



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gardu Induk

Gardu induk adalah alat penghubung listrik dari jaringan transmisi ke jaringan distribusi primer yang konstruksinya dapat dilihat pada gambar 2.1. Gardu Induk merupakan sub sistem dari sistem penyaluran (transmisi) tenaga listrik, atau merupakan satu kesatuan dari sistem penyaluran yang disusun menurut pola tertentu dengan pertimbangan teknis, ekonomis, serta keindahan.



Gambar 2.1 Gardu Induk

2.2 Klasifikasi Gardu Induk

Klasifikasi Gardu Induk bisa dibedakan menjadi beberapa bagian yaitu :

2.2.1 Berdasarkan Besaran Tegangannya.

Berdasarkan besaran tegangannya, terdiri dari :

- Gardu Transmisi adalah gardu induk yang tegangannya berupa tegangan ekstra tinggi atau tegangan tinggi.



- Gardu Distribusi adalah gardu induk yang menerima suplai tenaga dari gardu induk transmisi untuk diturunkan tegangannya melalui trafo daya menjadi tegangan menengah (20 kV)

2.2.2 Berdasarkan Pemasangan Peralatan.

Gardu induk (biasanya di singkat G.I). Gardu induk dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu jenis pasangan luar, jenis pasangan dalam, jenis pasangan setengah luar, jenis bawah tanah, jenis mobil dan sebagainya, sesuai dengan konstruksinya.

- **Gardu induk pemasangan luar**

Gardu induk jenis pasangan luar terdiri dari peralatan tegangan tinggi pasangan luar misalnya, transformator utama, peralatan penghubung (switch gear) dan sebagainya yang mempunyai peralatan kontrol pasangan dalam, seperti meja penghubung (switch board) dan baterai. Gardu induk untuk transmisi yang mempunyai kondensator sinkron pasangan dalam pada sisi tersier trafo utama dan trafo pasangan dalam, pada umumnya disebut juga sebagai pasangan luar. Jenis pasangan luar memerlukan tanah yang luas, namun biaya konstruksinya murah dan pendinginnya mudah. Karena itu gardu induk jenis ini biasa dipakai di pinggir kota dimana harga tanah murah.

- **Gardu induk pemasangan dalam**

Dalam gardu induk jenis pasangan dalam ini, baik peralatan tegangan tinggi, seperti trafo utama, peralatan penghubung dan sebagainya, maupun peralatan kontrolnya, seperti meja penghubung dan sebagainya terpasang didalam. Meskipun ada sejumlah kecil peralatan terpasang diluar gardu induk, ini disebut juga sebagai pasangan dalam.

Bila sebagian dari peralatan tegangan tingginya dipasang dibawah tanah, gardu induk ini dapat disebut jenis pasangan setengah bawah tanah (semi underground type). Jenis pasangan dalam dipakai dipusat kota dimana harga tanah mahal dan didaerah pantai dimana ada pengaruh kontaminsi garam.



Disamping itu jenis ini mungkin dipakai untuk menjaga keselarasan dengan daerah sekitarnya juga untuk menghindari kebakaran dan gangguan suara.

- **Gardu induk setengah pemasangan luar**

Dalam gardu induk jenis setengah pasangan luar (semi outdoor substation) sebagian dari peralatan tegangan tingginya terpasang didalam gedung. Gardu induk jenis ini dipakai bermacam-macam corak dengan pertimbangan- pertimbangan ekonomis, pencegahan kontaminasi garam, pencegahan gangguan suara, pencegah kebakaran dan sebagainya.

- **Gardu induk pemasangan bawah tanah**

Dalam gardu induk jenis pasangan bawah tanah hampir semua peralatan terpasang dalam bangunan bawah tanah. Alat pendinginnya biasanya terletak diatas tanah. Kadang-kadang ruang kontrolnya juga terletak diatas tanah. Dipusat kota, dimana tanah sukar didapat, jenis pasangan bawah tanah ini dapat dipakai, misalnya dibagian kota yang sangat ramai, di jalan-jalan pertokoan dan di jalan- jalan dengan gedung bertingkat tinggi. Kebanyakan gardu induk ini dibangun di jalan raya.

- **Gardu induk jenis mobil**

Gardu induk jenis mobil dilengkapi dengan peralatan diatas kereta hela (trailer) atau semacam truck. Gardu induk jenis mobil ini dipakai dalam keadaan ada gangguan di suatu gardu induk, guna pencegahan beban lebih berkala dan guna pemakaian sementara ditempat pembangunan. Gardu induk ini juga banyak dipakai untuk kereta listrik. Untuk penyediaan tenaga listrik, gardu induk ini tidak dipakai secara luas, melainkan sebagai tansformator atau peralatan penghubung yang mudah dipindah-pindahdiats kereta hela atau truck untuk memenuhi kebutuhan dalam keadaan darurat.

Selain gardu-gardu induk yang diatas, ada juga gardu induk yang disebut gardu satuan (unit substation) dan gardu jenis peti (box type substation). Gardu satuan adalah gardu pasangan luar yang dipakai sebagai lawan (ganti)



transformator tiga fasa dan lemari gardu distribusi (yaitu yang disebut gardu hubung tertutup atau gardu hubung metal clad). Gardu jenis peti adalah gardu distribusi untuk tegangan dan kapasitas relatif rendah dan sama sekali dijaga. Ini dipakai untuk desa-desa pertanian atau desa nelayan dimana kebutuhannya kecil dan merupakan beban yang tidak begitu penting.¹

Didalam gardu induk terdapat pengaman yang digunakan untuk melindungi trafo utama dari tegangan lebih akibat surja, baik surja petir maupun surja hubung yang disebut arrester.²

2.3 Fasilitas dan Peralatan Pada Gardu Induk

Gardu induk dilengkapi fasilitas dan peralatan yang diperlukan sesuai dengan tujuannya, dan mempunyai fasilitas untuk operasi dan pemeliharannya, sebagai berikut :

2.3.1 Trafo Utama

Digunakan untuk menurunkan atau menaikkan tegangan. Di gardu induk trafo menurunkan tegangan, di pusat pembangkit trafo menaikkan tegangan.

Ada 2 jenis transformator 1 fasa dan 3 fasa. Seiring berjalannya waktu kemajuan dalam teknik pembuatan trafo, dan keandalannya makin baik, trafo 3 fasa banyak dipakai karena menguntungkan. Demikian pula halnya dengan pengubah penyalur berbeban, kemampuan makin baik, lebih awet dan pemeliharannya mudah. Oleh karena itu makin banyak dipakai pengubah penyalur beban untuk gardu induk tegangan sangat tinggi. Untuk sistem rangkaian tertutup (loop) kadang-kadang dipakai transformator dengan pengubah fasa berbeban untuk mengukur aliran daya.

¹ Dr. A. Arismunandar, Dr. S. Kuwahara, *Teknik Tenaga Listrik III*, [Jakarta:Pt Pradnya Paramita, 1997], hh. 1-2

² Dr. A. Arismunandar, Dr. S. Kuwahara, *Teknik Tenaga Listrik III*, [Jakarta:Pt Pradnya Paramita, 1975], h.1



Transformator dapat dibedakan menjadi tiga (3) macam, yaitu :

a. Transformator Daya

Trafo daya memiliki peran sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik harus bertegangan tinggi agar rugi-rugi daya tidak melebihi rugi-rugi yang diinginkan. Maka, dibutuhkan trafo daya untuk menyalurkan daya dari generator tegangan menengah ke transmisi bertegangan tinggi, dan untuk menyalurkan daya ke transmisi bertegangan tinggi ke jaringan distribusi. Kebutuhan trafo daya bertegangan tinggi dan berkapasitas besar, menimbulkan persoalan dalam perencanaan isolasi, ukuran dan bobotnya.³

- Pengujian Trafo Daya

Harga suatu trafo daya tegangan tinggi relatif mahal disbanding dengan harga komponen lain dalam sistem tenaga listrik. Di samping itu, trafo daya harus memiliki keandalan yang tinggi agar kesinambungan pelayanan sistem tenaga listrik tetap terjamin. Oleh karena itu, pengujian trafo daya sebelum terpasang dan sesudah beroperasi mutlak dilakukan. Pengujian trafo daya dibagi atas jenis, yaitu:

- ✓ Uji rutin
- ✓ Uji jenis
- ✓ Uji tambahan

IEC telah mengeluarkan standar pengujian suatu trafo. Dalam standar ini dapat ditemukan tentang kondisi pengujian, hal-hal yang perlu diuji dan prosedur pelaksanaan. Secara umum, pengujian rutin trafo meliputi hal-hal sebagai berikut:

- ✓ Pengukuran resistensi belitan
- ✓ Pengukuran rasio, polaritas dan hubungan fasa
- ✓ Impedansi hubung singkat
- ✓ Rugi-rugi berbeban

³ Bonggas L. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi*, [Jakarta:Erlanga,2012], h. 193



-
- ✓ Rugi beban nol dan arus beban nol
 - ✓ Resistansi isolasi
 - ✓ Pengujian ketahanan tegangan lebih dengan induksi
 - ✓ Pengujian ketahanan tegangan lebih dengan sumber terpisah.⁴

b. Transformator Arus

Transformator arus digunakan untuk pengukuran arus yang besarnya ratusan ampere dan arus yang mengalir dalam jaringan tegangan tinggi. Jika arus yang hendak diukur mengalir pada jaringan tegangan rendah dan besarnya di bawah 5A, maka pengukuran dapat dilakukan secara langsung dengan menggunakan suatu ammeter yang dihubungkan seri dengan jaringan. Tetapi jika arus yang hendak diukur mengalir pada jaringan tegangan tinggi, meskipun besarnya di bawah 5A, maka pengukuran tidak dapat dilakukan secara langsung dengan menggunakan suatu ammeter, karena cara yang demikian berbahaya bagi operator⁵.

c. Transformator Tegangan

Trafo tegangan adalah trafo satu fasa step-down yang mentransfortasikan tegangan sistem ke suatu tegangan rendah yang besarnya sesuai untuk lampu indikator, alat ukur, relai dan alat sinkronisasi. Transformasi tegangan ini dilakukan atas pertimbangan harga peralatan tegangan tinggi yang mahal, dan bahaya yang dapat ditimbulkan tegangan tinggi bagi operator.

Tegangan perlengkapan seperti indikator, meter dan relai dirancang samadengan tegangan terminal sekunder trafo tegangan yang dirancang dalam ratusan volt.⁶

2.3.2 Alat Pengubah Fasa

Dipakai untuk mengatur jatuh tegangan pada saluran atau transformator dengan mengatur daya reaktif, atau untuk menurunkan rugi daya dengan

⁴ Bonggas L. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi*, [Jakarta:Erlanga,2012], h. 209

⁵ Bonggas L. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi*, [Jakarta:Erlanga,2012], h. 116

⁶ Bonggas L. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi*, [Jakarta:Erlanga,2012], h. 97



memperbaiki faktor daya.

Alat tersebut diklasifikasikan menjadi 3 yaitu : kondensator putar, kapasitor shunt dan reactor shunt. Untuk kondensator putar ada jenis sinkron dan asinkron. Yang pertama disebut kondensator sinkron yang umum dipakai. Dibandingkan dengan yang pertama yang kedua mempunyai keuntungan yang lebih besar antara lain, karena dapat dimulai (start) lebih mudah.⁷

Tabel 2.1 Tegangan dan kapasitas pengubah fasa

Jenis	Tegangan (KV)	Kapasitas (MVA)
Kondensator Sinkron	11 – 16,5	10 – 80
Kapasitor Shunt	3,3 – 6,6	0,6 – 1,2
Kapasitor Shunt	11 – 77	5 – 40
Reaktor Shunt	11 – 77	10 – 48

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 inter koneksi dari sistem transmisi dan distribusi kepada para pelanggan. Saluran transmisi dan distribusi ini di hubungkan dengan ril (bus) melalui transformator utama, setiap saluran mempunyai pemutus beban (*circuit breaker*) dan pemisah (*disconnect switch*) pada sisi keluarannya. Pemutus beban ini dipakai untuk menghubungkan atau melepaskan beban secara otomatis. Jika saluran transmisi dan distribusi, transformator, pemutus beban, dan sebagainya mengalami perbaikan atau pemeriksaan dipakai untuk memisahkan saluran dan peralatan tadi. Pemutus beban dan pemisah dinamakan peralatan penghubung (*switchgear*).⁸

⁷ Dr. A. Arismunandar, Dr. S. Kuwahara, *Teknik Tenaga Listrik III*, [Jakarta:Pt Pradnya Paramita, 1997], hh. 22-23

⁸ Dr. A. Arismunandar, Dr. S. Kuwahara, *Teknik Tenaga Listrik III*, [Jakarta:Pt Pradnya Paramita, 1997], h. 3



Peralatan penghubung dapat dibedakan menjadi :

1. Pemutus Beban

Pemutus beban mempunyai beberapa pengenal (*rating*) dasar sebagai berikut :

- Arus pemutus dasar
- Arus pemutusan dasar asimetris
- Kapasitas pemutusan dasar

Kapasitas pemutusan dasar bersangkutan dengan arus pemutusan dasar komponen yang simetris. Yang bersangkutan dengan arus pemutusan dasar asimetris adalah kapasitas pemutusan asimetris.

Waktu pemutusan dasar, yaitu jumlah dari waktu buka kontak dan waktu berlangsungnya busur api. Waktu buka adalah jangka waktu mulai dari dimuatinya kumparan pembuka sampai terbukanya kontak dari pemutus beban itu.⁹

2. Pemisah

Pemilihan jenis pemisah ditentukan oleh lokasi, tata bangunan luar dan sebagainya. Pada umumnya yang sering dipakai untuk tegangan di atas 72 KV adalah jenis pemutus tunggal mendatar, jenis pemutus tunggal tegak dan jenis pemutus ganda.

3. Saklar beban

Saklar beban tidak dapat memutuskan arus gangguan, tetapi dapat memutuskan arus beban. Ini menguntungkan apabila pemutus tenaga di pasang pada rangkaian utamanya dan pada saluran-saluran cabangnya dipasang saklar beban. Saklar beban dapat berfungsi hamper sama dengan pemutus tenaga. Cara memadamkan dengan pemutus busur (*arc chute*) dan cara memadamkan busur dengan gas SF₆ dalam ruang yang tertutup.

⁹ Dr. A. Arismunandar, Dr. S. Kuwahara, *Teknik Tenaga Listrik III*, [Jakarta:Pt Pradnya Paramita, 1997], hh. 24-25



4. Sekring tenaga

Sekring tenaga (power fuse, disebut juga pengaman lumer) banyak dipakai untuk pengamanan terhadap hubung singkat dan beban lebih. Konstruksinya jauh lebih sederhana dari pada pemutus beban, tetapi kemampuannya sama dengan gabungan antara pemutus beban dan relenya. Kerugiannya adalah bahwa ia tidak dapat memutus ketiga fasa bersama-sama dan harus diganti dengan yang baru setiap kali ia terputus.

2.3.4 Panel Kontrol dan Kotak Hubung Tertutup

- Panel Kontrol

Jenis-jenis panel kontrol dalam gardu induk adalah panel kontrol utama, panel rele dan panel pemakaian sendiri. Panel kontrol utama kadang-kadang dibagi lebih lanjut ke dalam panel instrumen dan panel operasi. Pada panel instrumen terpasang dan penunjuk gangguan, dari sinilah keadaan operasi dapat diawasi. Pada panel operasi terpasang saklar operasi dari pemutus tenaga dan pemisah serta lampu penunjuk saklar.

Panel rele terpasang rele pengaman saluran transmisi, rele pengaman differensial trafo dan sebagainya. Bekerjanya rele dapat diketahui dari penunjukkan pada rele itu sendiri dan pada penunjuk gangguan di panel kontrol utama pada gardu induk yang besar dan modern dengan susunan ril yang sudah sangat rumit, mulai banyak dipakai panel dengan gambar yang bercahaya yang menggambarkan ril, pemutus tenaga, pemisah trafo dengan simbol bercahaya. Bagian sistem yang bekerja dibuat bercahaya dan berkedip pada waktu gangguan.¹⁰

¹⁰ Dr. A. Arismunandar, Dr. S. Kuwahara, *Teknik Tenaga Listrik III*, [Jakarta:Pt Pradnya Paramita, 1997], hh. 29-30



- Lemari Hubung

Lemari hubung atau cubicle terbuat dari kelas 3-30 KV, dan dipakai untuk pusat beban atau pusat daya (power center) karakteristiknya adalah :

- ✓ Bagian yang bertegangan tidak boleh terbuka.
- ✓ Gangguan tidak akan meluas sebab rangkaianannya terbagi dalam satuan- satuan.
- ✓ Luas instalasi kecil, pemasangan, perluasan dan pemindahan instalasinya mudah, dan
- ✓ Keandalan tinggi karena pemasangannya yang sempurna di pabrik.

Lemari hubung diklasifikasikan oleh perbedaan-perbedaan sistem rilnya kedalam jenis-jenis ril tunggal, ril rangkap dan ril penyimpang (by-pass). Untuk rangkaian pemakain gardu induk sendiri jenis yang sering dipakai adalah yang paling sederhana yaitu ril tunggal. Ada juga pemasangan luar dan jenis pemasangan dalam. Pada konstruksi jenis pemasangan luar, hujan dan angin tidak boleh masuk. Jenis pemasangan luar ini sekarang banyak di pakai karena tidak memerlukan bangunan.¹¹

¹¹ Dr. A. Arismunandar, Dr. S. Kuwahara, *Teknik Tenaga Listrik III*, [Jakarta:Pt Pradnya Paramita, 1997], hh. 30-32



2.4 Arrester

Arrester adalah alat pelindung bagi sistem tenaga listrik terhadap tegangan lebih yang disebabkan oleh petir atau surja hubung (switching surge). Alat ini digunakan sebagai jalan pintas (by-pass) sekitar isolasi. Arrester membentuk jalan yang mudah dilalui oleh arus kilat atau petir, sehingga tidak timbul tegangan lebih pada peralatan. Jalan pintas itu harus sedemikian rupa sehingga tidak mengganggu aliran arus daya sistem 50 hertz.



Gambar 2.2 Arrester Pada Gardu Induk Sungai Juara

Pada keadaan normal arrester berlaku sebagai isolator dan bila timbul tegangan surja alat ini bersisat sebagai konduktor yang tahanannya relatif rendah sehingga dapat mengalirkan arus ketanah. Setelah surja hilang, arrester harus dapat dengan cepat kembali menjadi isolator.

Sesuai dengan fungsinya, yaitu arrester melindungi peralatan listrik pada sistem jaringan terhadap tegangan tegangan lebih yang disebabkan petir atau surja hubung. (Buku Petunjuk Operasi dan Pemeliharaan Peralatan PT. PLN, 1)



2.4.1 Karakteristik Arrester yang Ideal

1. Pada tegangan sistem yang normal arrester tidak boleh bekerja. Tegangan tembus arrester pada frekuensi jala-jala (power frequency breakdown) harus lebih tinggi dari tegangan lebih sempurna yang mungkin terjadi pada sistem (single line to ground fault).
2. Setiap gelombang transien dengan tegangan puncak yang lebih tinggi dari tegangan tembus arrester (U_A/E_A) harus mampu mengerjakan arrester untuk mengalurkan arus ke tanah.
3. Arrester harus mampu melakukan arus terpa ke tanah tanpa merusak arrester itu sendiri dan tanpa menyebabkan tegangan pada terminal arrester lebih tinggi dari tegangan sumbernya sendiri.
4. Arus sistem tidak boleh mengalir ke tanah setelah gangguan diatasi (follow current). Follow current harus dipotong begitu gangguan telah lalu dan tegangan kembali normal.¹²

2.4.2 Bagian Arrester yang Penting

a. Elektroda

Elektroda-elektroda ini adalah terminal dari arrester yang dihubungkan dengan bagian yang bertegangan dibagian atas dan elektroda bawah dihubungkan dengan tanah.

b. Sela Percikan

Apabila terjadi tegangan lebih oleh sambaran petir atau surja hubung pada arrester yang terpasang, maka sela percikan (spark gap) akan terjadi loncatan busur api. Pada beberapa tipe arrester busur api yang terjadi tersebut ditiup keluar oleh tekanan gas yang ditimbulkan oleh tabung fiber yang terbakar.

¹² Dr. Ir. Dipl. –Ing. H. Reynaldo Zoro, *Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik*, [bandung:ITB], h. 68



c. Tahanan Katup

Tahanan yang digunakan dalam arrester ini adalah suatu jenis material yang sifat tahanannya akan berubah bila mendapatkan perubahan tegangan. (Buku Petunjuk Operasi dan Pemeliharaan Peralatan PT. PLN, 1-2)

2.5 Jenis-jenis Penangkal Petir yang Umum dipakai

2.5.1 Sela Batang (Rod Gap)

Merupakan alat pemotong petir yang paling sederhana berupa batang elektroda yang diletakkan antara hantaran dan tanah. Sela batang banyak digunakan bushing isolator dari trafo, isolator hambatan udara berupa tanduk api (Arching Horn) dan pemutus daya (Circuit Breaker). Untuk mencegah bunga api bergerak kearah isolator. Jarak antara sela dengan isolator tidak boleh kurang dari $\frac{1}{3}$ jarak sela.

Walaupun slabatang sangat murah dan sederhana, tetapi sela ini mempunyai batasan-batasan dalam penggunaannya, sebagai berikut :

- Sela batang tidak berfungsi jika gelombang datang mempunyai muka yang curam dan sela batang tidak memotong arus ikutan (follow current).
- Sela batang dapat meleleh akibat energi panas dengan temperature tinggi yang dilepas melalui bunga api karena tingginya muatan listrik (Q) dari terpa maka pada sistem tegangan tinggi diperlukan material-material dengan kekuatan isolasi yang tinggi.
- Karakteristik tembus dari sela batang sangat dipengaruhi oleh keadaan alam seperti kelembaban, temperatur dan tekanan.
- Sela batang sedikit banyak juga dipengaruhi oleh polaritas dari terpa. Sela batang merupakan jenis pemotong petir yang paling sederhana karena itu tidak dapat diandalkan sebagai pelindung utama terhadap terpa petir pada



sistem tenaga listrik dimana prioritas pelayanan daya dan perlindungan peralatan sangat diutamakan.

2.5.2 Expulsion Type Lightning Arrester (Protector Tube)

Merupakan tabung yang terdiri dari :

- a. Dinding tabung yang terbuat dari bahan yang mudah menghasilkan gas jika dilalui arus.
- b. Sela batang yang biasanya diletakkan pada isolator porselin, untuk mencegah arus mengalir dan membakar fiber pada tegangan jala-jala setelah gangguan diatasi.
- c. Sela pemutus bunga api diletakkan didalam tabung, salah satu elektroda dihubungkan ke tanah.

Tabung pelindung umumnya dipakai untuk melindungi isolator transmisi. Tipe ini dipakai pada tiang transmisi sebelum memasuki gardu untuk memotong besar arus terpa yang datang sehingga berfungsi mengurangi kerja dari arrester di gardu dan digunakan juga pada trafo-trafo kecil di pedesaan.

2.5.3 Valve Type lightning Arrester (Pemotong Petir Jenis Katup)

Arrester ini terdiri dari beberapa sela yang tersusun seri dengan piringan-piringan tahanan. Harga tahananannya turun dengan cepat pada saat arus surja mengalir sehingga tegangan antara terminal arrester tidak terlalu besar dan harga tahanan akan naik kembali jika arus surja sudah lewat sehingga membatasi arus ikutan (follow current). Sela api dari tahanan disusun secara seri dan ditempatkan didalam rumah porselin kedap air sehingga terlindungi dari kelembaban, kotoran dan hujan.

Sela api terdiri dari beberapa elemen yang tersusun seri, masing-masing mempunyai dua elektroda dengan alat pengionisasi awal, diantara dua elemen secara parallel dipasang tahanan dengan impedansi yang tinggi untuk mengatur tegangan antara masing-masing elemen. Jika terjadi perubahan tegangan yang lambat pada sistem, tahanan pengatur (grading resistors) akan



mampu mencegah terjadinya tembus antara fasa dan antara fasa ke tanah. Dan mencegah terjadinya tembus akibat gangguan pada sistem misalnya : tegangan tembus dalam (inter overvoltage) gangguan atau fasa ke tanah, penaikan tegangan pada ujung transmisi akibat efek Ferranti.¹³

2.6 Prinsip Kerja Arrester

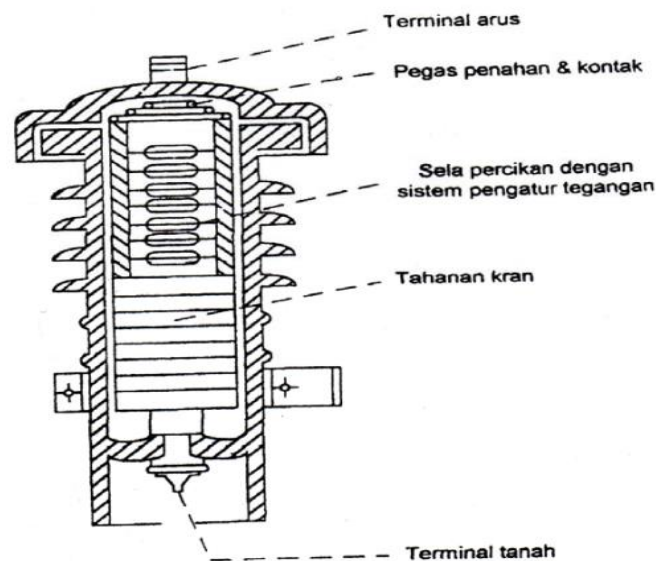
Pada pokoknya arrester ini terdiri dari dua unsur yaitu sela api (spark gap) dan tahanan tak linier atau tahanan kran (valve arrester). Keduanya dihubungkan secara seri. Batas atas dan batas bawah dari tegangan percik ditentukan oleh tegangan sistem maksimum dan tingkat isolasi peralatan (BIL) peralatan yang dilindungi. Untuk pengaturan atau pembagian tegangan yang lebih baik memakai arrester yang dilengkapi oleh sistem pengaturan tegangan.

Bila permasalahannya hanya melindungi isolasi terhadap bahaya kerusakan karena gangguan dengan tidak memperdulikan akibatnya terhadap pelayanan, maka cukup dipakai sela batang yang memungkinkan terjadinya percikan pada waktu tegangannya mencapai keadaan berbahaya. 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 tahanannya mempunyai harga tetap, maka jatuh tegangannya menjadi besar sehingga maksud untuk melindungi isolator pun gagal. Oleh sebab itu, dipakailah tahanan keran yang mempunyai sifat khusus bahwa tahanannya kecil sekali bila tegangannya dan arusnya besar.

Proses pengecilan tahanannya berlangsung cepat sekali yaitu selama tegangan lebih mencapai harga puncaknya. Tegangan lebih dalam hal ini mengakibatkan penurunan drastis dari pada tahanan sehingga jatuh tegangannya dibatasi meskipun arusnya besar.

¹³ Dr. Ir. Dipl. –Ing. H. Reynaldo Zoro, *Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik*, [bandung:ITB], hh. 68-72



Gambar 2.3 Bagian-Bagian Arrester

Bila tegangan lebih telah habis dan tegangan kembali normal, tahanannya naik kembali sehingga arus susulannya dibatasi sampai kira-kira 50 ampere. Arus susulan ini akan dimatikan oleh sela api pada waktu tegangan sistemnya mencapai titik nol pertama sehingga alat ini bertindak sebagai kran. Pada arrester modern pemadaman arus susulan yang cukup besar (200-300 A) dilakukan dengan bantuan medan magnet.¹⁴

2.7 Lokasi dari Arrester

Umumnya alat-alat perlindungan harus diletakkan sedekat mungkin dengan peralatan yang akan dilindungi, terutama pada ujung transmisi dimana terdapat gardu atau trafo. Karena biaya yang mahal maka tidak mungkin memasang penangkal petir pada setiap peralatan di gardu untuk melindungi peralatan tersebut. Hal ini tidak perlu dilakukan karena adanya factor perlindungan dari penangkal petir, oleh karena itu hanya peralatan-peralatan yang penting saja yang dilengkapi dengan penangkal petir. Trafo merupakan peralatan yang paling mahal dan paling penting dari suatu gardu induk. Jika trafo rusak maka perbaikan atau

¹⁴ Artono Arismunandar, Teknik tegangan Tinggi, [Jakarta:Pradnya Paramita, 1978], hh. 107-108



penggantian akan mahal, dan juga kerugian karena terputus daya cukup besar.

Selain trafo adalah ujung terminal dari suatu transmisi, tempat paling sering terjadi pemantulan gelombang, pada sistem 20 kV TID dari trafo dapat diperendah pada batas-batas yang diizinkan untuk memperkecil biaya isolasi. Hal ini tidak dapat dilakukan pada TID dari saklar pemutus ataupun CB, karna alasan-alasan tersebut diatas maka penangkal petir pada gardu induk umumnya dipasang pada terminal trafo daya.

Jika :

1. Sebuah gardu tidak dilindungi oleh kaat tanah terhadap sambaran langsung dari petir atau
2. Tidak cukupnya factor perlindungan antara TID dari trafo dengan tigkat perlindungan penangkap petir
3. TID trafo sudah dikurangi satu atau dua tingkat dibawah TID standart ¹⁵

2.8 Perlindungan Peralatan Gardu Induk Terhadap Gelombang Berjalan

Penggunaan kawat tanah pada hantaran dan gardu selain memberikan perlindungan yang baik terhadap sambaran petir juga dapat mengurangi gangguan tegangan lebih yang terjadi akibat induksi elektromagnetis dan induksi elektrostatik pada hantaran. Tetapi hal ini belum cukup baik untuk melindungi peralatan-peralatan dari gelombang berjalan yang masih dapat mencapai gardu induk dan menimbulkan kerusakan.

Untuk itu pada GI dipasang suatu pengamanan supaya dapat beroperasi sebagai fungsinya, dan supaya alat-alat yang terdapat di dalam GI juga tidak mudah rusak. Perlindungan gardu induk terbagi dalam 2 bagian :

1. Perlindungan terhadap sambaran langsung
2. Perlindungan terhadap gelombang yang datang dari kawat transmisi

Sepanjang perambatannya pada kawat transmisi, gelombang mengalami redaman dan distorsi yang disebabkan oleh korona, resistivitas, tanah pengaruh

¹⁵ Dr. Ir. Dipl. -Ing. H. Reynaldo Zoro, *Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik*, [bandung:ITB], h. 91



kulit dan gandingan. Selain itu, bentuknya juga dapat berubah karena pantulan ketika mencapai gardi. Redaman dimisalkan mengikuti formula empiris dari FOUST and Menger,

$$e = \frac{E}{1+KEx} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

e = Tegangan (kV) pada titik sejauh mil dari titik mula.

X = Jarak perambatan (mil)

E = Tegangan surja (kV) pada titik mula.

K = konstanta redaman

= 0,0001 untuk gelombang-gelombang (20μs)

= 0,0002 untuk gelombang-gelombang (5μs)

= 0,004 untuk gelombang-gelombang terpotong ¹⁶

Semakin tinggi tegangan, makin besar redaman dan gelombang-gelombang pendek diredam lebih cepat dari gelombang panjang.

Apabila surja dengan tegangan e mencapai gardu, terjadi pantulan dan tegangan puncak pada gardu menjadi :

$$e_2 = b e = \frac{b E}{1+KEx} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

$$b = \frac{\text{Puncak dari surja selama pantulan}}{\text{Puncak dari gelombang berjalan bebas}}$$

= indeks terusan

Jadi b merupakan perbandingan antara tegangan total selama pantulan dengan gelombang masuk.

2.9 Proses Terjadinya Petir

Pada keadaan tertentu, dalam atmosfer bumi terdapat gerakan angin ke atas membawa udara lembab. Mungkin tinggi dari muka bumi, makin rendah

¹⁶ Dr. A. Arrismunandar, Dr. S. Kuwahara, Teknik *Tenaga Listrik III*, [Jakarta:P.T. Pradnya Paramita,1979], h. 38



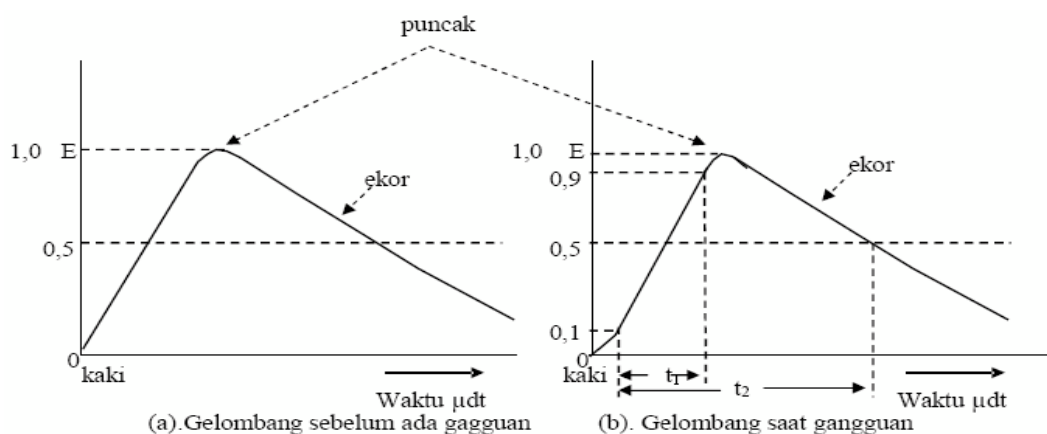
tekanan dan suhunya. Uap air mengkondensasikan menjadi titik air dan membentuk awan.

Angin keras yang meniup ke atas membawa awan lebih tinggi pada ketinggian 5 km, membeku menjadi kristal es yang turun karena adanya gravitasi bumi. Karena tetesan air mengalami pergeseran horizontal maupun vertikal, maka terjadilah pemisahan muatan listrik. Tetesan air yang bermuatan positif biasanya berada di bagian atas, dan yang bermuatan negatif berada di bawah.

Dengan adanya awan yang bermuatan akan timbul muatan induksi pada muka bumi, sehingga timbul medan listrik. Mengingat dimensinya, bumi dianggap rata terhadap awan, sehingga awan dan bumi dapat dianggap sebagai kedua plat kondensator. Jika medan listrik yang terjadi melebihi medan tembus udara, maka akan terjadi pelepasan muatan. Pada saat itulah terjadi petir.

Kondisi ketidakmampuan di dalam atmosfer, dapat saja timbul akibat pemisahan tidak seperti di atas. Misalnya muatan yang terjadi bekisar ke arah horizontal, yang kemudian menimbulkan pelepasan muatan antara dua awan atau pemisahan muatan vertikal tersebut terjadi sebaliknya, sehingga arah discharge muatan atau petir yang terbalik.¹⁷

Bentuk umum suatu gelombang berjalan adalah sebagai berikut :



Gambar 2.4 Spesifikasi gelombang berjalan

¹⁷ Dr. Ir. Dipl. -Ing. H. Reynaldo Zoro, *Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik*, [bandung:ITB], h. 3



Keterangan :

E : Puncak Gelombang

T_1 : Muka Gelombang

T_2 : Panjang Ekor Gelombang

Muka gelombang didefinisikan sebagai bagian gelombang yang dimulai dari titik nol (nominal) sampai titik puncak, sedangkan bagian dibelakang puncak disebut ekor gelombang. Setengah puncak gelombang adalah titik-titik pada muka dan ekor dimana tegangannya adalah setengah puncak (titik 0.5 pada gambar 2.4). Menurut standar IEC lamanya muka gelombang didefinisikan sebagai hasil bagi antara lamanya tegangan naik dari 30% sampai 90% dari puncak.

2.9.1 Spesifikasi dari Suatu Gelombang Berjalan :

- b. Puncak (*crest*) gelombang, E (Kv), yaitu amplitudo maksimum dari gelombang.
- c. Muka gelombang t_1 (mikrodetik), yaitu waktu dari permulaan sampai puncak. Diambil dari 10% sampai 90% E.
- d. Ekor gelombang, yaitu waktu dari permulaan sampai titik 50% E pada ekor gelombang.
- e. Polaritas, yaitu polaritas dari gelombang, positif atau negatif.

E, t_1 / t_2

Dengan :

E = Tegangan puncak

t_1/t_2 = Rasio muka gelombang

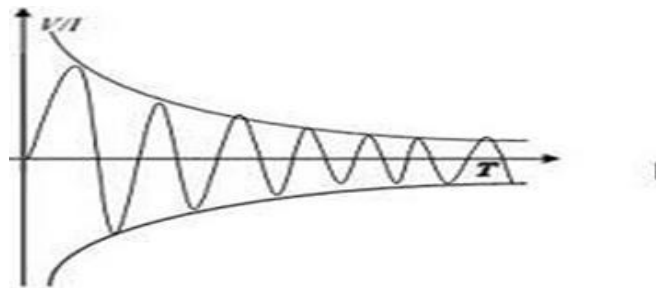
Jadi suatu gelombang polaritas positif, puncak 1000 Kv, muka 3 mikrodetik, dan panjang 21 mikrodetik dinyatakan + 1000,3 x 21.



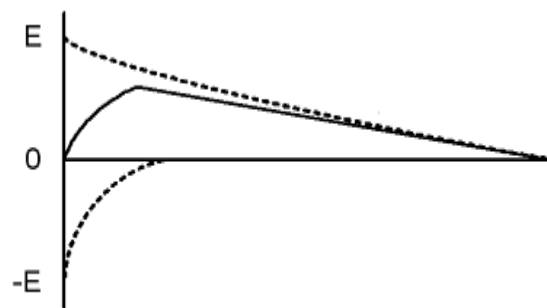
Ekspresi dasar dari gelombang berjalan secara sistematis dinyatakan dengan persamaan dibawah ini :

$$e(t) = E (e^{-a} t - e^{-bt})$$

Dimana E, a dan b adalah konstanta. Dari variasi a dan b dapat dibentuk berbagai macam bentuk gelombang yang dapat dipakai sebagai pendekatan dari gelombang berjalan.



(a)



(b)

Gambar 2.5 Macam gelombang surja.

Keterangan Gambar :

a. Gelombang sinus teredam.

$$a = \alpha - j\omega$$

$$b = \alpha - j\omega$$

$$E = E_0/2j$$

$$E = E_0/2j e^{-\alpha t} (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t})$$

$$= e^{-\alpha t} \sin \omega t$$

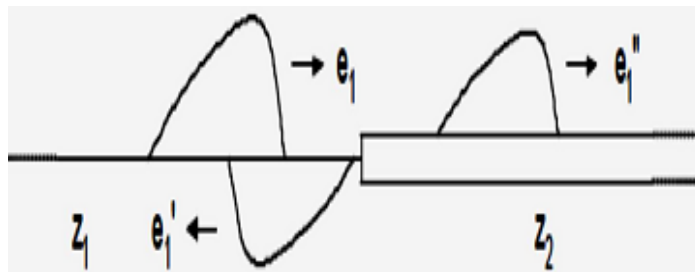


b. Gelombang kilat tipikal.

(a,b,E) terbatas serta riil

Bila gelombang berjalan menemui titik peralihan misalnya : hubungan terbuka, hubungan singkat atau perubahan impedansi, maka sebagian gelombang itu akan dipantulkan dan sebagian lagi akan diteruskan ke bagian lain dari titik tersebut. Pada titik peralihan itu sendiri, besar tegangan dan arus dapat dari 0 sampai 2 x besar tegangan gelombang yang datang.

Gelombang yang datang dinamakan gelombang datang (incident wave), dan kedua gelombang lain yang timbul karena titik peralihan itu dinamakan gelombang pantulan (reflected wave) dan gelombang terusan (transmitted wave), lihat gambar 2.6



Gambar 2.6 Perubahan impedansi pada titik peralihan

Keterangan gambar :

e_1 : Gelombang datang (incident wave)

e_1' : Gelombang pantulan (reflected wave)

e_1'' : Gelombang terusan (transmitted wave)

2.10 Pemilihan dan Letak Arrester

- Harus ditentukan besarnya tegangan tertinggi dalam sistem sebagai akibat kerja sistem yang tidak normal pada lokasi dimana arrester akan dipasang.
- Membuat suatu perkiraan besarnya tegangan pengenalan arrester pada frekuensi jala-jala.



- Memilih arus impuls yang diperkirakan akan dilepas melalui arrester.
- Menentukan tegangan pelepasan maksimum (tegangan kerja) dari arrester untuk arus impuls dan jenis arrester yang dipilih.
- Menentukan tingkat ketahanan tegangan impuls gelombang penuh dari peralatan yang akan dilindungi (Tingkat Isolasi Dasar Peralatan).
- Memastikan bahwa tegangan kerja arrester berada dibawah tingkat isolasi standar (T.I.D) peralatan dengan faktor perlindungan yang cukup.
- Menentukan jarak lindung antara arrester dan peralatan yang akan dilindungi.
- pemutus daya dapat terjadi pada satu atau dua cycle.¹⁸

2.11 Karakteristik Arrester

Basic Impulse Insulation Level (BIL) adalah batas kumparan suatu peralatan terhadap surja hubung atau surja petir. Pada G.I 70 kV diperlukan kekuatan BIL sekitar 350 kV atau lima kali tegangan sistem.

2.12 Penentuan Tegangan Dasar Arrester

Tegangan dasar arrester ditentukan berdasarakan tegangan sistem maksimum yang mungkin terjadi. Tegangan ini dipilih berdasarkan kenaikan tegangan dari fasa-fasa yang sehat pada waktu ada gangguan 1 fasa ke tanah di tambah suatu toleransi :

$$E_r = \alpha \beta U_m \dots \dots \dots (2.3)$$

Dengan :

E_r : tegangan dasar arrester (kV)

α : Koefisien pembumian

β : Toleransi guna memperhitungkan fluktuasi tegangan, efek Ferranti.

U_m : tegangan sistem maksimum (kV)

Koefisien α menunjukkan kenaikan tegangan dari fasa yang sehat pada saat

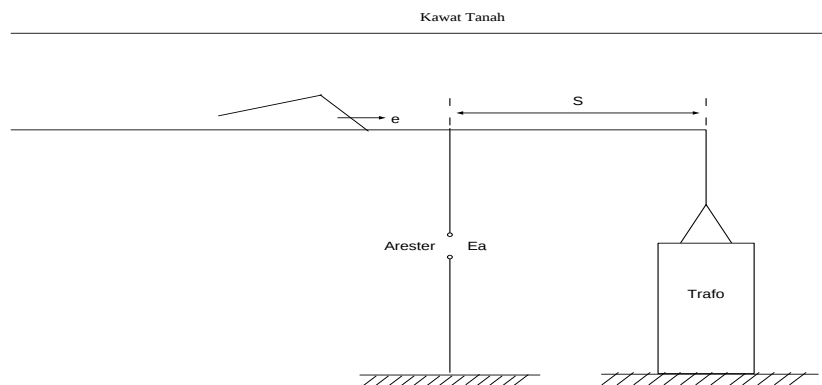
¹⁸ Dr. Ir. Dipl. -Ing. H. Reynaldo Zoro, *Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik*, [bandung:ITB], hh. 85-86



ada gangguan 1 fasa kea nah, tergantung dari impedansi-impedansi urutan positif, negative dan nol dilihat dari titik gangguan.

2.13 Jarak Perlindungan Arrester

Sebuah gelombang surja yang berjalan menuju gardu akan dipotong amplitudonya oleh arrester sehingga hanya mempunyai amplitudo sebesar tegangan kerja arrester. Gelombang yang mempunyai kecuraman yang sama dengan gelombang aslinya ini akan terus berjalan ke gardu induk. Jika gardu induk ini ujung dari hantaran atau terhubung langsung ke trafo maka gelombang ini akan dipantulkan kembali ke arrester dua kali lebih besar dari gelombang datangnya, dan gelombang negatif akan dipantulkan kembali dari arrester ke trafo. Disini akan dibahas jarak maksimum arrester dan transformator bila dihubungkan langsung dengan saluran udara dan transformator dianggap sebagai jepitan terbuka.¹⁹



Gambar 2.7 Transformator dan arrester terpisah sejauh S

Perlindungan yang baik diperoleh bila arrester ditempatkan sedekat mungkin pada jepitan transformator. Tetapi, dalam praktek sering arrester itu harus ditempatkan sejauh S dari transformator yang dilindungi. Karena itu jarak tersebut harus ditentukan agar perlindungan dapat berlangsung dengan baik.

¹⁹ Dr. Ir. Dipl. -Ing. H. Reynaldo Zoro, *Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik*, [bandung:ITB], h. 90



Keterangan gambar 2.7 :

E_a : Tegangan kerja arrester (kV)

E_p : Tegangan pada jepitan transformator (kV)

$A: \frac{de}{dt}$: Kecuraman gelombang datang, dan dianggap konstanta (kV/ μ s)

S : Jarak arrester dan transformator (m)

V : Kecepatan merambat gelombang (di udara : 300 m/ μ s)

$$E_p = E_a + 2A \frac{S}{v} \dots \dots \dots (2.4)$$

Jika U_t adalah harga tegangan dari TID trafo, maka jarak lindung penangkap petir tersebut adalah

$$S = \frac{E_p - E_a}{2 \cdot \frac{du}{dt}} \cdot v \dots \dots \dots (2.5)$$

Dalam pembahasan penggunaan data komputer dalam gambar 2.7 digunakan symbol-symbol sebagai berikut :

E : Harga puncak tegangan surja yang masuk gardu

$\frac{de}{dt}$: Kecuraman muka gelombang (kV/ μ det)

Z : impedansi surja kawat transmisi (Ω)

E_0 : Tegangan arrester dalam pada arus nol, ditentukan dari karakteristik arrester (kV)

R : Tahanan arrester, ditentukan dari karakteristik arrester (Ω)

$\frac{di}{dt}$: Laju kenaikan maksimum arus arrester (kA/ μ det)

I : Arus maksimum arrester yang terletak diujung suatu saluran

Jika E_p adalah harga tegangan dari T.I.D trafo, maka jarak lindung penangkap petir tersebut adalah:

Arus pelepasan nominal adalah arus pelepasan dengan harga puncak dan bentuk gelombang tertentu yang digunakan untuk menentukan kelas dari arrester. Bentuk gelombang arus pelepasan tersebut menurut standard IEC 60-2; 1,2 μ s / 50 μ s dengan kelas arus arrester 10 KA; 5 KA; 2,5 KA dan 1,5 KA.



- Kelas arus 10 KA, untuk perlindungan gardu induk yang besar dengan frekuensi sambaran petir sedang dengan tegangan sistem diatas 70 KV.
- Kelas arus 5 KA, untuk perlindungan gardu induk yang besar dengan frekuensi sambaran petir sedang dengan tegangan sistem di bawah 70 KV.
- Kelas arus 2,5 KA, untuk gardu-gardu kecil dengan tegangan sistem di bawah 22 KV, dimana pemakaian kelas arus 5 KA tidak lagi ekonomis.
- Kelas arus 1,5 KA, untuk melindungi trafo-trafo kecil di daerah pedesaan.

Untuk mengetahui arus pelepasan arrester yang dipasang di gardu induk dapat dicari dengan bantuan rumus dibawah ini :

$$I = \frac{2E_d - E_a}{Z} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana :

I = arus pelepasan arrester (KA)

E_d = tegangan gelombang berjalan menuju gardu/ trafo (KA)

E_a = tegangan kerja arrester (KV)

Z = impedansi surja / terpa dari hantaran (ohm)

Dimana E_a adalah tegangan arrester yang tergantung dari arrester I itu sendiri. Untuk menghindari kesulitan tersebut dibuatkan asumsi bahwa arrester itu mempunyai karakteristik V-1 yang linier antara 5.000 ampere dan 10.000 ampere.²⁰

²⁰ Ihwan Ernanto Wibowo, Luqman Assaffat, M. Toni Prasetyo, diakses dari http://www.academia.edu/9530918/Evaluasi_Perlindungan_Gardu_Induk_150_KV_Pandean_La_mper_di_Trafo_III_60_MVA_Terhadap_Gangguan_Surja_Petir. pada tanggal 10 mei 2015 pukul 20.32



