus, kesalahan manusia, serta gangguan hubung singkat.

2.5.3 Akibat Gangguan Pada Sistem Jaringan Distribusi

Salah satu dampak paling serius dari gangguan adalah kebakaran, yang dapat mengakibatkan kerusakan signifikan pada peralatan dan bahkan menyebar ke seluruh sistem, berpotensi menyebabkan kegagalan total. Berikut adalah beberapa dampak yang ditimbulkan oleh gangguan pada sistem jaringan distribusi:

1. Pemanasan yang disebabkan oleh arus hubung singkat yang tinggi. Ketika peralatan mengalami overheating, ada kemungkinan terjadi kebakaran atau ledakan. Penurunan tegangan yang terlalu rendah dapat mengakibatkan kegagalan operasi peralatan sistem tenaga listrik, memperpendek umur peralatan, dan menyebabkan aliran daya terhambat, yang merugikan pelanggan.
2. Gangguan stabilitas sistem yang dapat menyebabkan pemadaman total pada sistem tenaga listrik, mengakibatkan penurunan keandalan sistem distribusi.

2.6 Dasar Sistem Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Dalam beberapa situasi, sistem listrik mungkin tidak berfungsi dengan baik. Kondisi abnormal seperti gangguan atau hubung singkat dapat membahayakan sistem secara keseluruhan, sehingga penting untuk memiliki sistem perlindungan yang dapat meminimalkan dampak dari kondisi tersebut. Sistem proteksi bertujuan untuk mendeteksi gangguan dan memisahkan bagian jaringan yang terpengaruh dari bagian

lain yang masih berfungsi dengan baik. Ini juga melindungi bagian yang normal dari kerusakan atau kerugian lebih lanjut. Pembangkit, transmisi, dan jaringan distribusi dapat mengalami kerusakan dalam sistem tenaga listrik. Sistem pertahanan harus mampu mengidentifikasi dan memisahkan komponen yang terganggu segera setelah terjadinya gangguan.

Sebagai bagian krusial dari sistem perlindungan tenaga listrik, rele proteksi harus memenuhi beberapa persyaratan keandalan untuk dapat menjalankan fungsinya, yaitu mendeteksi gangguan:

1. Sensitivitas

Kemampuan sistem proteksi untuk mendeteksi adanya ketidaksesuaian atau gangguan yang terjadi dalam area yang diproteksi.

2. Selektivitas

Koordinasi sistem proteksi, di mana saat terjadi gangguan, rele hanya akan membuka pemutus tenaga yang diperlukan, tanpa menyebabkan pemadaman pada jaringan yang lebih luas.

3. Keamanan

Kemampuan sistem proteksi untuk memastikan bahwa peralatan proteksi akan berfungsi ketika terjadi gangguan dan tidak akan aktif saat tidak ada gangguan.

4. Kecepatan

Komponen proteksi harus mampu memberikan respons yang tepat waktu saat terjadi gangguan, sesuai dengan koordinasi yang diharapkan.

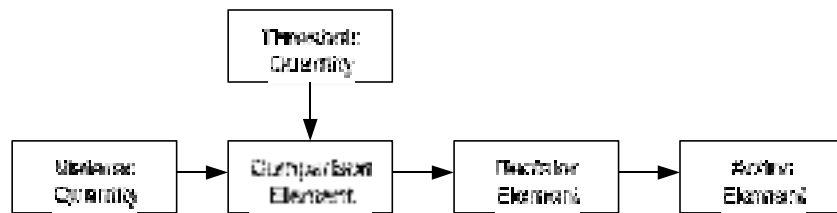
Sistem perlindungan tidak dapat berfungsi untuk mengisolasi komponen yang terganggu kecuali dua syarat dasar terpenuhi:

1. Sistem tenaga listrik harus memiliki jumlah pemutus tenaga yang cukup untuk melakukan isolasi.
2. Setiap pemutus tenaga harus dilengkapi dengan alat kontrol yang dapat mengidentifikasi kondisi abnormal dan membuka pemutus tenaga yang diperlukan untuk mengisolasi kondisi tersebut.

Sistem tenaga listrik yang terdiri dari banyak pemutus tenaga harus dirancang sedemikian rupa sehingga rele hanya dapat membuka pemutus tenaga yang diperlukan saat terjadi kondisi abnormal. Prinsip pemutusan kesalahan selektif melibatkan pemberian informasi kepada rele proteksi agar dapat membedakan antara kondisi abnormal dalam zona perlindungannya (di mana pemutusan harus terjadi) dan gangguan eksternal atau arus beban normal (di mana pemutusan tidak boleh terjadi). Informasi ini diperoleh dari sistem tenaga listrik, seperti arus, tegangan, dan sudut fase antara keduanya yang diukur saat terjadinya gangguan.

2.7 Komponen Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Sistem proteksi tenaga listrik umumnya terdiri dari beberapa komponen yang dirancang untuk mendeteksi kondisi dalam sistem tenaga listrik dan beroperasi berdasarkan data yang diperoleh, seperti arus, tegangan, atau sudut fase antara keduanya. Nilai-nilai tersebut akan dibandingkan dengan nilai ambang batas (*threshold setting*) pada perangkat proteksi menggunakan data dari sistem listrik. Peralatan proteksi biasanya terdiri dari beberapa elemen yang bertugas untuk memantau kondisi sistem dan mengambil tindakan berdasarkan pengamatan tersebut (gambar 2.11). Jika nilai yang diukur dari sistem melebihi ambang batas yang telah ditentukan pada peralatan proteksi, maka sistem proteksi akan aktif untuk mengamankan kondisi tersebut.



Gambar 2.11 Elemen proteksi sistem tenaga listrik

Waktu pemutusan gangguan, yang juga disebut sebagai *fault clearing time*, merujuk pada durasi yang diperlukan oleh perangkat proteksi untuk membuka pemutus tenaga setelah terjadinya gangguan.

$$T_c = T_p + T_d + T_a$$

Keterangan :

$T_c =$ clearing time

$T_p =$ comparison time

$T_d =$ decision time

$T_a =$ action time, including circuit breaker operating time

Waktu pemutusan gangguan merupakan elemen krusial dalam skema proteksi. Dalam prinsip selektivitas, hanya perangkat yang terdekat dengan gangguan yang akan aktif, dan terdapat koordinasi waktu antara perangkat-perangkat proteksi tersebut.

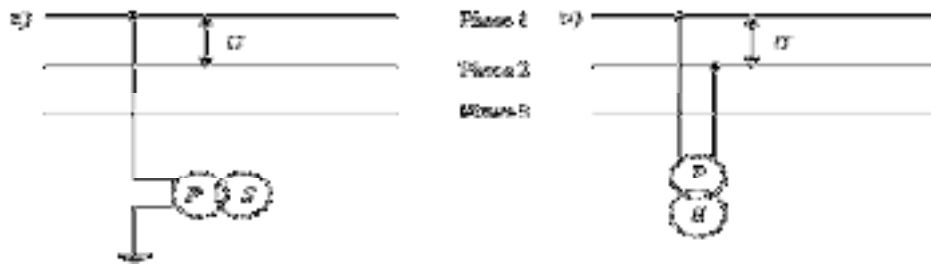
2.7.1 Potensial Transformator

Untuk melindungi sistem tenaga listrik, terutama relai, digunakan trafo untuk mengukur parameter sistem (arus atau tegangan) dan mengubahnya menjadi level yang lebih rendah agar dapat digunakan sebagai input untuk relai. Trafo instrumen terdiri dari trafo tegangan (potential transformer) dan trafo arus (current transformer). Trafo tegangan yang digunakan dalam peralatan proteksi berfungsi dengan prinsip yang sama seperti trafo daya yang umum digunakan dalam sistem tenaga listrik. Namun, perbedaan utamanya terletak pada rating daya yang jauh lebih kecil pada potential transformer; sisi primer beroperasi pada tegangan tinggi, sedangkan sisi sekunder menghasilkan tegangan rendah, biasanya antara 100 hingga 120 Volt per milimeter. Trafo ini berfungsi untuk memberikan input pengukuran tegangan sistem atau sampel kepada peralatan perlindungan. Trafo tegangan yang digunakan harus memiliki tingkat akurasi yang tinggi agar hasil pengukuran tidak menyimpang dari tegangan sistem yang sebenarnya.

Fungsi utama dari potential transformer adalah:

1. Mengurangi tegangan sistem tenaga listrik menjadi tegangan yang sesuai untuk sistem pengukuran atau perlindungan.

2. Memisahkan rangkaian sekunder dari rangkaian primer.



Gambar 2.12 Rangkaian trafo tegangan ke sistem tenaga listrik

2.7.2 Current Transformer

Trafo arus, atau current transformer, biasanya digunakan untuk mendapatkan nilai arus yang proporsional dengan arus dalam sistem, yang kemudian dapat digunakan dalam peralatan kontrol, relai proteksi, dan instrumen lainnya. Current transformer berfungsi untuk mengambil sampel arus sistem dan menurunkannya ke level yang lebih rendah agar dapat digunakan dalam pengukuran dan kontrol perlindungan.

Beberapa fungsi dari Trafo Arus adalah sebagai berikut:

1. Mengurangi nilai arus listrik (dalam ampere) dalam sistem tenaga listrik untuk keperluan pengukuran dan perlindungan.
2. Memisahkan rangkaian sekunder dari rangkaian primer, sehingga melindungi sistem tegangan tinggi.

Rasio antara arus primer dan arus sekunder menentukan rating trafo arus. Rasio yang umum digunakan meliputi 600:5, 800:5, 1000:5, dan 1600:1 (dalam ampere). Rating arus 5 Ampere atau 1 Ampere biasanya digunakan sebagai standar untuk trafo arus. Beberapa relai proteksi menggunakan arus sekunder dari CT sebagai input, termasuk relai jarak, relai arus lebih, dan relai diferensial.

2.7.3 Rele Proteksi (Protection Relay)

Relay adalah komponen proteksi yang berfungsi untuk mendeteksi kondisi

abnormal dalam sistem tenaga listrik. Alat proteksi ini bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik; ketika parameter sistem mencapai ambang batas tertentu, relay akan mengaktifkan rangkaian tripping, yang menyebabkan pemutus tenaga terbuka dan mengisolasi bagian sistem yang mengalami gangguan. Relay dapat dikategorikan berdasarkan fungsi utamanya dan dibagi menjadi beberapa jenis berikut:

1. Relay Arus Lebih (*Overcurrent Relay*)

Relay ini berfungsi untuk melindungi sistem dari kondisi kelebihan arus dengan mengaktifkan pemutusan ketika nilai arus melebihi ambang batas yang telah ditetapkan.

2. Relay Diferensial (*Differential Relay*)

Perangkat ini bekerja berdasarkan prinsip perbandingan arus, dirancang untuk mendeteksi ketidakseimbangan antara arus masuk dan keluar pada zona yang dilindungi. Ketika ada perbedaan antara kedua arus tersebut, relay akan mengaktifkan tindakan pengamanan.

3. Relay Arah (*Directional Relay*)

Komponen proteksi ini beroperasi dengan membandingkan vektor fasor arus atau tegangan. Relay ini mampu mengidentifikasi arah aliran daya yang abnormal akibat gangguan, sehingga dapat membedakan antara gangguan yang searah dengan aliran daya normal (forward fault) dan yang berlawanan arah (reverse fault).

4. Relay Jarak (*Distance Relay*)

Relay ini beroperasi dengan membandingkan impedansi yang diukur dengan nilai setting impedansi yang ditentukan. Jika impedansi yang terukur melebihi nilai setting, relay akan memberikan sinyal trip untuk memutuskan rangkaian dan mengisolasi bagian saluran transmisi yang mengalami gangguan.

5. Relay Tanah (*Ground Fault Relay*)

Relay ini khusus dirancang untuk mendeteksi gangguan fase ke tanah dalam sistem tenaga listrik. Prinsip kerjanya didasarkan pada pengukuran ketidakseimbangan arus dalam sistem tiga fasa. Jika terjadi gangguan fase ke tanah, arus residu akan mengalir ke tanah, dan relay tanah akan memberikan sinyal peringatan atau perintah pemutusan untuk melindungi sistem dari kerusakan lebih lanjut.

6. Relay Termal (*Thermal Relay*)

Relay ini berfungsi untuk melindungi motor listrik atau peralatan listrik lainnya dari kerusakan akibat kelebihan beban yang berkelanjutan, yang dapat menyebabkan suhu yang terlalu tinggi.

7. Relay Frekuensi (*Frequency Relay*)

Perangkat ini dirancang untuk memantau frekuensi sistem tenaga listrik secara kontinu. Fungsi utamanya adalah melindungi sistem dari gangguan yang disebabkan oleh deviasi frekuensi yang signifikan, baik di atas maupun di bawah nilai nominal, terutama pada generator dan sistem tenaga besar.

8. Relay *Buchholz*

Relay ini dirancang khusus untuk transformator berpendingin minyak. Prinsip kerjanya adalah mendeteksi gas yang terakumulasi dalam minyak transformator sebagai indikasi adanya gangguan internal, seperti pelepasan gas isolasi atau kejadian hubung singkat.

2.8 Gardu Induk

Gardu Induk adalah sistem kelistrikan yang kompleks, terdiri dari berbagai peralatan listrik yang disusun secara terstruktur dengan mempertimbangkan aspek teknis, efisiensi biaya, dan estetika.

Fungsi utama Gardu Induk meliputi:

1. Perubahan Tegangan: Mengubah tingkat tegangan listrik melalui transformator,

baik untuk menaikkan (step-up) maupun menurunkan (step-down) tegangan sesuai dengan kebutuhan transmisi dan distribusi.

2. Pusat Kontrol dan Pengawasan: Berfungsi sebagai pusat untuk mengontrol dan mengawasi operasi sistem tenaga listrik, termasuk pengukuran parameter sistem, perlindungan terhadap gangguan, serta pengaturan aliran daya.
3. Distribusi Daya: Mendistribusikan daya listrik ke berbagai titik dalam sistem, baik ke gardu induk lain pada tingkat tegangan tinggi maupun ke gardu distribusi pada tingkat tegangan menengah untuk disalurkan ke konsumen.

Secara keseluruhan, gardu induk berfungsi untuk menerima energi listrik melalui saluran masuk, mengubah tegangannya dengan menggunakan transformator daya, dan dilengkapi dengan peralatan pendukung seperti peralatan ukur dan penghubung untuk memastikan operasi yang aman dan efisien.

Gardu induk dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu:

2.8.1 Menurut Pemasangan Peralatan

Berdasarkan pemasangan peralatan, Gardu Induk dapat dibedakan menjadi empat jenis, yaitu:

1. Gardu Induk Pasang Luar

Gardu induk jenis ini merupakan instalasi listrik bertegangan tinggi di mana sebagian besar komponen berada di luar ruangan. Peralatan utama seperti transformator daya dan pemutus beban biasanya ditempatkan di luar gedung. Sementara itu, komponen pengendali, perlindungan, dan peralatan bantu lainnya, seperti panel kontrol, switchboard, dan baterai, berada di dalam bangunan. Konfigurasi ini memungkinkan penghematan biaya konstruksi dan pendinginan, meskipun memerlukan lahan yang lebih luas dibandingkan dengan gardu induk pasang dalam.

2. Gardu Induk Pasang Dalam

Gardu induk ini dinamakan demikian karena sebagian besar komponen

utamanya, seperti transformator daya, rangkaian switchgear, panel kontrol, dan baterai, terintegrasi di dalam satu bangunan. Konfigurasi ini dipilih untuk menjaga estetika lingkungan sekitar serta meminimalkan risiko kebakaran dan kebisingan yang sering terkait dengan gardu induk konvensional.

3. Gardu Induk Setengah Pasang Luar

Gardu induk jenis ini mengadopsi konfigurasi semi-indoor, di mana sebagian peralatan bertegangan tinggi berada di dalam bangunan, sementara sisanya ditempatkan di luar. Pendekatan ini memungkinkan penyesuaian desain yang optimal terhadap berbagai kondisi lingkungan dan keterbatasan lahan.

4. Gardu Induk Pasang Bawah Tanah

Gardu induk jenis ini merupakan instalasi di mana sebagian besar peralatannya terintegrasi dalam struktur bangunan bawah tanah. Hanya peralatan penunjang, seperti sistem pendinginan dan peralatan berukuran besar yang tidak bisa ditanam di bawah tanah, yang ditempatkan di permukaan. Lokasi gardu induk ini umumnya dipilih di kawasan perkotaan yang padat, seperti pusat perbelanjaan, kawasan bisnis, atau sepanjang jalan raya utama, dengan mempertimbangkan faktor estetika dan efisiensi penggunaan lahan.

2.8.2 Menurut Tegangan

Berdasarkan tingkat tegangannya, gardu induk dapat dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu:

1. Gardu Induk Transmisi

Gardu induk transmisi adalah fasilitas listrik yang berfungsi menerima energi listrik bertegangan tinggi dari sistem transmisi. Energi listrik tersebut kemudian ditransformasikan menjadi tegangan yang sesuai dengan kebutuhan beban, seperti untuk industri, kawasan perkotaan, atau wilayah lainnya. Dalam sistem kelistrikan PT PLN, gardu induk transmisi biasanya beroperasi pada tingkat tegangan ekstra tinggi 150 kV dan tegangan tinggi 70 kV.

2. Gardu Distribusi

Gardu distribusi adalah fasilitas listrik yang berfungsi menerima energi listrik bertegangan tinggi dari gardu induk transmisi. Energi listrik tersebut diturunkan melalui proses transformasi dengan menggunakan transformator tenaga menjadi tingkat tegangan menengah (biasanya 20 kV, 12 kV, atau 6 kV). Selanjutnya, tegangan menengah ini akan diturunkan lagi menjadi tegangan rendah (127/220 V atau 220/380 V) untuk memenuhi kebutuhan daya listrik konsumen.

2.8.3 Menurut Fungsinya

Berdasarkan fungsinya, gardu induk dapat dibedakan menjadi lima jenis, yaitu:

1. Gardu Induk Penaik Tegangan

Gardu induk penaik tegangan adalah fasilitas listrik yang dirancang untuk meningkatkan potensial listrik dari tegangan generator menjadi tegangan transmisi. Biasanya, unit ini ditempatkan di lokasi pembangkit listrik untuk mengatasi tantangan efisiensi dalam penyaluran energi listrik jarak jauh. Dengan menaikkan tegangan ke level ekstra tinggi atau tinggi, kerugian energi selama proses transmisi dapat diminimalkan.

2. Gardu Induk Penurun Tegangan

Gardu induk penurun tegangan adalah instalasi listrik yang secara khusus dirancang untuk mereduksi tingkat tegangan dari ekstra tinggi menjadi tinggi atau menengah. Gardu ini biasanya ditempatkan di pusat-pusat beban untuk memastikan efisiensi dalam distribusi tenaga listrik kepada konsumen.

3. Gardu Induk Pengatur Tegangan

Gardu induk jenis ini berfungsi untuk mengatur tegangan dan sering kali ditempatkan jauh dari sumber pembangkit. Jarak transmisi yang panjang dapat menyebabkan penurunan tegangan yang signifikan pada saluran transmisi. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan penambahan perangkat kompensasi reaktif, seperti bank kapasitor, untuk menjaga kualitas tegangan dalam sistem.

4. Gardu Induk Pengatur Beban

Gardu induk ini berfungsi sebagai pusat pengaturan beban dinamis. Terintegrasi dengan sistem motor-generator, gardu ini memungkinkan konversi energi dua arah. Motor listrik yang terpasang dapat berfungsi baik sebagai beban maupun sebagai generator secara bergantian. Ketika beroperasi sebagai generator, energi mekanik, misalnya dari putaran turbin air, diubah menjadi energi listrik. Sebaliknya, saat berfungsi sebagai motor, energi listrik digunakan untuk menggerakkan mekanisme, seperti memompa air kembali ke reservoir utama.

5. Gardu Distribusi

Gardu distribusi adalah instalasi listrik yang sangat penting dalam menurunkan tegangan tinggi dari sistem transmisi menjadi tegangan menengah atau rendah yang sesuai untuk kebutuhan konsumen. Lokasinya yang dekat dengan pusat-pusat beban memungkinkan distribusi tenaga listrik dilakukan secara efektif dan efisien.

2.9 Gardu Induk Pematang Siantar

Berdasarkan jenis, fungsi, dan konfigurasi peralatannya, Gardu Induk Pematang Siantar dapat digolongkan sebagai gardu induk tipe konvensional, di mana sebagian besar peralatan tegangan tinggi dipasang di luar ruangan. Namun, beberapa peralatan pendukung seperti peralatan kontrol, panel distribusi, meja penghubung (switchboard), dan baterai ditempatkan di dalam gedung untuk mendukung operasional gardu induk tersebut.

Gardu Induk Pematang Siantar dilengkapi dengan tiga (3) trafo daya, yaitu:

1. Trafo Daya 30 MVA Merk Unindo
2. Trafo Daya 60 MVA Merk Xian
3. Trafo Daya 60 MVA Merk Pauwels

a. Transformator Daya

Transformator daya adalah perangkat penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mengubah tingkat tegangan arus bolak-balik (AC) tanpa mengubah frekuensinya. Prinsip kerjanya didasarkan pada induksi elektromagnetik, di mana frekuensi arus listrik tetap konstan selama proses transformasi. Dalam konteks sistem tenaga listrik, transformator daya juga berfungsi sebagai pengatur tegangan untuk menjaga stabilitas dan kualitas pasokan listrik. Sebagai bagian dari sistem proteksi, transformator daya dilengkapi dengan sistem pentanahan, yang mencakup tahanan pentanahan netral (*Neutral Grounding Resistance/NGR*) yang berfungsi sebagai titik netral untuk transformator dan memberikan perlindungan terhadap gangguan tegangan lebih.



Gambar 2.13 Trafo daya Merek Pauwels G.I.P.Siantar

b. *Neutral Grounding Resistance* (NGR)

Neutral Grounding Resistance (NGR) adalah tahanan yang sengaja dipasang dalam sistem tenaga listrik untuk menghubungkan titik netral transformator dengan sistem pentanahan. Dengan menggunakan NGR, arus gangguan bumi dapat dibatasi,

yang membantu mengurangi kerusakan pada peralatan listrik dan melindungi sistem tenaga listrik dari gangguan yang lebih parah.



Gambar 2.14 *Neutral Grounding Resistance (NGR)*

c. *Current Transformer (CT)*

Transformator arus (CT) adalah perangkat listrik yang dirancang untuk mengurangi nilai arus bolak-balik dari level primer yang tinggi menjadi level sekunder yang lebih rendah secara proporsional. Fungsi utama dari CT adalah untuk mendukung pengukuran arus serta memberikan perlindungan dalam sistem tenaga listrik.



Gambar 2.15 *Current Transformer G.I. Pematang Siantar*

2.9.1 Peralatan Penghubung

Sistem interkoneksi, transmisi, dan distribusi tenaga listrik saling terhubung melalui gardu induk, yang berfungsi sebagai pusat pemutusan dan distribusi energi listrik kepada konsumen. Saluran *transmisi* dan *distribusi* terhubung ke busbar gardu induk melalui transformator utama. Setiap saluran dilengkapi dengan *circuit breaker* dan *disconnect switch* sebagai peralatan pengaman dan pemutus. *Circuit breaker* secara otomatis memutus aliran listrik saat mendeteksi gangguan dalam sistem, sedangkan *disconnect switch* digunakan untuk isolasi manual. Keduanya secara bersama-sama dikenal sebagai switchgear.

Peralatan penghubung terdiri dari dua jenis:

1. Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus tenaga (PMT) memiliki peran penting dalam melindungi sistem tenaga listrik dengan cara memutus aliran listrik secara otomatis ketika gangguan terdeteksi. Proses pemutusan ini harus dilakukan dengan cepat untuk mencegah kerusakan lebih lanjut pada peralatan sistem. Arus gangguan yang muncul saat terjadi gangguan dapat mencapai nilai yang sangat tinggi, sehingga memberikan beban kerja yang berat pada PMT. Jika PMT tidak dalam kondisi optimal akibat kurangnya pemeliharaan, hal ini dapat menyebabkan kegagalan dalam memutus arus gangguan, yang pada gilirannya dapat merusak komponen PMT bahkan memicu ledakan.



Gambar 2.16 Pemutus Tenaga (PMT) G.I. Pematang Siantar

2. Pemisah (PMS)

Pemilihan jenis pemutus beban (disconnect switch) dalam suatu sistem tenaga listrik dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kondisi lingkungan dan tata letak peralatan. Salah satu karakteristik utama pemutus beban adalah ketidakmampuannya untuk memutus arus beban dalam keadaan normal. Meskipun pemutus beban dapat memutus arus kecil, seperti arus dari trafo, prosedur operasi yang aman mengharuskan pemutus tenaga dibuka terlebih dahulu. Untuk memastikan keselamatan personel dan peralatan, sistem interlock yang efektif harus diterapkan untuk mencegah kesalahan urutan operasi antara pemutus beban dan pemutus tenaga.

Berdasarkan fungsi dan tujuannya, pemisah (PMS) dapat dikategorikan menjadi dua jenis utama:

1. Pemisah Tanah

Pemisah Tanah dirancang khusus untuk melindungi peralatan listrik dari tegangan induksi yang mungkin muncul setelah pemutusan sistem transmisi atau distribusi tenaga listrik (SUTT/SUTM).

2. Pemisah Peralatan

Pemisah Peralatan berfungsi sebagai isolator antara satu peralatan listrik dengan peralatan lainnya yang berada dalam keadaan bertegangan. Pemisah ini hanya boleh dioperasikan ketika peralatan dalam kondisi tidak berbeban.



Gambar 2.17 Gambar Pemisah (PMS)

2.9.2 Panel Hubung

Panel hubung, yang juga dikenal sebagai meja panel atau switchboard, berfungsi sebagai pusat kendali utama dalam sebuah Gardu Induk (GI). Dari panel ini, operator dapat memantau kondisi peralatan secara menyeluruh, melakukan pengoperasian berbagai peralatan, serta mengukur besaran listrik seperti tegangan, arus, dan daya. Jika terjadi gangguan dalam sistem, panel hubung secara otomatis akan mengaktifkan relai pengaman untuk membuka pemutus beban, sehingga bagian yang mengalami gangguan dapat segera diisolasi. Karena tegangan dan arus pada sisi tegangan tinggi tidak dapat diukur secara langsung, transformator ukur digunakan untuk menurunkan besaran tersebut ke tingkat yang aman untuk peralatan pengukuran. Transformator ukur yang biasa digunakan meliputi transformator tegangan, transformator arus, dan transformator tegangan-arus.



Gambar 2.18 Panel Hubung

2.9.3 Baterai

Mengingat pentingnya keandalan dan stabilitas dalam sistem kontrol dan proteksi gardu induk, baterai menjadi komponen yang sangat krusial. Baterai tidak hanya menyuplai tenaga untuk pengoperasian rutin peralatan, tetapi juga berfungsi sebagai sumber tenaga darurat saat terjadi gangguan. Dengan demikian, fungsi proteksi dan kontrol tetap terjaga, yang membantu meminimalkan dampak gangguan terhadap sistem kelistrikan.

2.9.4 Alat Pelindung

Dalam konteks yang lebih luas, selain perangkat pemutus beban dan relay pengaman, alat pelindung berfungsi sebagai garis pertahanan pertama terhadap berbagai gangguan sistem, sebagai berikut:

1. Arrester berfungsi sebagai perangkat perlindungan utama di gardu induk yang dirancang khusus untuk membatasi lonjakan tegangan transien akibat sambaran petir atau gangguan eksternal lainnya yang dapat merusak peralatan listrik.
2. Perangkat netral, yang umumnya dipasang pada titik netral transformator, memiliki peran penting dalam melindungi sistem dari gangguan hubung singkat ke tanah dengan cara membatasi arus gangguan dan mencegah kerusakan pada peralatan.
3. Adanya gangguan hubung singkat ke tanah atau sambaran petir dapat menyebabkan peningkatan potensial tanah di sekitar gardu induk secara signifikan, yang membahayakan keselamatan manusia dan hewan serta merusak peralatan. Untuk mengatasi hal ini, diterapkan sistem pengardean

dengan tahanan tanah yang seminimal mungkin guna membuang arus gangguan ke tanah dan menjaga potensial tanah tetap rendah.

2.9.5 Arrester

Arrester adalah perangkat proteksi listrik yang dirancang untuk melindungi peralatan listrik dari efek negatif tegangan lebih yang disebabkan oleh sambaran petir dan gangguan hubung. Mekanisme kerjanya melibatkan pembuangan arus surja ke tanah, sehingga dapat mencegah kerusakan pada peralatan listrik yang lebih sensitif. Saluran transmisi udara, yang biasanya digunakan untuk mengalirkan energi listrik dari pusat pembangkit, sangat rentan terhadap gangguan akibat sambaran petir. Sambaran petir ini dapat menginduksi gelombang berjalan (surja tegangan) pada saluran transmisi, yang berpotensi merambat hingga mencapai pusat pembangkit. Gelombang berjalan, atau yang sering disebut sebagai surja tegangan, dalam sistem tenaga listrik tidak hanya dipicu oleh aktivitas petir, tetapi juga dapat disebabkan oleh operasi pemutus tenaga listrik, baik saat membuka maupun menutup sirkuit, serta aktivitas switching pada jaringan. Pada sistem Tegangan Ekstra Tinggi (TET) yang beroperasi di kisaran 350 kV hingga 500 kV, seperti yang ditetapkan dalam standar transmisi udara tegangan ekstra tinggi (SUTET) di Indonesia, surja tegangan lebih banyak disebabkan oleh aktivitas switching dibandingkan dengan gangguan akibat petir. Ada tiga jenis arrester yang digunakan dalam peralatan di Gardu Induk Pematang Siantar Jln Sangnawaluh 150 kV, yaitu:

L.A I : Meidensha Tipe ZSE-01

L.A II : EMP Tipe 2MB150

L.A III : Tridelta Tipe DCC-M

Sedangkan untuk trafo yang ada pada Gardu Induk P.Siantar Jln Sangnawaluh 150 KV juga terdapat tiga tipe trafo yaitu :

Trafo I : UNINDO 9515190

Trafo II : XIANA94025-3

Trafo III : PAUWELS 3011100086

2.9.6 Peralatan Lain-Lain

Selain perangkat utama yang telah disebutkan, terdapat pula sejumlah peralatan penunjang (*auxiliary equipment*) yang krusial dalam operasional gardu induk. Peralatan ini meliputi sistem pendinginan, unit pencuci isolator, baterai, pengisi daya baterai, kompresor udara, sumber tenaga listrik, sistem penerangan, dan lain sebagainya. Gardu induk yang telah beroperasi dalam jangka waktu yang lama umumnya dilengkapi dengan fasilitas pendukung pemeliharaan yang memadai, seperti ruang bongkar pasang transformator, perlengkapan untuk pemindahan transformator, bengkel kerja, dan fasilitas penunjang lainnya.

2.9.7 Bangunan Gardu Induk

Gedung gardu induk Pematang Siantar merupakan bangunan tipe luar yang menampung peralatan utama berupa panel hubung dan sumber tenaga untuk keperluan kontrol. Hanya peralatan komunikasi dan fasilitas perkantoran yang ditempatkan di dalam gedung sebagai pelengkap.

2.10 Jenis Jenis Pentanahan

Pentanahan adalah suatu rangkaian penghantar yang menghubungkan bagian-bagian konduktif dari peralatan atau instalasi listrik ke bumi. Sistem ini berfungsi saat terjadi gangguan listrik, seperti korsleting atau sambaran petir, dengan menyediakan jalur berimpedansi rendah bagi arus gangguan untuk dialihkan ke tanah. Dengan cara ini, sistem pentanahan melindungi peralatan, menjaga keselamatan manusia, dan memastikan kontinuitas layanan listrik.

2.10.1 Sistem Pentanahan (Grounding System)

Sistem Pentanahan (*Grounding System*) adalah metode yang

menghubungkan bagian konduktif dari sistem tenaga listrik dengan bumi. Penerapan pentanahan, terutama pada titik netral sistem, bertujuan untuk menyediakan jalur aman bagi arus gangguan menuju tanah, sehingga kerusakan peralatan dan gangguan pada sistem dapat diminimalkan. Berikut adalah beberapa jenis sistem pentanahan:

1. Pentanahan Langsung (*Solid Grounding*)

Pentanahan langsung adalah sistem di mana titik netral dari sistem tenaga listrik dihubungkan langsung ke tanah. Sistem ini memungkinkan arus gangguan mengalir dengan bebas ke bumi, dan impedansi antara titik netral dan tanah dianggap nol atau sangat kecil. Dengan demikian, sistem ini memberikan perlindungan yang cepat dan efektif terhadap gangguan fase-ke-tanah.

2. Sistem Pentanahan Tidak Langsung (*Ungrounded System*)

Dalam sistem ini, titik netral tidak dihubungkan langsung ke bumi, tetapi dibiarkan mengambang atau terhubung melalui impedansi yang sangat tinggi. Akibatnya, arus gangguan fase-ke-tanah yang terjadi menjadi sangat kecil, sehingga sulit dideteksi oleh peralatan proteksi. Sistem ini memerlukan perangkat proteksi khusus untuk mendeteksi gangguan fase-ke-tanah.

3. Sistem Pentanahan Impedansi (*Resistance Grounding atau Reactance Grounding*)

Pada sistem ini, titik netral dihubungkan ke bumi melalui suatu impedansi, yang dapat berupa tahanan murni, reaktansi, atau kombinasi keduanya. Tujuan utama dari sistem ini adalah membatasi besarnya arus gangguan fase-ke-tanah yang mengalir ke bumi, sehingga mengurangi beban pada sistem pentanahan dan peralatan proteksi serta meningkatkan stabilitas sistem.

4. Pentanahan Reactor (*Reactor Grounding*)

Sistem ini digunakan ketika transformator daya tidak cukup untuk membatasi arus gangguan. Reactor ini diterapkan untuk memenuhi

persyaratan sistem yang diketanahkan dengan reactor, di mana arus gangguan melebihi 25% dari arus gangguan tiga fase ($X_0/X_1 \leq 10$). Sistem ini berada di antara pentanahan efektif dan sistem yang ditanahkan dengan kumparan Petersen.

5. Pentanahan Efektif (*Effective Grounding*)

Pentanahan efektif didefinisikan dengan perbandingan antara reaktansi urutan nol dan reaktansi urutan positif yang lebih kecil atau sama dengan tiga. Selain itu, perbandingan tahanan antara urutan nol dan reaktansi urutan positif harus lebih kecil atau sama dengan satu untuk setiap titik dalam sistem tersebut.

2.10.2 Pentanahan Peralatan

Dalam kondisi normal, bagian-bagian peralatan listrik yang terbuat dari bahan konduktor atau logam merupakan media yang baik untuk penghantaran listrik. Sistem pentanahan berfungsi untuk mencapai potensial yang sama antara peralatan dan bumi serta memperoleh impedansi yang nyata sebagai jalur untuk mengalirkan arus gangguan ke tanah dengan cepat. Pentanahan peralatan umumnya menggunakan dua jenis sistem pentanahan, yaitu:

1. Pentanahan *Rod*

Pentanahan *Rod* adalah sistem di mana elektroda pentanahan ditanam secara tegak lurus di permukaan tanah. Terdapat dua jenis pentanahan rod, yaitu yang terbuat dari lapisan tembaga dan yang terbuat dari bahan tembaga penuh. Fungsi utama sistem ini adalah untuk mengurangi tahanan pentanahan. Untuk memperkecil tahanan pentanahan, jumlah batang elektroda dapat ditambah. Ketika terjadi arus gangguan ke tanah, arus ini dapat menyebabkan peningkatan gradien di permukaan tanah. Besar tegangan maksimum yang muncul sebanding dengan tahanan pentanahan.

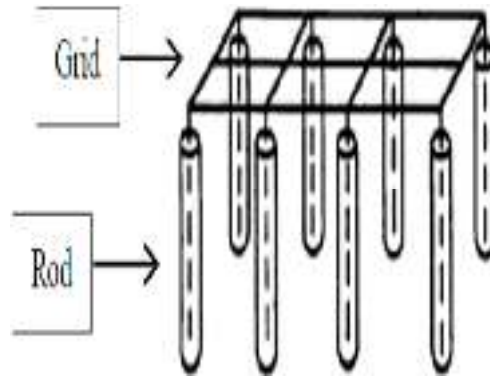
Pemasangan pentanahan rod dilakukan dengan menancapkannya ke

dalam tanah pada kedalaman 3-4 meter. Untuk mencapai hasil resistensi di bawah 5 ohm, satu unit pentanahan rod sudah cukup pada kondisi tanah yang baik. Jika hasil resistensi yang diinginkan belum tercapai, dapat digunakan sistem paralel dengan penanaman lebih dari satu unit. Penanaman elektroda secara paralel yang lebih banyak akan menurunkan tahanan pentanahan dan mendistribusikan arus dengan lebih merata. Penanaman batang elektroda dapat dilakukan dalam formasi bujur sangkar atau persegi panjang, dengan jarak antar elektroda yang sama. Konduktor penghubung antara batang elektroda terletak di atas permukaan tanah sehingga tahanannya tidak dihitung. Semakin dekat jarak antara konduktor dan semakin banyak konduktor yang ditanam, semakin kecil konduktivitas masing-masing konduktor.

2. Pentanahan *Grid*

Pentanahan *Grid* adalah sistem yang menanamkan batang elektroda sejajar di permukaan tanah. Batang-batang ini saling terhubung untuk meratakan tegangan yang mungkin timbul. Dengan menanamkan banyak elektroda, bentuknya mendekati bentuk plat, yang memberikan nilai tahanan paling kecil untuk area tertentu. Namun, desain ini cukup mahal, sehingga perlu dicari bentuk yang lebih sederhana dan murah tetapi tetap memenuhi standar tahanan yang diperlukan.

Dengan semakin banyak konduktor yang ditanam, harga tahanannya akan berbanding lurus, karena fungsi utama konduktor adalah untuk menyalurkan arus gangguan ke tanah. Jika konduktor terlalu berdekatan, volume tanah tidak dapat menampung arus dari konduktor tersebut, sehingga mengurangi kemampuan tanah untuk menerima arus. Pada sistem pentanahan *Grid*, elektroda biasanya ditanam sejajar satu sama lain pada kedalaman beberapa puluh sentimeter ke dalam tanah. Untuk mengurangi tahanan pentanahan, perluasan area pentanahan lebih mudah dilakukan dibandingkan dengan memperdalam konduktor.



Gambar 2.19 Pentanahan *Rod* dan *Grid*

3. Sistem Pentanahan Dengan Proteksi Petir (*Surge Arrester*)

Saat terjadi sambaran petir, tegangan dalam sistem listrik akan meningkat dengan drastis. Surge arrester yang terhubung ke sistem akan mengalami lonjakan tegangan yang melebihi batas yang ditetapkan. Dalam keadaan seperti ini, surge arrester akan berfungsi sebagai konduktor dan mengalirkan arus petir ke tanah melalui sistem pentanahan. Setelah arus petir mereda, surge arrester akan kembali ke kondisi isolasi semula.

Sistem pentanahan yang dilengkapi dengan proteksi petir merupakan kombinasi dari fungsi pentanahan dan perangkat proteksi petir (*surge arrester*) untuk memberikan perlindungan menyeluruh terhadap peralatan listrik dan manusia dari efek sambaran petir. Sistem ini dirancang untuk menyalurkan arus gangguan akibat sambaran petir dengan aman ke tanah, sambil membatasi kenaikan tegangan yang dapat membahayakan sistem listrik.

2.11 Komponen-Komponen Pentanahan

1. Hantaran Penghubung

Hantaran penghubung adalah konduktor yang berfungsi

menghubungkan bagian konduktif peralatan listrik dengan sistem pentanahan. Komponen ini dirancang untuk menyalurkan arus gangguan listrik ke tanah dengan aman, sehingga mengurangi risiko sengatan listrik dan kerusakan pada peralatan. Berbeda dengan penghantar netral seperti BC (*Bare Copper Conductor*) atau ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*), hantaran penghubung biasanya terbuat dari bahan tembaga atau aluminium. Pemilihan material ini didasarkan pada konduktivitas listrik yang tinggi dan kekuatan mekanik yang memadai. Meskipun tembaga menawarkan konduktivitas terbaik, harganya yang tinggi menjadikannya rentan terhadap pencurian. Oleh karena itu, aluminium sering kali menjadi alternatif yang lebih ekonomis, terutama dalam aplikasi pentanahan peralatan listrik. Aluminium memiliki harga yang lebih rendah dan lebih ringan, tetapi konduktivitas dan kekuatan mekaniknya lebih rendah dibandingkan tembaga. Umumnya, Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) menggunakan konduktor ACSR, yang dirancang dengan inti baja untuk memberikan kekuatan mekanik tinggi dan lapisan luar aluminium yang memiliki konduktivitas listrik yang baik, menjadikannya ideal untuk transmisi daya jarak jauh. Untuk memastikan kinerja sistem pentanahan yang optimal, sambungan antara hantaran penghubung dan elektroda pentanahan harus memenuhi beberapa persyaratan, seperti kekuatan mekanis yang baik, kontak listrik yang optimal, dan ketahanan terhadap korosi. Penggunaan baut dengan diameter minimal 10 mm pada klem elektroda dan perlindungan tambahan terhadap korosi merupakan langkah penting dalam mencapai tujuan ini.

2. Elektroda Pentanahan

Elektroda pentanahan, yang ditanam langsung ke dalam tanah, berfungsi sebagai titik referensi potensial listrik. Komponen ini memiliki tugas untuk mengalirkan arus gangguan ke tanah, menjaga tingkat potensial listrik peralatan tetap rendah, serta mengurangi risiko terjadinya gangguan busur api. Elektroda pentanahan dapat menggunakan struktur yang sudah ada,

seperti sistem perpipaan logam, atau menggunakan struktur buatan dari bahan konduktif seperti tembaga atau baja tahan karat. Pemilihan jenis elektroda akan mempengaruhi efektivitas sistem pentanahan secara keseluruhan.

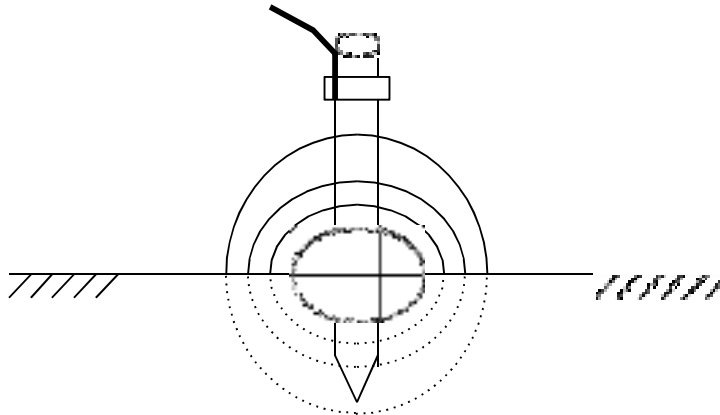
Elektroda yang digunakan untuk pentanahan harus memenuhi beberapa persyaratan, antara lain:

1. Memiliki daya hantar yang cukup besar agar tidak meningkatkan beda potensial lokal yang dapat membahayakan peralatan dan keselamatan orang di sekitarnya.
2. Memiliki kekuatan mekanis yang tinggi.
3. Tahan terhadap peleburan yang disebabkan oleh sambungan listrik yang buruk.
4. Tahan terhadap korosi.

Secara umum, tembaga adalah bahan yang sering digunakan untuk konduktor (elektroda) pentanahan, karena tembaga memiliki sifat-sifat yang memenuhi syarat di atas. Tahanan tanah di sekitar elektroda dipengaruhi oleh tahanan jenis tanah. Dalam sistem pembumian, terdapat beberapa komponen tahanan yang mempengaruhi total tahanan, di mana ketiga komponen ini memiliki hubungan simetris dalam membentuk nilai tahanan pembumian, yaitu:

1. Tahanan elektroda pembumian beserta sambungan-sambungannya.
2. Tahanan kontak antara elektroda pembumian dan tanah di sekitarnya.
3. Tahanan tanah di sekitarnya.

Dari ketiga komponen tahanan tersebut, tahanan tanah di sekitar elektroda memiliki pengaruh paling besar terhadap total tahanan pembumian, dibandingkan dengan tahanan elektroda dan tahanan kontak.



Gambar 2.20 Komponen tahanan dari suatu batang elektroda pbumian

Elektroda pbumian yang terbuat dari logam memiliki tahanan yang cukup kecil jika ukurannya memadai. Selain itu, tahanan kontak ke tanah dapat diabaikan jika permukaan elektroda bersih dari lemak dan cat, serta jika titik kontak cukup padat, sehingga elektroda dapat dipasak dengan kuat. Untuk mencapai tahanan pbumian yang rendah, diperlukan penggunaan elektroda pbumian. Prinsip dasar untuk memperoleh tahanan pbumian yang kecil adalah dengan memaksimalkan luas permukaan elektroda yang bersentuhan dengan tanah, sesuai dengan rumus di bawah ini:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Keterangan:

R = tahanan pbumian [Ω]

ρ = tahanan jenis tanah [$\Omega \cdot m$]

L = panjang lintasan arus pada tanah [m]

A = luas penampang lintasan arus pada tanah [m^2]

Selain dipengaruhi oleh luas permukaan elektroda pbumian dan tahanan jenis tanah, tahanan pbumian yang dihasilkan juga ditentukan oleh

jenis dan bentuk elektroda itu sendiri. Beberapa bentuk elektroda pembumian yang digunakan antara lain:

- Elektroda bentuk batang
- Elektroda bentuk pita
- Elektroda bentuk plat.

3. Sambungan Pentanahan

Sambungan pentanahan adalah elemen krusial dalam sistem pentanahan yang berfungsi menghubungkan berbagai komponen. Kualitas sambungan ini akan sangat memengaruhi kinerja keseluruhan sistem. Oleh karena itu, pemilihan jenis sambungan, bahan, dan metode penyambungan yang tepat, serta pemeliharaan rutin, sangat penting untuk memastikan keselamatan dan keandalan sistem.

4. *Surge Arrester*

Surge arrester adalah perangkat perlindungan yang dirancang khusus untuk membatasi peningkatan tegangan sementara (transient overvoltage) dalam sistem tenaga listrik. Lonjakan tegangan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk sambaran petir, operasi switching, dan gangguan sistem lainnya. Tanpa perlindungan yang memadai, lonjakan tegangan tersebut dapat merusak peralatan listrik yang mahal dan mengganggu kontinuitas layanan.

2.12 Tahanan Jenis Tanah

Tahanan jenis tanah bervariasi tergantung pada jenis tanahnya, yang disebabkan oleh perbedaan konduktivitas dari masing-masing unsur penyusun tanah. Tanah yang memiliki kelembaban tinggi akan memiliki tahanan jenis yang lebih rendah. Salah satu metode konvensional untuk menurunkan tahanan jenis tanah adalah dengan menambahkan air atau membasahi tanah, sehingga meningkatkan kelembabannya. Nilai tahanan jenis tanah pada kedalaman tertentu sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Untuk mendapatkan nilai rata-rata tahanan jenis tanah yang akurat dalam

perencanaan, diperlukan penyelidikan atau pengukuran dalam periode tertentu. Umumnya, tahanan jenis tanah juga tergantung pada ketinggian permukaan tanah relatif terhadap permukaan air yang konstan. Untuk mengurangi tahanan jenis tanah yang dipengaruhi oleh musim, elektroda pentanahan dapat ditanam hingga mencapai kedalaman di mana terdapat air tanah yang konstan.

Tabel 2.1 Nilai rata-rata jenis tanah pentanahan

No.	Jenis Tanah	Tahanan Jenis (<i>Ohm.m</i>)
1	Tanah rawa	10 s.d. 40
2	Tanah liat dan lading	20 s.d. 100
3	Pasir basah	50 s.d. 200
4	Kerikil basah	200 s.d. 3000
5	Pasir dan kerikil kering	<10.000
6	Tanah berbatu	2.000 s.d. 3.000
7	air laut dan tawar	10 s.d. 100

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis gangguan hubung singkat satu fasa, dua fasa, dan tiga fasa yang terjadi di PT. PLN (Persero) P3B UPT Pematang Siantar.

3.2 Objek Penelitian

Objek penelitian dalam studi ini adalah gangguan hubung singkat yang terjadi pada saluran distribusi, yang sebelumnya telah diteliti terkait dengan OCR, DCR, dan impedansi.

3.3 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di area saluran distribusi tenaga listrik yang terletak di PT. PLN (Persero) P3B UPT Pematang Siantar.

3.4 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif dengan pendekatan studi kasus, di mana data diambil dari jaringan distribusi PT PLN (Persero) P3B UPT Pematang Siantar.

3.5 Teknik Analisa Data

Analisis dalam penelitian ini dilakukan dengan membandingkan penanganan gangguan hubung singkat satu fasa menggunakan metode overcurrent, DCR, dan impedansi. Dalam penanganan gangguan singkat satu fasa, terdapat beberapa langkah perlindungan yang diambil, antara lain:

1. Perhitungan Impedansi Sumber

Sebelum menghitung arus gangguan hubung singkat, perlu diketahui terlebih dahulu impedansinya menggunakan data hubung singkat di bus sisi primer trafo

tenaga 1 di gardu induk Beringin. Gardu induk Beringin memiliki arus gangguan hubung singkat pada sisi primer, sehingga impedansi sumber (Z_s) dapat ditentukan sebagai berikut:

$$MVA = \sqrt{3} \times V \times I$$

$$Z_{(sisi\ 150\ kV)} = \frac{kV\ (sisi\ primer\ trafo)^2}{MVA}$$

Sedangkan untuk mengetahui impedansi disisi sekunder maka:

$$Z_s \underset{(sisi\ 20\ kV)}{=} = \frac{kV\ (sisi\ sekunder\ trafo)^2}{kV\ (sisi\ primer\ traf)^2} \times Z_s \underset{(sisi\ primer)}{}$$

2. Perhitungan impedansi Trafo

Perhitungan impedansi suatu transformator didasarkan pada nilai reaktansinya, sedangkan tahanannya diabaikan karena nilainya dianggap kecil. Selanjutnya, untuk menentukan reaktansi (X_t) pada Trafo tenaga 1 yang menyuplai penyulang BRG 3, digunakan data impedansi trafo tenaga 1 di gardu induk Beringin. Dengan demikian, nilai impedansi trafo adalah:

Berdasarkan IEC 60076 Trafo Beringin memiliki nilai $X/R = 45$, sehingga :

$$Z_t = R + jX$$

$$Z_t = R^2 + X^2$$

Untuk menghitung besarnya nilai reaktansi urutan nol adalah :

$$z_{0t} = x_{0t} = 10 \times x_t$$

3. Perhitungan impedansi penyulang

Dari jenis penghantar yang digunakan pada penyulang BR3 hanya menggunakan satu jenis tipe penghantar yaitu AAAC 240 mm²:

$$\text{Panjang penyulang} = 5,7\ \text{km}$$

$$z_1 = z_2\ (\text{AAAC}\ 240\ \text{mm}^2) = (0,1344 + j0,3158)\ \Omega/\text{km}$$

$$z_0 \text{ AAAC } 240 \text{ mm}^2 = (0,2824 + j1,6034) \Omega/\text{km}$$

Dengan demikian nilai impedansi penyulang untuk lokasi gangguan dengan jarak 0%,25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang

4. Perhitungan Impedansi Ekuivalen Jaringan

Perhitungan Z_{1eq} dan Z_{2eq} :

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_{is} \text{ (sisi } 20\text{kV)} + Z_t + Z_1 \text{ penyulang}$$

Karena lokasi gangguan diasumsikan pada 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang maka Z_{1eq} (Z_{2eq}) yang didapat seperti tabel 4.3:

Perhitungan Z_{0eq} : Z_{0eq}

$$= Z_{0t} + Z_0 \text{ penyulang}$$

Untuk lokasi gangguan di 0%, 25%,50%, 75% dan 100% panjang penyulang

5. Perhitungan Arus gangguan Hubung Singkat

Arus gangguan hubung singkat dapat dihitung seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.5. Jenis gangguan hubung singkat yang akan dihitung mencakup gangguan tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke tanah. Rincian perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dilihat pada Tabel 4.5 untuk gangguan tiga fasa, Tabel 4.6 untuk gangguan dua fasa, dan tabel lainnya untuk gangguan satu fasa ke tanah.

$$I_{3\text{fasa}} = \frac{V_{pq}}{Z_{1eq}}$$

V_{pq} merupakan tegangan fasa netral sistem 20 kV yaitu $\frac{20.000}{\sqrt{3}}$ V. Perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa untuk lokasi gangguan di 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% panjang saluran

a. Perhitungan arus gangguan hubung singkat 2 fasa

$$I_{2\text{fasa}} = \frac{V_{\text{ph-ph}}}{2 \times Z_{2\text{eq}}}$$

b. Perhitungan arus gangguan hubung singkat 1 fasa ketanah

$$I_{1\text{fasa}} = \frac{3 \times V_{\text{ph}}}{2 \times Z_{2\text{eq}} + Z_{0\text{eq}}}$$

Perhitungan arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah untuk lokasi gangguan di 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% panjang penyulang