



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Gardu Induk

Gardu Induk merupakan suatu instalasi yang terdiri dari sekumpulan peralatan listrik yang disusun menurut pola tertentu dengan pertimbangan teknis, ekonomis serta keindahan. Fungsi dari Gardu Induk adalah sebagai berikut :

- a. Mentransformasikan tenaga listrik tegangan tinggi yang satu ketegangan yang lainnya atau tegangan menengah.
- b. Pengukuran pengawasan operasi serta pengaturan pengamanan dari sistem tenaga listrik.
- c. Pengaturan daya ke gardu-gardu lainnya melalui tegangan tinggi dan gardu distribusi melalui feeder tegangan menengah.

Pada dasarnya gardu induk terdiri dari saluran masuk dan dilengkapi dengan transformator daya, peralatan ukur, peralatan penghubung dan lainnya yang saling menunjang.

2.2. Klasifikasi Gardu Induk

Gardu induk dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam, yaitu :

2.2.1. Menurut Pemasangan Peralatan

Berdasarkan Pemasangan peralatan, Gardu induk dapat dibedakan menjadi 4 macam yaitu :

1. Gardu Induk Pasang Luar

Gardu induk jenis pasangan luar terdiri dari peralatan tegangan tinggi pasangan luar. Pasangan luar yang dimaksud adalah diluar gedung atau bangunan. Walaupun ada beberapa peralatan yang lain berada di dalam gedung, seperti peralatan panel kontrol, meja penghubung (*switch board*) dan baterai. Gardu Induk jenis ini memerlukan tanah luas namun biaya yang diperlukan lebih murah.



2. Gardu Induk Pasangan Dalam

Disebut Gardu induk pasangan dalam karena sebagian besar peralatannya berada dalam suatu bangunan. Peralatan ini seperti halnya pada gardu induk pasangan luar. Dari transformator utama, rangkaian switchgear dan panel kontrol serta batere semuanya. Jenis pasangan dalam ini dipakai untuk menjaga keselarasan dengan daerah sekitarnya dan untuk menghindari bahaya kebakaran dan gangguan suara.

3. Gardu Induk Setengah Pasangan Luar

Sebagian dari peralatan tegangan tingginya terpasang di dalam gedung dan yang lainnya dipasang diluar dengan mempertimbangkan situasi dan kondisi lingkungan. Karena konstruksi yang berimbang antara pasangan dalam dengan pasangan luar inilah tipe gardu induk ini disebut juga gardu induk semi pasangan dalam.

4. Gardu Induk Pasangan Bawah Tanah

Hampir semua peralatannya terpasang dalam bangunan bawah tanah. Hanya alat pendinginan biasanya berada diatas tanah, dan peralatan- peralatan yang tidak memungkinkan untuk ditempatkan di bangunan bawah tanah. Biasanya di bagian kota yang sangat ramai, di jalan-jalan pertokoan dan di jalan-jalan dengan gedung bertingkat tinggi. Kebanyakan gardu induk ini dibangun dibawah jalan raya.³

2.2.2. Menurut Tegangan

Berdasarkan tegangan, gardu induk dapat dibedakan menjadi 2 macam yaitu :

1. Gardu induk transmisi

Yaitu gardu induk yang mendapat daya dari saluran transmisi untuk kemudian menyalurkannya ke daerah beban (industri dll). Gardu induk transmisi yang ada di PLN adalah 500 kV, 275 kV, 150 kV, dan 70 kV.



2. Gardu distribusi

Yaitu gardu induk yang menerima tenaga dari gardu induk transmisi dengan menurunkan tegangannya melalui transformator tenaga menjadi tegangan menengah (20 KV, 12 KV atau 6 KV) untuk kemudian tegangan tersebut diturunkan kembali menjadi tegangan rendah (127/220 V) atau (220/380 V) sesuai dengan kebutuhan.

2.2.3. Menurut Fungsinya

Berdasarkan fungsinya, gardu induk dapat dibedakan menjadi 5 macam yaitu :

1. Gardu Induk Penaik Tegangan

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

2. Gardu Induk Penurun Tegangan

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

3. Gardu Induk Pengatur Tegangan

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



4. Gardu Induk Pengatur Beban

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

5. Gardu Distribusi

Gardu induk yang menyalurkan tenaga listrik dari tegangan sistem ke tegangan distribusi. Gardu induk ini terletak di dekat pusat-pusat beban.⁵

2.3. Fasilitas dan Peralatan Gardu Induk

Agar gardu induk dapat menjalankan fungsi dan tujuannya, maka gardu dilengkapi dengan peralatan serta fasilitas. Secara garis besar, peralatan-peralatan pada gardu induk tersebut adalah sebagai berikut :

2.3.1. Transformator Daya

a. Transformator Daya

Transformator Daya berfungsi untuk mentransformasikan daya listrik, dengan merubah besaran tegangannya sedangkan frekuensinya tetap. Transformator daya juga berfungsi sebagai pengatur tegangan. Trafo daya dilengkapi oleh trafo pentanahan yang berfungsi untuk mendapatkan titik netral dari trafo daya. Perlengkapan lainnya adalah pentanahan trafo yang disebut *Neutral Grounding Resistance (NGR)*.



Gambar 2.1 Transformator Daya.

⁵ Nugraha Adi. 2015. *Evaluasi Jarak Penempatan Arrester Terhadap Transformator Daya 30 MVA 70/20 KV*. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang.



b. Neutral Grounding Resistance (NGR)

Neutral Grounding Resistance (NGR) adalah komponen yang dipasang antara titik netral trafo dengan pentanahan. *Neutral Grounding Resistance* (NGR) berfungsi untuk memperkecil arus gangguan yang terjadi.



Gambar 2.2 *Neutral Grounding Resistance*

c. *Current Transformer* (CT)

Transformator Arus (CT) berfungsi untuk merubah besaran arus, dari arus yang besar ke arus yang kecil. Atau memperkecil besaran arus listrik pada sistem tenaga listrik, menjadi arus untuk sistem pengukuran dan proteksi.



Gambar 2.3 *Current Transformer*



d. *Potential Transformer (PT)*

Transformator Tegangan (PT) berfungsi untuk merubah besaran tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau memperkecil besaran tegangan listrik pada system tenaga listrik, menjadi besaran tegangan untuk pengukuran dan proteksi.



Gambar 2.4 *Potential Transformer*⁷

2.3.2. Alat Pengubah fasa

Alat pengubah fasa ini dipakai untuk mengatur jatuh tegangan pada saluran atau transformator dengan mengatur daya reaktif, atau untuk menurunkan rugi daya dengan memperbaiki faktor daya. Alat tersebut ada yang berputar, ada yang stationer. Yang berputar adalah kondensator sinkron dan kondensator asinkron. Sedangkan untuk stationer adalah kondensator statis dan reaktor shunt. Yang berputar dipakai untuk fasa terdahulu (*leading*) atau terbelakang (*lagging*) yang dapat diatur secara terus-menerus. Tetapi alat ini sangat mahal dan pemeliharaannya rumit. Alat yang stationer sekarang ini banyak dipakai menggantikan alat yang berputar, sebab teknik pembuatannya telah banyak mengalami kemajuan pesat, tegangannya dapat diatur tanpa kesulitan dengan penyetelan daya reaktif secara bertingkat mengikuti sistem tenaga listrik.³

⁷PT.PLN(persero) Gardu Induk PLTG Jakabaring

³Dr.A.Arismunandar dan DR.S.Kuwahara.Teknik Tenaga Listrik jilid III hal.3



2.3.3. Peralatan Penghubung

Saluran transmisi dan distribusi dihubungkan dengan gardu induk. Jadi gardu induk ini merupakan tempat pemutusan dari tenaga yang dibangkitkan dari sistem interkoneksi, sistem transmisi, dan distribusi kepada pelanggan. Saluran transmisi dan distribusi ini dihubungkan pada ril (bus) melalui transformator utama, setiap saluran mempunyai pemutus beban (circuit breaker) dan pemisah (*disconnect switch*) pada sisi keluarannya. Pemutus beban ini dipakai untuk memutuskan atau menghubungkan beban bila terjadi gangguan pada saluran transmisi atau alat lain, pemutus beban itu dipakai untuk memutuskan hubungan secara otomatis. Pemutus beban dan pemisah dinamakan peralatan penghubung (*switchgear*).

Peralatan penghubung terbagi dua yaitu :

a. Pemutus Tenaga (PMT)

Berfungsi untuk memutuskan hubungan tenaga listrik dalam keadaan gangguan maupun dalam keadaan berbeban dan proses ini harus dilakukan dengan cepat. Pemutus tenaga listrik dalam keadaan gangguan akan menimbulkan arus yang relatif besar, pada saat tersebut pemutus beban bekerja sangat berat. Bila kondisi peralatan pemutus tenaga menurun karena kurangnya pemeliharaan, sehingga tidak sesuai lagi kemampuan dengan daya yang diputuskannya, maka pemutus tenaga tersebut akan dapat rusak (meledak).



Gambar 2.5 Pemutus Tenaga (PMT)

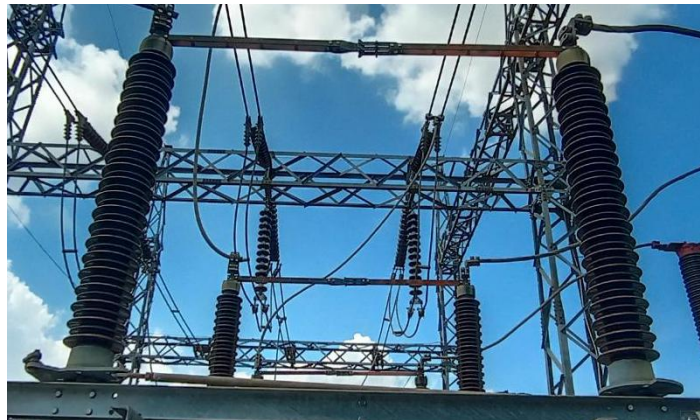


b. Pemisah (PMS)

Pemilihan jenis pemisah (*disconnect switch*) ditentukan oleh lokasi, tata bangunan luar (*outdoor structure*) dan sebagainya. Pada umumnya pemisah tidak dapat memutuskan arus. Meskipun ia dapat memutuskan arus yang kecil, misalnya arus pembangkit Trafo, tetapi pembukaan atau penutupannya harus dilakukan setelah pemutus tenaga lebih dahulu dibuka. Untuk menjamin bahwa kesalahan urutan operasi tidak terjadi, maka harus ada keadaan saling mengunci (*interlock*), antara pemisah dengan pemutus bebannya.

Sesuai dengan fungsi dan kegunaannya, maka PMS dibagi menjadi 2 macam yaitu :

1. Pemisah Tanah, berfungsi untuk mengamankan peralatan dari sisi tegangan yang timbul sesudah SUTT / SUTM diputuskan.
2. Pemisah Peralatan, berfungsi untuk mengisolasi peralatan listrik dari peralatan yang bertegangan. Pemisah ini dioperasikan tanpa beban.



Gambar 2.6 Pemisah (PMS)

2.3.4. Panel Hubung

Panel hubung (meja, switch board) merupakan pusat syaraf sebagai suatu GI. Pada panel hubung inilah operator dapat mengamati keadaan peralatan, melakukan operasi peralatan serta pengukuran-pengukuran tegangan dan arus, daya dan sebagainya



Bila terjadi gangguan, panel hubung ini membuka pemutus beban secara otomatis melalui rele pengaman dan memisahkan bagian yang terganggu. Karena tegangan dan arus tidak dapat diukur langsung pada sisi tegangan tinggi, maka transformator ukur (*instrument*) mengubah menjadi tegangan dan arus rendah, sekaligus memisahkan alat-alat tadi dari sisi tegangan tinggi. Adapun tiga jenis transformator ukur yaitu transformator tegangan, transformator arus, serta transformator tegangan dan arus.



Gambar 2.7 Panel Hubung

2.3.5. Baterai

Sumber tenaga untuk sistem kontrol dan proteksi selalu mempunyai keandalan dan stabilitas yang tinggi, maka baterai dipakai sebagai sumber tenaga kontrol dan proteksi pada gardu induk. Peranan dari baterai sangat penting karena pada saat gangguan terjadi, baterai sebagai sumber tenaga untuk menggerakkan alat-alat kontrol dan proteksi.



Gambar 2.8 Baterai⁷

⁷ PT.PLN(persero) Gardu Induk PLTG Jakabaring



2.3.6. Alat Pelindung

Alat - alat pelindung (*protective device*) dalam arti luas, disamping pemutus beban dan rele pengaman, adalah sebagai berikut :

1. Arrester mengamankan peralatan gardu induk terhadap tegangan lebih abnormal yang bersifat kejutan, misalnya kejutan petir.
2. Beberapa peralatan netral sering dipakai dititik netral transformator untuk pengamanan pada waktu terjadi gangguan tanah.
3. Bila terjadi gangguan (hubung – singkat) tanah atau gangguan petir, potensial tanah dari gardu induk mungkin naik abnormal sehingga membahayakan orang dan binatang yang ada didekatnya atau menyebabkan rusaknya alat. Untuk menghindari resiko seperti ini, ditanamlah penghantar pengtanahan dengan tahanan tanah sekecil mungkin.

2.3.7. Peralatan Lain – Lain

Disamping peralatan diatas, ada peralatan bantu (*auxiliary tool*), seperti : alat pendingin, alat pencuci isolator, batere, pengisi batere, kompresor, sumber tenaga, alat penerangan dan sebagainya. Gardu – gardu yang tua kebanyakan dilengkapi pula dengan peralatan yang diperlukan untuk pemeliharaan, seperti : Ruang bongkar transformator, fasilitas untuk pemindahan transformator, bengkel dan sebagainya.

2.3.8. Bangunan (Gedung) Gardu Induk

Gedung G.I (gardu induk) berbeda – beda tergantung pada skala dan jenis G.I. Pada G.I pemasangan luar, disamping panel hubung dan sumber tenaga untuk kontrol, hanyalah peralatan komunikasi dan kantor yang harus ada di dalam gedung. Oleh karena itu gedungnya lebih kecil bila dibandingkan dengan gardu induk jenis pemasangan dalam.³

³DR.A.Arismunandar dan DR.S.Kuwahara 1979.Teknik Tenaga Listrik jilid III hal 2-4



2.4 Transformator

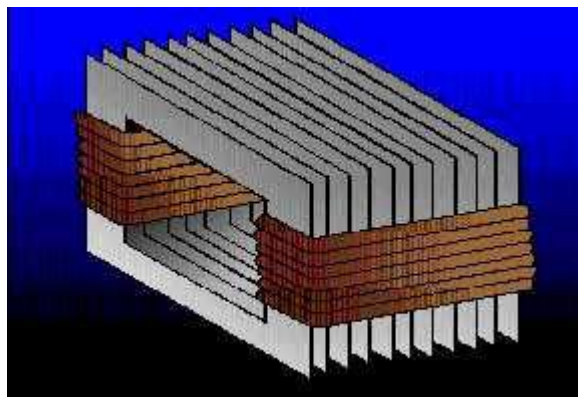
Transformator adalah alat listrik yang dapat memindahkan energi listrik dengan merubah tingkat tegangan dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lain melalui prinsip induksi magnetik tanpa merubah frekuensi. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Tegangan masukan bolak-balik yang membentangi primer menimbulkan fluks magnet yang idealnya semua bersambung dengan lilitan sekunder. Fluks bolak-balik ini menginduksikan gaya gerak listrik (ggl) dalam lilitan sekunder. Jika efisiensi sempurna, semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder.

2.4.1. Bagian-bagian Transformator

Bagian-bagian dari transformator adalah :

1. Inti Besi

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Pada transformator, inti besi dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh “Eddy Current”.



Gambar 2.9 Inti Besi Transformator



2. Kumparan

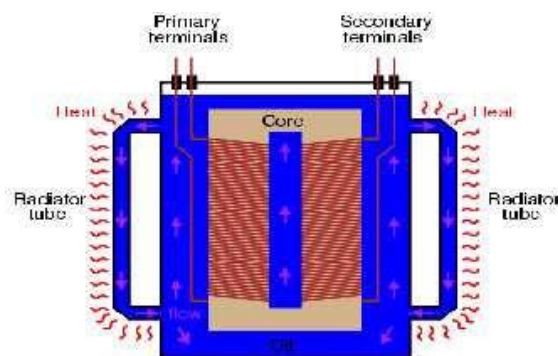
Beberapa lilitan kawat berisolasi akan membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut di-isolasi, baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain disebelahnya dengan isolasi padat, seperti karton, pertinax.



Gambar 2.10 Kumparan Transformator

3. Minyak Transformator

Sebagian besar trafo tenaga, kumparan-kumparan dan intinya direndam dalam minyak trafo, terutama trafo-trafo tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak trafo mempunyai sifat sebagai media pemindah panas (di sirkulasi), dan bersifat sebagai isolasi (daya tegangan tembus tinggi), sehingga minyak trafo tersebut berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi.



Gambar 2.11 Minyak Transformator



4. Tangki

Pada umumnya bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak trafo berada (ditempatkan) dalam tangki. Untuk menampung pemuai minyak trafo, tangki dilengkapi dengan konservator.



Gambar 2.12 Tangki Transformator

5. Bushing Transformator

Hubungan antara kumparan trafo ke jaringan luar melalui sebuah bushing, yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki trafo.



Gambar 2.13 Bushing Transformator



2.4.2. Jenis - jenis transformator

Transformator terbagi menjadi 2 jenis, yaitu :

1) Transformator Step Up

Transformator Step Up adalah transformator yang digunakan untuk menaikkan tegangan bolak-balik (AC). Pada transformator ini, jumlah lilitan kumparan sekunder lebih banyak daripada lilitan kumparan primer.

2) Transformator Step Down

Transformator Step Down adalah transformator yang digunakan untuk menurunkan tegangan bolak-balik (AC). Pada transformator ini, jumlah lilitan kumparan primer lebih banyak daripada jumlah lilitan kumparan sekunder.

2.5. Terjadinya Petir

Petir, kilat, atau halilintar adalah gejala alam yang biasanya muncul pada musim hujan di saat langit memunculkan kilatan cahaya sesaat yang menyilaukan. Beberapa saat kemudian disusul dengan suara menggelegar yang disebut guruh. Perbedaan waktu kemunculan ini disebabkan adanya perbedaan antara kecepatan suara dan kecepatan cahaya.

Petir merupakan gejala alam yang bisa kita analogikan dengan sebuah kondensator raksasa, dimana lempeng pertama adalah awan (bisa lempeng negatif atau lempeng positif) dan lempeng kedua adalah bumi (dianggap netral).

Seperti yang sudah diketahui kapasitor adalah sebuah komponen pasif pada rangkaian listrik yang bisa menyimpan energi sesaat (*energy storage*). Petir juga dapat terjadi dari awan ke awan (*intercloud*), dimana salah satu awan bermuatan negatif dan awan lainnya bermuatan positif.

Petir terjadi karena ada perbedaan potensial antara awan dan bumi atau dengan awan lainnya. Proses terjadinya muatan pada awan karena dia bergerak terus menerus secara teratur, dan selama pergerakannya dia akan berinteraksi dengan awan lainnya sehingga muatan negatif akan berkumpul pada salah satu sisi (atas atau bawah), sedangkan muatan positif berkumpul pada sisi sebaliknya.



Jika perbedaan potensial antara awan dan bumi cukup besar, maka akan terjadi pembuangan muatan negatif (elektron) dari awan ke bumi atau sebaliknya untuk mencapai kesetimbangan. Pada proses pembuangan muatan ini, media yang dilalui elektron adalah udara. Pada saat elektron mampu menembus ambang batas isolasi udara inilah terjadi ledakan suara. Petir lebih sering terjadi pada musim hujan, karena pada keadaan tersebut udara mengandung kadar air yang lebih tinggi sehingga daya isolasinya turun dan arus lebih mudah mengalir. Karena ada awan bermuatan negatif dan awan bermuatan positif, maka petir juga bisa terjadi antar awan yang berbeda muatan.

2.5.1. *Initial leader (Lidah Mula)*

Leader dari suatu kilat didahului oleh aliran pengemudi (pilot streamer), yang menentukan arah perambatan muatan dari awan ke udara yang ionisasinya rendah. Karena cahayanya lemah, tidak dapat tertangkap oleh boys camera. Sesudah pilot streamer ini terjadi, akan diikuti oleh titik cahaya yang bergerak secara melompat- lompat, dinamakan stepped leader. Kecepatan stepped leader kira-kira 105m/detik. Arah tiap-tiap langkah dari stepped leader berubah-ubah, sehingga jalannya tidak lurus dan patah- patah.

Ketika lidah kilat menuju bumi, cabang-cabang dari lidah utama akan terbentuk. Bial stepped leader telah dekat dengan bumi, akan terjadi saluran muatan positif dari bumi keawan, karena ada beda potensial yang tinggi.

Saluran muatan positif ini bertemu dengan ujung stepped leader, titik pertemuan ini disebut point of strike, berada 20-70 m diatas permukaan bumi. Waktu dari stepped leader untuk sampai ke permukaan bumi kira-kira 20 m/detik.



2.5.2. *Return stroke* (sambaran kembali)

Ketika lidah kilat mengenai bumi, suatu sambaran kembali yang sangat terang bergerak keatas melalui jalan yang sama. *Return stroke* terjadi karena aliran muatan positif dari bumi ke awan atau aliran muatan negatif dari awan ke bumi.

Sesudah *return stroke* yang pertama, biasanya terjadi sambaran- sambaran berikutnya karena ada bagian lain dari awan mempunyai cukup banyak muatan. Arus pada setiap sambaran rata-rata 20 kA. Arus kilat ini merupakan arus impuls dimana harga puncak dicapai dalam beberapa mikro detik. Tempat-tempat di permukaan bumi yang kena smbaran kilat tergantung dari gradient potensial di bumi, dibawah perjalanan dari stepped leader, disamping tinggi dari tempat tersebut.

2.5.3. *Multiple stroke* (Sambaran yang berulang-ulang)

Sesudah *return stroke* yang pertama, biasanya masih ada pusat muatan yang lain diawan untuk memulai sambaran petir berikutnya. Sambaran ini dimulai dengan “*leader*” yang mengikuti jalan yang dilalui oleh *return stroke* sebelumnya.

Adapun ciri-cirinya sebagai berikut:

1. Tidak ada percabangan,
2. Tidak dapat dilihat dengan boys camera,
3. Kecepatannya amat cepat, kira-kira 3% kecepatan cahaya ($C=1000$ rf/udt)

Karena ciri-cirinya tidak ada percabangan, ia disebut juga lidah panah (*dart leader*). Dart leader memerlukan waktu 1 mili detik untuk mencapai bumi. Dart leader ini kemudian akan diikuti dengan *return stroke* berikutnya. Interval antara *return stroke* sebelumnya dengan dart leader adalah 40-50 milidetik. Biasanya suatu sambaran petir terdiri dari 4 atau 10 *return stroke*.



Kecepatan dari stepped leader kira-kira 0,01-0,7% kecepatan cahaya. Sedangkan dart leader kira-kira 0,13-10% kecepatan cahaya. Pada saat satu pusat muatan, mulai terjadi *stepped leader* yang bergerak menuju bumi. *Stepped leader* hampir mencapai bumi, sementara itu di bumi terjadi saluran muatan positif yang bergerak keatas. Saluran ini akan bertemu dengan *stepped leader* di titik pukulan (*point of strike*). *Return stroke* terjadi, muatan positif bergerak keatas dengan cepat sekali.

Pusat muatan pertama telah terdischarge. Saluran muatan positif berkembang menuju pusat muatan kedua. Discharge antara pusat muatan pertama dengan yang kedua. Dart leader bergerak menuju bumi melalui jalan yang telah dilalui oleh *return stroke* tadi. Terjadi *return stroke* yang kedua. Discharge terjadi antara bumi dengan muatan negatif dibagian bawah dari awan.

2.6. Arrester

Arrester adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk melindungi peralatan listrik terhadap tegangan lebih akibat surja petir dan surja hubung serta mengalirkan arus surja ke tanah.

Pada umumnya pusat pembangkit tenaga listrik menyalurkan energinya melalui saluran transmisi udara dimana saluran transmisi tenaga listrik yang terpasang di udara ini sangatlah rentan terhadap gangguan yang disebabkan oleh sambaran petir. Sambaran petir ini akan menghasilkan gelombang berjalan (Surja Tegangan) pada saluran transmisi dan pada akhirnya dapat masuk kepusat pembangkit tenaga listrik.

Gelombang berjalan (surja tegangan) selain dihasilkan oleh gangguan petir, juga dapat terjadi karena adanya pembukaan dan penutupan pemutus tenaga listrik (*Open Closing Circuit Breaker*) atau adanya *switching* pada jaringan tenaga listrik. Pada sistem Tegangan Ekstra Tinggi (TET) yang besarnya di atas 350 kV-500 kV untuk standar tranmisi udara tegangan ekstra tinggi/SUTET di Indonesia), surja tegangan ini lebih banyak disebabkan oleh *switching* tenaga listrik pada jaringan dibandingkan yang disebabkan oleh gangguan petir.



Saluran udara yang keluar dari pusat pembangkit listrik merupakan bagian instalasi pusat pembangkit listrik yang paling rawan sambaran petir dan karenanya harus diberi lightning arrester. Selain itu, lightning arrester harus berada di depan setiap transformator dan harus terletak sedekat mungkin dengan transformator.

Hal ini perlu karena pada petir yang merupakan gelombang berjalan menuju ke transformator akan melihat transformator sebagai suatu ujung terbuka (karena transformator mempunyai isolasi terhadap bumi/tanah) sehingga gelombang pantulannya akan saling memperkuat dengan gelombang yang datang. Berarti transformator dapat mengalami tegangan surja dua kali besarnya tegangan gelombang surja yang datang. Untuk mencegah terjadinya hal ini, lightning arrester harus dipasang sedekat mungkin dengan transformator.

Arrester ini akan bekerja pada tegangan tertentu di atas dari tegangan operasi yang berfungsi untuk membuang muatan listrik dari surja petir dan berhenti beroperasi pada tegangan tertentu di atas tegangan operasi agar tidak terjadi arus pada tegangan operasi. Perbandingan dua tegangan ini disebut juga rasio proteksi arrester. Tingkat isolasi bahan arrester harus berada di bawah tingkat isolasi bahan transformator agar apabila sampai terjadi *flashover*, maka *flashover* diharapkan terjadi pada arrester dan tidak pada transformator.

Rating arus arrester ditentukan dengan mempelajari statistik petir setempat. Misalnya di suatu tempat mempunyai data statistik yang menyatakan probabilitas petir yang terbesar adalah 15 kA, maka rating arrester yang dipilih adalah 15 kA.⁵

⁵Nugraha Adi. 2015. *Evaluasi Jarak Penempatan Arrester Terhadap Transformator Daya 30 MVA 70/20 KV*. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang



2.6.1. Prinsip Kerja Arrester

Pada prinsipnya arrester membentuk jalan yang mudah dilalui oleh petir, sehingga tidak timbul tegangan lebih yang tinggi pada peralatan. Pada kondisi normal arrester berlaku sebagai isolasi tetapi bila timbul surja, arrester berlaku sebagai konduktor yang berfungsi melewatkan aliran arus yang tinggi ke tanah. Setelah itu hilang arrester harus dengan cepat kembali menjadi isolator.

Batas atas dan bawah dari tegangan percikan ditentukan oleh tegangan sistem maksimum dan oleh tingkat isolasi peralatan yang dilindungi. Sering kali masalah ini dapat dipecahkan hanya dengan menerapkan cara – cara khusus pengaturan tegangan (*voltage control*) oleh karena itu sebenarnya arrester terdiri dari tiga unsur diantaranya yaitu :

1. Sela api (*spark gap*)
2. Tahanan kran atau tahanan katup (*valve resistor*)
3. Sistem pengaturan atau pembagian tegangan (*grounding system*)

Jika hanya melindungi isolasi terhadap bahaya kerusakan karena gangguan dengan tidak memperdulikan akibatnya terhadap pelayanan, maka cukup dipakai sela batang yang memungkinkan terjadinya percikkan pada waktu tegangannya mencapai keadaan bahaya.

Dalam hal ini, tegangan sistem bolak – balik akan tetap mempertahankan busur api sampai pemutus bebannya dibuka. Dengan menyambung sela api ini dengan sebuah tahanan, maka mungkin apinya dapat dipadamkan. Tetapi bila tahanannya mempunyai harga tetap, maka jatuh tegangannya menjadi besar sekali sehingga maksud untuk meniadakan tegangan lebih tidak terlaksana, dengan akibat bahwa maksud melindungi isolasi pun gagal.

Oleh sebab itu dipakailah tahanan kran (*valve resistor*), yang mempunyai sifat khusus bahwa tahanannya kecil sekali bila tegangannya dan arusnya besar. Proses pengecilan tahanan berlangsung cepat sekali yaitu selama tegangan lebih mencapai harga puncaknya. Tegangan lebih dalam hal ini mengakibatkan penurunan drastic dari pada tahanan sehingga jatuh tegangannya dibatasi



meskipun arusnya besar.

Bila tegangan lebih habis dan tinggal tegangan normal, tahanannya naik lagi sehingga arus susulannya dibatasi kira – kira 50 ampere. Arus susulan ini akhirnya dimatikan oleh sela api pada waktu tegangan sistemnya mencapai titik nol yang pertama sehingga alat ini bertindak sebagai sebuah kran yang menutup arus, dari sini didapatkan nama tahanan kran.

Pada arrester modern pemandangan arus susulan yang cukup besar (200 – 300 A) dilakukan dengan bantuan medan magnet. Dalam hal ini, maka baik amplitude maupun lamanya arus susulan dapat dikurangi dan pemadamannya dapat dilakukan sebelum tegangan system mencapai harga nol.

Dapat ditambahkan bahwa arus susulan tidak selalu terjadi tiap kali arrester bekerja, ada tidaknya tergantung dari saat terjadinya tegangan lebih. Hal ini dapat dimengerti karena arus susulan itu justru dipadamkan pada arus nol yang pertama atau sebelumnya.¹

2.6.2. Syarat Pemasangan Arrester

Sebelum melakukan instalasi arrester, ada beberapa persyaratan yang harus dipenuhi, diantaranya adalah:

1. Tegangan percikan (*sparkover voltage*) dan tegangan pelepasannya (*discharge voltage*), yaitu tegangan pada terminalnya pada waktu pelepasan, harus cukup rendah, sehingga dapat mengamankan isolasi peralatan. Tegangan percikan sering disebut juga dengan tegangan gagal sela (*gap breakdown voltage*) sedangkan tegangan pelepasan disebut juga tegangan sisa (*residual voltage*) atau jatuh tegangan (*voltage drop*).
2. Arrester harus mampu memutuskan arus dinamik dan dapat bekerja terus seperti semula. Batas dari tegangan sistem dimana arus susulan ini masih mungkin, disebut tegangan dasar (*rated voltage*) dari arrester.³

¹Artono Arismunandar. Teknik Tegangan Tinggi. Pradnya Paramita 1978 hal 107

³DR.A.Arismunandar dan DR,S.Kuwahara. Teknik Tenaga Listrik jilid III hal. 32



2.6.3. Jenis Jenis Lightning Arrester

Berdasarkan Letak Pemasangan, Arrester dibagi menjadi 3 bagian yaitu :

a. Arrester GIS (*Gas Insulated Switchgear*)

Gardu Induk GIS (*Gas Insulated Switchgear*) adalah suatu gardu induk yang semua peralatan - peralatan switchgearnya berisolasikan gas SF-6 , karena sebagian besar peralatannya terpasang di dalam gedung.



Gambar 2.14 Arrester di GIS

b. Arrester Saluran Transmisi

Arrester ini dipasang baik parallel dengan insulator pada tower (umumnya diserikan dengan spark gap) atau dipasang pada konduktor sebagai pengganti damper dilengkapi dengan *disconnecter switch*.



Gambar 2.15 Arrester di Saluran Transmisi

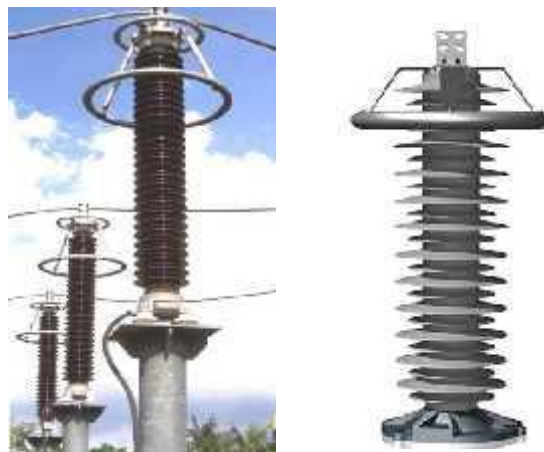


Sementara untuk arrester tanpa spark gap, dipasang pada konduktor terhubung ke ground, dilengkapi dengan *disconnector switch* yang akan bekerja bila telah terjadi arus di atas nilai nominalnya, arrester line jenis ini juga dilengkapi dengan counter sehingga memudahkan proses monitoring.

c. Arrester Gardu Induk

Merupakan Arrester kebanyakan yang terpasang di Gardu Induk, menurut material penyusun housing, material Gardu Induk dibedakan menjadi:

1. insulator porselen
2. insulator polimer



Gambar 2.16 Lightning Arrester di Gardu Induk

Adapun jenis-jenis arrester dikelompokkan menjadi dua yaitu sebagai berikut:

1) Arrester jenis ekspulsi atau tabung pelindung (*Protector Tube*)

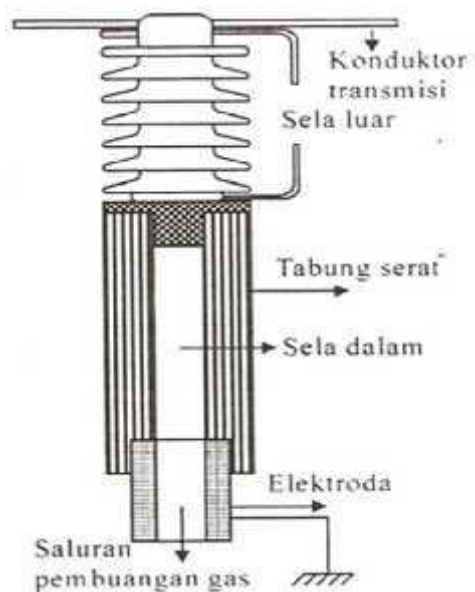
Pada prinsipnya terdiri dari sela percik yang berada dalam tabung serat dan sela percik yang berada diluar diudara atau disebut juga sela seri. Bila ada tegangan surja yang tinggi sampai pada jepitan arrester kedua sela percik, yang diluar dan yang berada didalam tabung serat, tembus seketika dan membentuk jalan penghantar dalam bentuk busur api.



Jadi arrester menjadi konduktor dengan impedansi rendah dan melalukan surja arus dan arus daya sistem bersama – sama. Panas yang timbul karena mengalirnya arus petir menguapkan sedikit bahan tabung serat, sehingga gas yang ditimbulkannya menyembur pada api dan mematakannya pada waktu arus susulan melewati titik nolnya.

Arus susulan dalam arrester jenis ini dapat mencapai harga yang tinggi sekali tetapi lamanya tidak lebih dari 1 (satu) atau 2 (dua) gelombang, dan biasanya kurang dari setengah gelombang. Arrester jenis ekspulsi ini mempunyai karakteristik volt – waktu yang lebih baik dari sela batang dan dapat memutuskan arus susulan.

Tetapi tegangan percik impulsnya lebih tinggi dari arrester jenis katup. Arrester jenis ini banyak juga digunakan pada saluran transmisi untuk membatasi besar surja yang memasuki gardu induk. Dalam penggunaan yang terakhir ini arrester jenis ini sering disebut sebagai tabung pelindung.



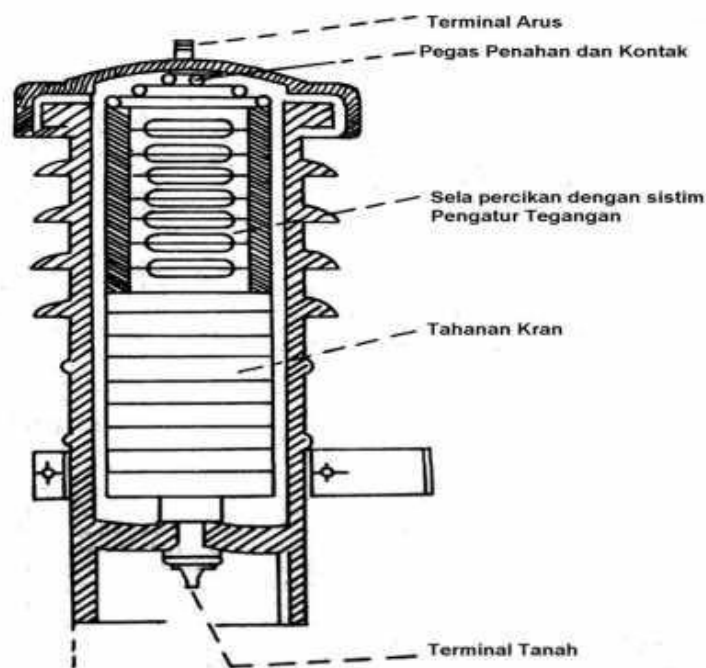
Gambar 2.17 Arrester jenis ekspulsi⁵

⁵Nugraha Adi. 2015. *Evaluasi Jarak Penempatan Arrester Terhadap Transormator Daya 30 MVA 70/20 KV*. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang



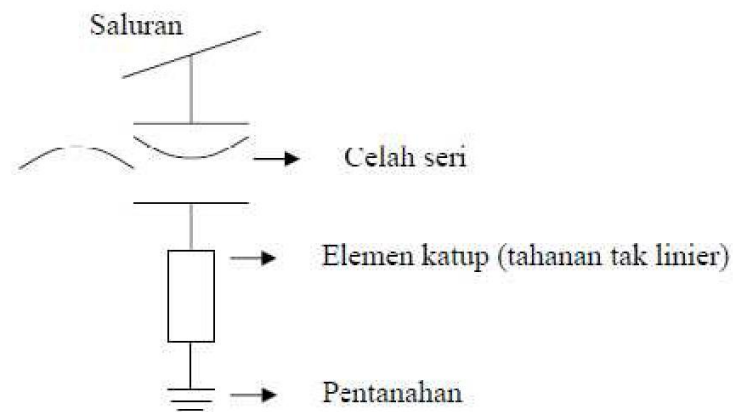
2) Arrester jenis katup (*valve type*)

Arrester jenis katup ini terdiri dari sela pecik terbagi atau sela seri yang terhubung dengan elemen tahanan yang mempunyai karakteristik tidak linier. Tegangan frekuensi dasar tidak dapat menimbulkan tembus pada sela seri. Apabila sela seri tembus pada saat tibanya suatu surja yang cukup tinggi, alat tersebut menjadi pengahantar. Sela seri itu tidak bias memutuskan arus susulan. Dalam hal ini dibantu oleh tak linier yang mempunyai karakteristik tahanan kecil untuk arus besar dan tahanan besar untuk arus susulan dari frekuensi dasar terlihat pada karakteristik volt ampere.



Gambar 2.18 *Valve Type Lightning Arrester.*¹

¹ Artono Arismunandar. Teknik Tegangan Tinggi. Pradnya paramita 1978. Hal. 108

Gambar 2.19 Konstruksi *Valve Type Arrester*

Arrester jenis katup ini dibagi dalam tiga jenis yaitu :

a. Arrester katup jenis gardu (*station*)

Arrester katup jenis gardu ini adalah jenis yang paling efisien dan juga paling mahal. Perkataan “ gardu “ disini berhubungan dengan pemakaiannya secara umum pada gardu induk besar. Umumnya dipasang pada sistem tegangan 3 kV – 312 kV dan dirancang untuk mengalirkan arus petir diatas 100 kA. Dan digunakan untuk melindungi gardu induk dan transformator dayai

b. Arrester katup jenis saluran (*intermediate*)

Arrester jenis saluran ini lebih murah dari arrester jenis gardu. Kata “saluran” disini bukanlah berarti untuk saluran transmisi. Arrester jenis saluran ini dipasang pada sistem 20 kV – 73 kV dan dirancang untuk mengalirkan arus petir 65 – 100 kA. Dan digunakan untuk melindungi transformator distribusi, transformator kapasitas rendah dan gardu kecil.

c. Arrester katup jenis distribusi untuk mesin – mesin (*distribution*)

Arrester jenis gardu ini khusus untuk melindungi mesin – mesin berputar. Pemakaiannya untuk tegangan 2,4 kV sampai 15 kV. Arrester jenis distribusi ini khusus melindungi mesin – mesin berputar seperti diatas dan juga melindungi transformator dengan pendingin udara tanpa minyak.



2.7. Karakteristik Arrester

Adapun karakteristik dari Arrester adalah sebagai berikut :

- a. Arrester juga mempunyai karakteristik yang dibatasi oleh tegangan (*voltage - limiting*) bila dilalui oleh berbagai macam arus petir.
- b. Arrester mempunyai batas termis.
- c. Pada sistem tegangan normal, arrester tidak boleh bekerja.
- d. Arrester harus mampu melakukan arus terpa ke tanah tanpa merusak arrester itu sendiri.

Pada keempat karakteristik ini, cirri arrester yang kedua sering kurang mendapat perhatian yang cukup yaitu batas termisnya. Batas termis yang dimaksud adalah kemampuan untuk melakukan arus surja yang berwaktu lama dan terjadi berulang-ulang. Misalnya surja hubung, tanpa menaikkan suhunya. Meskipun kemampuan arrester untuk menyalurkan arus sudah mencapai kisaran 65.000 – 100.000 ampere, tetapi kemampuannya untuk melakukan surja hubung, terutama bila saluran menjadi panjang dan berisi tenaga besar adalah lebih penting lagi.¹

¹Artono Arismunandar. Teknik Tegangan Tinggi. Pradnya paramita 1978 hal 110



2.8. Penempatan Arrester

Meskipun yang paling baik adalah menempatkan arrester sedekat mungkin dengan alat yang dilindungi, tetapi dalam praktek kadang-kadang hal ini tidak memungkinkan. Arrester ditempatkan sedekat mungkin dengan peralatan yang dilindungi dengan tujuan sebagai berikut :

1. Untuk mengurangi peluang tegangan impuls merambat pada kawat penghubung arrester dengan peralatan yang dilindungi.
2. Saat arrester bekerja, gelombang tegangan impuls sisa merambat pada kawat penghubung transformator dengan arrester. Setelah gelombang tegangan itu tiba pada terminal transformator, gelombang tegangan tersebut akan dipantulkan, sehingga total tegangan pada terminal arrester dua kali tegangan sisa. Peristiwa ini dapat dicegah jika arrester dipasang langsung pada terminal transformator.
3. Jika kawat penghubung arrester dengan transformator yang dilindungi cukup panjang, maka induktansi kawat itu harus diperhitungkan.² Jika ada kapasitor pada terminal peralatan yang dilindungi, maka kecuraman gelombang tegangan impuls yang menuju peralatan akan berkurang.

Adapun rumus yang akan digunakan adalah sebagai berikut :

$$E_t = E_a + 2 \frac{\mu X}{V} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

E_t = tegangan terminal dari peralatan yang dilindungi (KV).

E_a = tegangan pelepasan dari arrester (KV).

μ = kecuraman muka gelombang dari gelombang yang datang.

V = kecepatan rambat gelombang yang datang (di udara = 300 m/ μ s).

X = jarak dari arrester ke transformator (m).

²Bongas L.Tobing. Peralatan Tegangan Tinggi. Edisi Kedua. Hal 77



2.9. Tegangan Dasar Arrester

Tegangan dasar arrester dapat ditentukan berdasarkan tegangan sistem maksimum yang mungkin terjadi. Rumus yang digunakan adalah :

$$E_r = \alpha \beta U_m \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

E_r = Tegangan dasar arrester

α = Koefisien pembumian

β = Toleransi

U_m = Tegangan sistem maksimum

Koefisien α akan bernilai 0,8 apabila sistem pembumiannya ditanahkan langsung. Dan jika sistem pembumiannya tidak ditanahkan langsung, maka nilai koefisien α adalah 1. Adapun toleransi diatas itu digunakan untuk memperhitungkan fluktuasi tegangan yang bernilai 1,1 yang diambil 110 % dari tegangan nominal sistem.³

³ DR.A.Arismunandar dan S.Kuwahara. Teknik Tenaga Listrik jilid III Hal. 33 - 41