

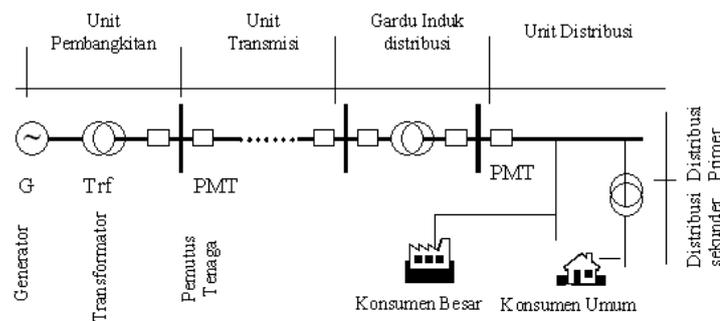
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Gardu Induk

Gardu induk adalah suatu gardu yang berfungsi menurunkan tegangan transmisi ke tegangan sistem distribusi primer. Saluran akan masuk ke transformator daya ke luar dari gardu induk sebagai *penyulang* primer. Lalu saluran akan masuk dan ke luar transformator daya setelah melalui alat-alat pemutus dan alat proteksi yang ada pada gardu induk tersebut.

Penyulang-penyulang primer tersebut meninggalkan gardu induk melalui kabel bawah tanah dan pada jarak tertentu dari gardu induk akan muncul lagi sebagai hantaran udara atau seterusnya pada kabel bawah tanah. Peralatan-peralatan penting yang terdapat pada gardu induk adalah:

- Transformator daya
- Busbar
- Alat-alat pemutus
- Panel hubung dan transformator ukur
- Gedung gardu induk



Gambar 2.1 Diagram garis sistem distribusi tenaga listrik
(sumber: <http://distribusitenaga.blogspot.com/2013/11/sistem-distribusi-tenaga-listrik.html>)

2.2. Gardu Distribusi

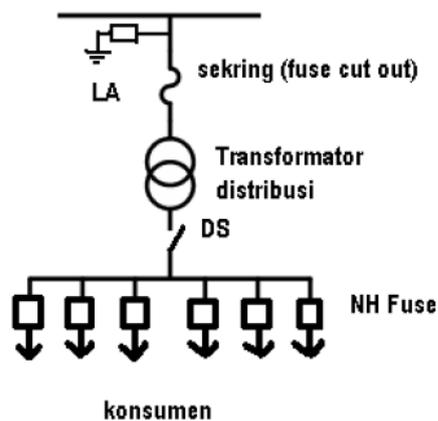
Gardu distribusi gardu yang berfungsi menurunkan tegangan distribusi primer ke tegangan distribusi sekunder dan mengatur pelayanan daya ke titik beban melalui penyulang-penyulang sekunder. Untuk beban yang lebih besar dari 200 kVA harus mempunyai gardu distribusi sendiri. Pengaturan semacam ini dimaksud



sebagai usaha meningkatkan kualitas system sehingga tidak ada konsumen yang akan merasa dirugikan akibat tegangan yang terlalu rendah.

Pada umumnya rangkaian dan peralatan setiap gardu distribusi adalah seperti pada Gambar 2.2, yang terdiri dari:

- Satu saklar pemisah (*disconnecting switch*) untuk menghubungkan penghantar yang datang dari gardu induk ke rel gardu distribusi.
- Satu saklar beban (*load break switch*) untuk menghubungkan rel dengan penghantar ke luar gardu distribusi.
- Satu transformator distribusi yang dihubungkan melalui saklar pemisah ke rel dan diamankan oleh sebuah sekring dan Lightning Arrester (LA).



Gambar 2.2 Peralatan pengaman pada gardu distribusi
(sumber: <http://eprints.polsri.ac.id/1697/3/BAB%20II.pdf>)

2.3. Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer adalah bagian dari tenaga listrik yang terletak antara gardu induk dan gardu distribusi. Jaringan distribusi menurut fungsi tegangannya dibedakan atas jaringan distribusi primer dan sekunder. Jaringan distribusi primer merupakan jaringan dari trafo gardu induk (GI) ke gardu distribusim jaringan ini dikenal dengan jaringan tegangan menengah (JTM-20 kV). Jaringan distribusi sekunder merupakan jaringan dari trafo gardu distribusi ke konsumen atau beban. Jaringan distribusi sekunder disebut juga jaringan tegangan rendah (JTR-200/380 V).



Jaringan primer terdiri dari penyulang-penyulang primer yang bermula dari bus tegangan menengah gardu induk melintasi daerah beban dan berujung pada rangkaian primer gardu distribusi, ada dua macam yaitu:

- a. Saluran udara
- b. Saluran bawah tanah

Jaringan saluran udara lebih banyak melayani beban-beban ringan, sedangkan saluran bawah tanah atau kabel umumnya melayani beban yang berat. Banyaknya pencabangan dilakukan pada jaringan saluran udara akibatnya banyak alat pemutus digunakan dari jenis dan kemampuan tertentu untuk dipergunakan pada suatu jaringan dan besarnya beban yang dilayani.

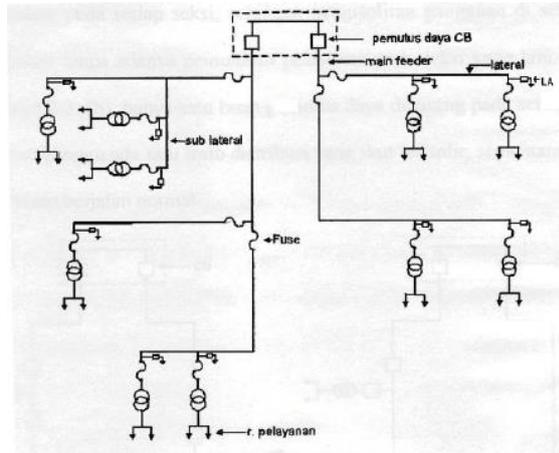
Bila ditinjau dari bentuk, jaringan distribusi primer dapat dikategorikan sebagai berikut:

- a. Jaringan radial
- b. Jaringan ring (loop)
- c. Jaringan loop-radial
- d. Jaringan spindle

Pemilihan dari bentuk jaringan distribusi primer tersebut didasarkan pada posisi yang dilayani jaringan primer. Misalnya disuatu daerah beban mengelompok secara rapat dan luas contohnya seperti di daerah perkotaan, sedangkan di daerah lain beban terpencil satu-satu memanjang secara radial seperti dipinggir kota.

Jaringan radial adalah jaringan yang menyalurkan daya dari suatu sumber ke pusat beban dengan satu arah aliran daya, di mana setiap saluran (*penyulang*) terdapat beberapa transformator distribusi yang dilengkapi dengan sekering (lihat Gambar 2.3).

Jaringan radial ini biasanya dipergunakan pada daerah dengan kerapatan beban yang rendah atau sedang. Keuntungan dari jaringan ini adalah selain bentuknya yang sederhana, yaitu sistem proteksinya yang tidak sulit dan lebih ekonomis.



Gambar 2.3 jaringan radial

(sumber: <http://eprints.polsri.ac.id/1697/3/BAB%20II.pdf>)

2.4. Tegangan Lebih Surja Petir

Listrik adalah salah satu bentuk energy. Banyak peristiwa-peristiwa listrik yang terjadi diseluruh ala mini, salah satunya adalah petir. Petir adalah bunga api listrik tegangan tinggi yang terjadi di atmosfer bumi, dalam artian sebenarnya adalah pembebasan muatan listrik. Salah satu sifat dari muatan listrik adalah sifat saling tarik menarik antara muatan positif dan muatan negatif. Sifat ini digunakan untuk memahami proses terjadinya petir dan salah satu upaya untuk memperkecil bahaya dari sambaran petir dengan cara menggunakan penangkal petir yang sesuai.

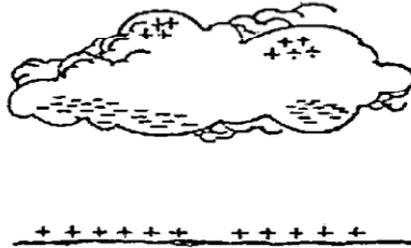
2.4.1. Proses Terjadinya Petir

Petir merupakan gejala alam yang biasa dianalogikan dengan sebuah kapasitor raksasa yang dimana lempeng pertama adalah awan (bisa berupa lempeng positif atau lempeng negatif) dan lempeng yang kedua adalah bumi (dianggap sebagai netral). Kapasitor adalah sebuah komponen pasif pada rangkaian listrik yang bisa menyimpan energy listrik (*energy storage*). Petir juga bisa terjadi dari awan ke awan (*intercloud*), dimana salah satu awan bermuatan positif dan awan lainnya bermuatan negatif.

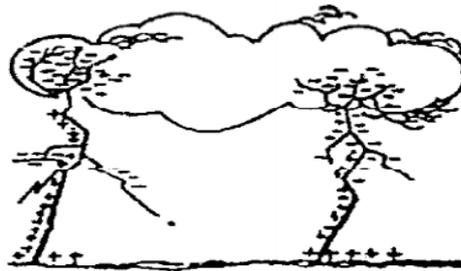
Muatan dari pusat muatan mengalir ke dalam kanal yang terisolasi, mempertahankan gradien tegangan tinggi pada ujung kanal dan melanjutkan proses tembus listrik. Sambaran petir ke bumi bermula ketika suatu muatan sepanjang pinggir awan mendiskusikan suatu muatan lawan ke bumi yang dapat dilihat pada gambar 2.4.



Kemudian akan timbul lidah petir arah awan menyebar dari awan ke bumi yang dapat dilihat gambar 2.5.



Gambar 2.4 Muatan sepanjang pinggir awan menginduksikan muatan pada bumi
(sumber: <http://backupkuliah.blogspot.com/2013/06/overvoltages-fenomena-petir.html>)



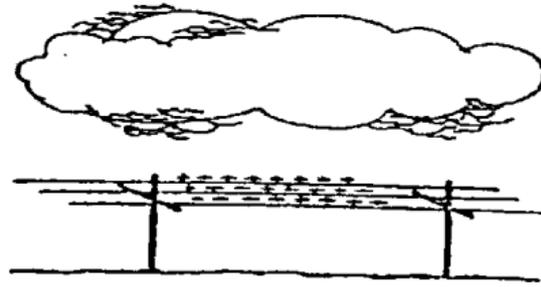
Gambar 2.5 Lidah petir menjalar ke arah bumi
(sumber: <http://backupkuliah.blogspot.com/2013/06/overvoltages-fenomena-petir.html>)

Begitu lidah petir mulai mendekati bumi, terbetuklah sambaran ke atas. Biasanya, dari titik tertinggi disekitarnya, bila lidah petir mengarah ke atas dan ke arah bawah bertemu (lihat gambar 2.6), suatu hubungan awan ke bumi terbentuk dan energy muatan awan dilepaskan kedalam tanah.



Gambar 2.6 Kilat sambaran balik dari bumi ke awan
(sumber: <http://backupkuliah.blogspot.com/2013/06/overvoltages-fenomena-petir.html>)

Muatan-muatan dapat terinduksi ke jaringan listrik yang ada disekitar sambaran petir ke tanah. Walaupun muatan awan dan bumi telah dinetralisir seperti terlihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Kumpulan muatan pada saluran distribusi
(sumber: <http://backupkuliah.blogspot.com/2013/06/overvoltages-fenomena-petir.html>)

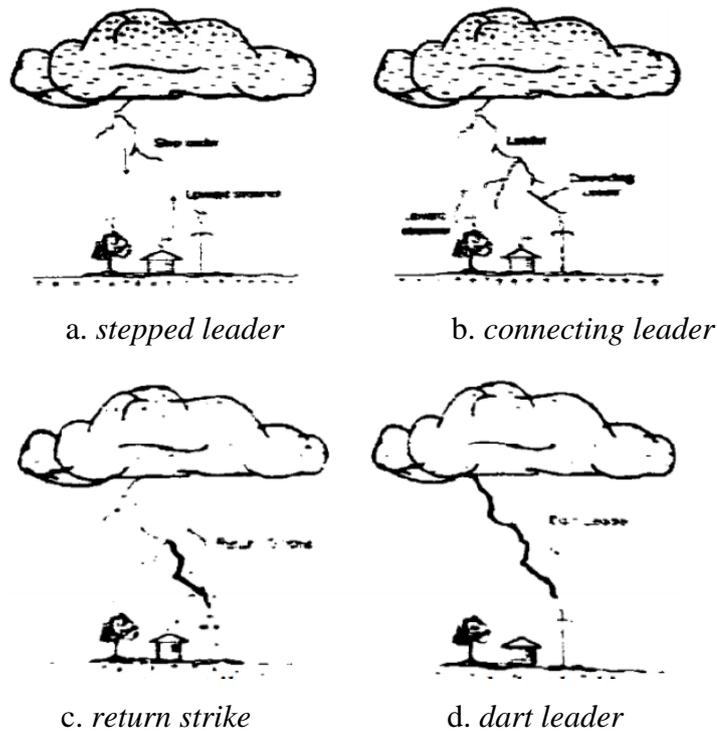
Pada saat gradien tegangan di awan sudah melebihi harga tembus udara yang terionisasi, terjadilah *pilot streamer* yang menentukan arah perambatan muatan dari awan ke udara yang ionisasinya rendah, hal ini diikuti oleh adanya cahaya.

Kemudian gerakan *pilot streamer* yang diikuti dengan lompatan-lompatan dari titik-titik cahaya yang disebut lidah petir atau *stepped leader* (lihat pada gambar 2.8.a). Setiap sambaran petir bermula dari suatu lidah petir (*stepped leader*) yang bergerak turun (*down leader*) dari awan bermuatan. Panjang *stepped leader* kurang lebih $50\mu\text{s}$ ($30\mu\text{s}$ - $125\mu\text{s}$), dari waktu ke waktu dalam perambatannya, *stepped leader* mengalami percabangan sehingga akan terbentuk lidah petir yang bercabang-cabang.

Ketika *stepped leader* bergerak mendekati bumi, akan terdapat beda potensial yang makin tinggi antara ujung *stepped leader* dengan bumi sehingga terbentuklah pelepasan muatan awal yang berasal dari bumi atau objek bumi yang bergerak ke atas menuju ujung *stepped leader*. Pelepasan muatan ini disebut dengan *upward streamer*. Apabila *upward streamer* telah memasuki zona jarak sambaran (*striking distance*), maka akan terbentuk petir penghubung (*connecting leader*) yang menghubungkan ujung *stepped leader* dengan objek yang disambar (dapat dilihat pada Gambar 2.8.b). setelah itu akan timbul sambaran balik (*return strike*) yang bercahaya sangat terang bergerak dari objek yang menuju awan dan kemudian akan melepaskan muatan di awan (hal ini dijelaskan pada Gambar 2.8.c).



Sambaran susulan tidak memiliki percabangan dan bisa disebut lidah panah (*dart leader*) sebagaimana diperlihatkan pada gambar 2.8.d. pergerakan *dart leader* ini sekitar 10 kali lebih cepat dari *leader* yang pertama (*first strike*).



Gambar 2.8 Tahapan proses sambaran petir
(sumber: <https://darsimanb.blogspot.com/2016/09/proses-sambaran-petir-dari-awan-ke-bumi.html>)

2.4.2. Gelombang Berjalan Pada Saluran Udara

Sampai saat ini sebab-sebab gelombang berjalan yang diketahui adalah:

- Sambaran kilat secara langsung pada kawat
- Sambaran kilat tidak langsung pada kawat (induksi)
- Busur tanah (*arching grounds*)
- Operasi pemutusan (*switching operation*)
- Gangguan-gangguan pada sistem oleh berbagai kesalahan
- Tegangan mantap sistem

Dari sudut energi dapat dikatakan bahwa surja pada kawat disebabkan oleh penyuntikan energi secara tiba-tiba pada kawat. Energi ini merambat pada kawat, yang terdiri dari arus dan tegangan.



Kecepatan merambat gelombang berjalan tergantung dari konstanta konstanta kawat. Pada kawat di udara, kecepatan merambat ini kira-kira 300 m/ μ s jadi sama dengan kecepatan cahaya. Pada kabel tanah kira-kira 150 m/ μ s.

1. Kecepatan merambat

Kecepatan rambat gelombang berjalan pada kawat udara sama dengan kecepatan cahaya dalam hampa udara, yakni sebesar 300 cm/s. Sedangkan untuk kabel konduktor padat dengan jari-jari r dan isolasi pembungkus berjari-jari R serta permitivitas ϵ , maka cepat rambat gelombang pada kabel menjadi,

$$\frac{3 \cdot 10^{10}}{\sqrt{\epsilon}} \text{ cm/s}$$

Untuk kabel-kabel yang tersedia, umumnya harga $E = 2,5-4$ cm/s.

Jadi, kecepatan merambat dalam kabel kira-kira $\frac{1}{2}$ sampai $\frac{2}{3}$ dari kecepatan cahaya.

2. Impedansi surja

Untuk hantaran udara:

$$z = 60 \ln \frac{2h}{r} \text{ ohm}$$

Sedangkan untuk kabel:

$$z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon} \ln \frac{R}{r}} \text{ ohm}$$

Besar impedansi surja untuk kawat udara = 400 ohm sampai dengan 600 ohm, dan untuk kabel = 5 ohm sampai dengan 60 ohm.

2.4.3. Gangguan Sambaran Petir Pada Saluran Distribusi Tegangan Menengah

Bila petir mengenai langsung ke penghantar SUTM, kemungkinan besar penghantar tersebut akan putus karena gelombang petir yang menimbulkan tegangan impuls melebihi BIL (Basic Insulation Level) dari penghantar. Kalau petir yang mengenai SUTM sembaran langsung tetapi induksi dari petir, gerak dari gelombang petir itu menjalar ke segala arah dengan perkataan lain terjadi gelombang berjalan sepanjang jaringan yang menuju suatu titik lain yang dapat menetralkan arus petir tersebut yaitu menuju ketitik pentanahan.



Kelebihan tegangan yang disebabkan petir disebabkan oleh hal sebagai berikut:

a. Sambaran Langsung (*Direct stroke*)

Sambaran langsung adalah apabila petir menyambar langsung mengenai kawat fasa (untuk saluran tanpa kawat tanah) atau pada kawat tanah (untuk saluran kawat tanah). Pada saat petir menyambar kawat fasa akan timbul arus besar dan sepasang gelombang berjalan yang merambat pada kawat tersebut. Arus ini dapat membahayakan peralatan-peralatan yang ada pada saluran.

b. Sambaran tak langsung (*Indirect stroke*)

Sambaran tidak langsung adalah peristiwa sambaran petir yang terjadi di dekat sistem tenaga dan terjadi pada kawat penghantar. Sambaran tersebut dapat berupa sambaran petir dari awan ke tanah ataupun sambaran petir dari awan ke awan. Biasanya sambaran petir ini lebih berpengaruh terhadap saluran tegangan menengah dibandingkan dengan saluran tinggi. Akibat adanya sambaran ini, maka akan timbul medan elektromagnetik yang dapat menginduksikan tegangan pada saluran sistem tenaga. Selain itu juga dapat menimbulkan tegangan lebih dan gelombang berjalan yang merambat pada kedua sisi kawat ditempat yang terkena sambaran langsung.

2.5. Proteksi Jaringan

Tujuan dari suatu sistem proteksi pada saluran udara tegangan menengah (SUTM) adalah mengurangi sejauh mungkin pengaruh gangguan pada penyaluran tenaga listrik serta memberikan perlindungan yang maksimal bagi operator, lingkungan dan peralatan dalam hal terjadinya gangguan yang menetap (permanen). Sistem proteksi pada SUTM memakai:

- a. Relai hubung tanah dan relai hubung singkat fasa-fasa kemungkinan gangguan penghantar dengan bumi dan antar penghantar.
- b. Pemutus Balik Otomatis PBO (Automatic Recloser), dipasang pada saluran utama.
- c. Saklar Seksi Otomatis SSO (Automatic Sectionaizer), dipasang pada saluran percabangan. Sedangkan di Gardu Induk dilengkapi dengan auto reclosing relay.



- d. Lightning Arrester (LA), sebagai pelindung kenaikan tegangan peralatan akibat surja petir. Lightning Arrester dipasang pada tiang awal/tiang akhir.
- e. kabel Tee-Off (TO), pada jaringan dan gardu transformator serta pada isolator tumbu.
- f. Pembumian bagian konduktif terbuka dan bagian konduktif extra dengan nilai pertanahan tidak melebihi 10 Ohm.
- g. Kawat tanah (shield wire), untuk mengurangi gangguan akibat sambaran petir langsung. Instalasi kawat tanah dapat di pasang pada SUTM di daerah padat petir yang terbuka.
- h. Fused Cut-Out (FCO), pada jaringan pencabangan.
- i. Sela tanduk (Arcing Horn).

2.6. Lightning Arrester Pada Saluran Distribusi Tegangan Menengah

Saluran udara yang keluar dari pusat pembangkit listrik merupakan bagian instalasi pusat pembangkit listrik yang paling rawan sambaran petir dan karenanya harus di beri 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.

2.6.1. Arrester

Arrester adalah suatu alat proteksi bagi suatu sistem tenaga listrik terhadap surja petir. Alat proteksi terhadap surja petir ini berfungsi untuk melindungi peralatan sistem tenaga listrik dengan cara membatasi surja tegangan lebih yang datang dan mengalirkannya ke tanah.



2.6.2. Prinsip Kerja Arrester¹

Lightning arrester bekerja pada tegangan tertentu di atas tegangan operasi untuk membuang muatan listrik dari surja petir dan berhenti beroperasi pada tegangan tertentu di atas tegangan operasi agar tidak terjadi arus pada tegangan operasi.

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 surja menghilang arrester harus membuka dengan cepat kembali, sehingga pemutus daya tidak sempat membuka.

Pada dasarnya arrester terdiri dari dua bagian yaitu : sela api (*spark gap*) dan tahan kran (*valve resistor*). Keduanya di hubungkan secara seri. Batas atas dan bawah dari tegangan percikan di tentukan oleh tegangan sistem maksimum dan oleh tingkat isolasi peralatan yang di lindungi. Untuk penggunaan yang lebih khusus arrester mempunyai satu bagian lagi yang di sebut dengan tahanan katup dan sistem pengaturan atau pembagian tegangan (*grading system*). Jika hanya melindungi isolasi terhadap bahaya kerusakan karena gangguan dengan tidak memperdulikan akibatnya terhadap pelayan, maka cukup dipakai sela batang yang memungkinkan terjadinya percikan pada waktu tegangan 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 kemungkinan api 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 di sarankan memakai tahanan kran (*valve resistor*), yang mempunyai sifat khusus, yaitu tahanannya kecil sekali bila tegangannya dan arusnya besar. Proses pengecilan tahanan berlangsung cepat yaitu selama tegangan lebih mencapai harga puncak. Tegangan lebih dalam

¹ Ir. Reynaldo. Zoro, Perlindungan Terhadap Tegangan Lebih Petir dan Koordinasi Isolasi pada Sistem Tenaga Listrik. ITB, 1987. III



hal ini mengakibatkan penurunan drastis pada tahapan sehingga jatuh tegangannya di batasi 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 di matikan oleh selah api pada waktu tegangan sistemnya mencapai titik nol yang pertama sehingga alat ini bertindak sebagai sebuah kran yang menutup arus, dari sini di dapatkan nama tahanan kran.

2.6.3. Karakteristik Arrester

Karakteristik arrester adalah sebagai berikut :

- a. Mempunyai tegangan dasar (rated) 50 c/s yang tidak boleh di lampau, sehingga nilainya tidak dilampaui pada waktu waktu dipakai baik dalam keadaan normal maupun hubungan singkat.
- b. Arrester ini akan memberikan perlindungan bila ada selisih (*margin*) yang cukup antara tingkat arrester dan peralatan, daerah perlindungan harus mempunyai jangka (*range*) cukup untuk melindungi semua peralatan gardu yang mempunyai BIL yang sama dengan BIL yang harus dilindungi arrester, atau lebih tinggi dari daerah perlindungan.
- c. Mempunyai karakteristik yang di batasi oleh tegangan (*voltage limiting*) bila di lalui oleh berbagai macam arus petir.
- d. Mempunyai batas termis yang dapat meneruskan arus besar yang berasal dari simpanan tenaga yang terdapat dalam saluran yang panjang.

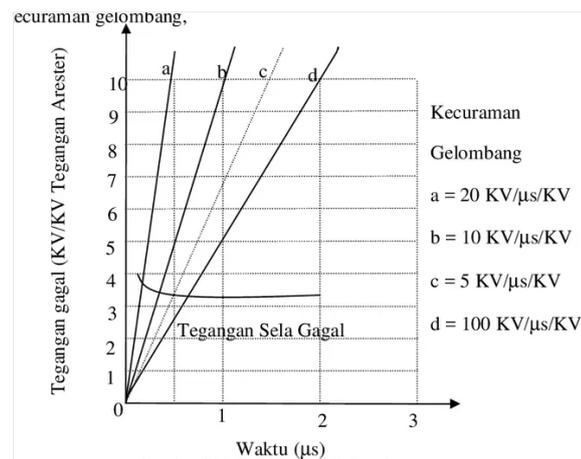
Berhubungan dengan hal yang diatas , maka agar tekanan pada isolasi dapat di buat serendah mungkin, suatu sistem perlindungan tegangan lebih perlu memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- a. Dapat melepas tegangan lebih ketanah tanpa menyebabkan hubung singkat ketanah (*saturated ground fault*).
- b. Dapat memutuskan arus susulan
- c. Mempunyai tingkat perlindungan (*protection level*) yang rendah, artinya tegangan percikan sela dan tegangan pelepasannya rendah.

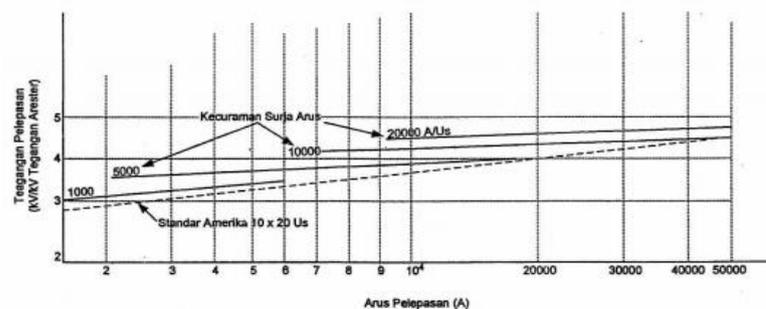
Karakteristik perlindungan dari arrester sudah mengalami perubahan. Yang paling menonjol dalam perubahan ini adalah tegangan gagal sela dan tegangan pelepasan maksimumnya sebanding dengan tegangan dasarnya untuk suatu bentuk



surja tertentu. Gambar 2.9 menunjukkan variasi tegangan gagal sela terhadap kecuraman gelombang, sedangkan gambar 2.10 menyatakan berubahnya tegangan pelepasan terhadap besarnya dan kecepatan naiknya arus surja. Dari kedua gambar tersebut dapat diperkirakan karakteristik perlindungan untuk segala macam tegangan dasar lighting arrester, dalam bentuk tegangan gagal dan tegangan pelepasan.

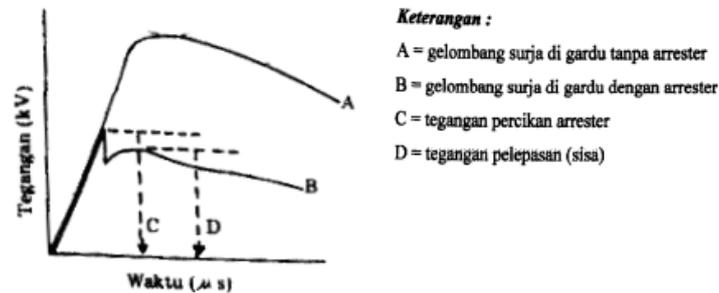


Gambar 2.9 Karakteristik tegangan gagal sela arrester
(sumber: <https://docplayer.info/43770512-Bab-iii-lightning-arrester.html>)



Gambar 2.10 grafik tegangan pelepasan dari arrester
(sumber: <https://docplayer.info/43770512-Bab-iii-lightning-arrester.html>)

Besarnya pengaruh arrester terhadap sebuah surja tegangan lebih dinyatakan dengan jelas sekali pada gambar 2.11. efisiensi dari perlindungan ditentukan terutama oleh tegangan pelepasan. Tegangan percikan untuk impuls curam mungkin lebih tinggi dari tegangan sisa. Hal ini dianggap kurang penting karena waktunya yang sangat singkat sebelum kegagalan terjadi.



Gambar 2.11 Pengaruh Arrester terhadap Surja Tegangan
 (sumber: <https://docplayer.info/43770512-Bab-iii-lightning-arrester.html>)

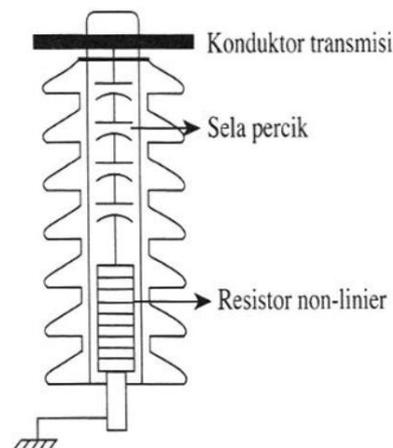
2.6.4. Jenis-jenis Arrester

a. Lighting Arrester Jenis Katup (*Valve*)

Berdasarkan sela perciknya, arrester katup terdiri dari:

1. Arrester katup sela pasif

Arrester sela pasif digunakan pada jaringan distribusi hantaran udara



Gambar 2.12 Arrester katup
 (sumber: Bonggas L. Tobing, peralatan tegangan tinggi edisi kedua, Erlangga, 2012, hal 58-60)

Arrester ini terdiri dari sela percik, resistor non linier dan isolator tabung. Sela percik terdiri dari beberapa susunan elektroda plat-plat terhubung seri. Sela percik dan resistor nin linier keduanya ditempatkan didalam tabung tabung isolasi tertutup, sehingga kinerja arrester ini tidak dipengaruhi oleh keadaan udara sekitar.

Resistor non linier terbuat dari beberapa silicon karbida (*silicon carbide*) yang terhubung seri. Ukuran diameter piringannya kurang



lebih 90 mm, sedangkan tebalnya kurang lebih 25 mm. nilai resistansi resistor ini sangat besar ketika dilewati oleh arus lemah, tetapi nilai resistansinya menjadi sangat rendah ketika dilewati oleh arus kuat.

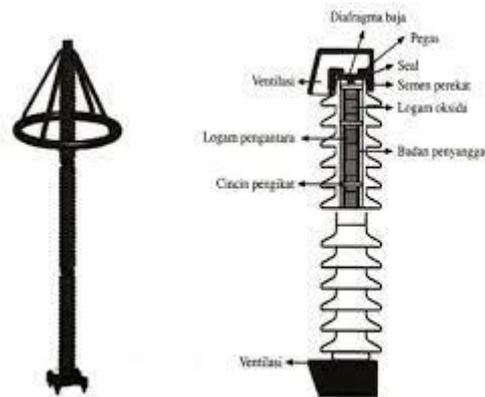
2. Arrester katup sela aktif

Arrester sela aktif digunakan pada jaringan tegangan tinggi dan titik pusat jaringan distribusi.

Konstruksi arrester katup sela aktif ini hamper sama dengan arrester katup sela pasif, perbedaannya adalah pada metode pemadaman busur api pada sela percik. Pada arrester katup sela aktif untuk memadamkan busur api, yaitu memperpanjang dan mendinginkan busur api dengan cara membangkitkan medan magnet pada sela percikannya.

3. Arrester katup tanpa sela percik

Arrester tanpa sela digunakan untuk semua tingkatan tegangan. Konstruksi arrester jenis ini dapat dilihat pada gambar 2.13. Arrester ini tidak menggunakan sela percik seperti halnya kedua arrester katup sebelumnya, tetapi hanya menggunakan resistor non linier yang terbuat dari logam oksida (*Metal Oxide*). Karena bahan utamanya adalah logam oksida, maka dalam praktik sehari-hari arrester ini dinamai arrester MO.



Gambar 2.13 konstruksi arrester logam oksida
(sumber: Pedoman pemeliharaan peralatan gardu induk PT.PLN (Persero))

Berdasarkan penempatannya arrester katup dibagi dalam empat jenis, yaitu:

1. Arrester katup jenis gardu



Arrester katup jenis gardu adalah arrester dengan jenis yang paling efisien dan juga yang paling mahal. Kata “gardu” di sini berhubungan dengan pemakaiannya secara umum pada gardu induk besar. Umumnya dipakai untuk melindungi alat-alat yang mahal pada rangkaian-rangkaian mulai dari 2.4 kV sampai 287 kV dan lebih tinggi.

2. Arrester katup jenis saluran

Arrester katup jenis saluran lebih murah dari pada arrester jenis gardu. Kata “saluran” disini bukan berarti untuk perlindungan untuk perlindungan saluran transmisi saja, seperti halnya arrester jenis gardu, arrester jenis saluran juga dipakai pada gardu induk untuk melindungi peralatan yang kurang penting. Arrester jenis saluran ini dipakai pada sistem dengan tegangan 15 kV sampai dengan 69 kV.

3. Arrester katup jenis gardu untuk mesin-mesin

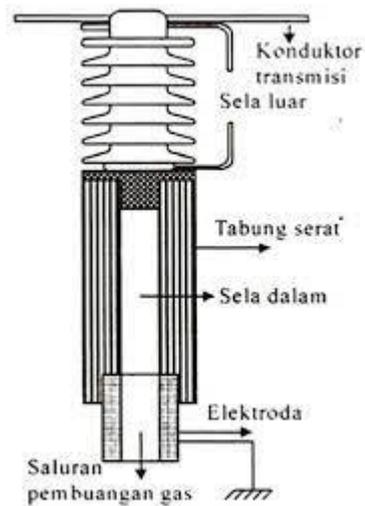
Arrester jenis gardu ini berfungsi khusus untuk melindungi mesin-mesin berputar. Dipakai untuk tegangan 2.4 kV sampai dengan 15 kV.

4. Arrester katup jenis distribusi untuk mesin-mesin

Arrester jenis distribusi ini berfungsi khusus untuk melindungi mesin-mesin berputar dan juga untuk melindungi transformator dengan tipe pendingin udara tanpa minyak. Arrester jenis ini dipakai pada peralatan dengan tegangan 120 volt sampai dengan 750 volt.

b. Lightning Arrester Jenis Ekspulsi

Arrester jenis ini digunakan pada sistem tenaga listrik yang bertegangan hingga 33kV. Konstruksinya dapat dilihat pada gambar 2.14. arrester jenis ini mempunyai dua sela yang terhubung seri, yaitu sela dalam dan sela luar. Sela dalam ditempatkan di dalam tabung serat (*Fiber*), elektroda sela dalam yang dibumikan berbentuk pipa. Keberadaan dua pasang elektroda ini membuat arrester mampu memikul tegangan tinggi frekuensi daya tanpa menimbulkan korona dan arus bocor ke tanah. Tegangan tembus sela luar dibuat lebih rendah daripada tegangan lompatan api isolator pendukung sela luar.



Gambar 2.14 Arrester jenis ekspulsi

(sumber: Bonggas L. Tobing, peralatan tegangan tinggi edisi kedua, Erlangga, 2012, hal 58-60)

2.6.5. Pemilihan Arrester

Hal-hal yang harus diperhatikan, yaitu:

- Kebutuhan perlindungan, hal ini berhubungan dengan kekuatan isolasi dari alat yang harus dilindungi dan karakteristik impuls dari arrester.
- Tegangan sistem ialah tegangan maksimum yang mungkin timbul pada jepitan arrester.
- Arus hubung singkat sistem, hal ini hanya diperlukan untuk arrester jenis ekspulsi.
- Faktor kondisi luar, apakah normal atau tidak normal (2000 meter atau lebih di atas permukaan laut), temperature dan kelembaban yang tinggi serta pengotoran.
- Faktor ekonomi.

2.6.6. Data Pengenal Arrester

- Tegangan pengenal

Tegangan pengenal (*nominal voltage arrester*) adalah tegangan dimana arrester masih dapat bekerja sesuai dengan karakteristiknya. Arrester tidak dapat bekerja pada tegangan maksimum sistem yang direncanakan, tetapi mampu memutuskan arus ikutan dari sistem secara efektif. Tegangan pengenal dari arrester harus lebih tinggi daripada tegangan fasa ke tanah.



Jika tidak demikian maka arrester akan melewatkan arus ikutan sistem terlalu besar yang menyebabkan arrester rusak akibat beban lebih termis (*thermal overloading*). Tegangan tertinggi adalah sebagai berikut:

1. Tegangan sistem tertinggi (*highest voltage system*), umumnya diambil harga 110% dari harga tegangan nominal sistem.
2. Koefisien pentanahan didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan rms fasa sehat ketanah dalam keadaan gangguan pada tempat dimana arrester dipasang, dengan tegangan rms fasa ke fasa tertinggi dari sistem dalam keadaan tidak ada gangguan. Jadi tegangan pengenalan dari arrester (*arrester rating*) adalah tegangan rms fasa ke fasa $\times 1.10 \times$ koefisien pentanahan.
3. Sistem yang ditanahkan langsung koefisien pentanahannya 0.8, arrester ini disebut arrester 80%. Sistem yang tidak ditanahkan langsung koefisien pentanahannya adalah 1.0. arrester ini disebut dengan arrester 100%.

Tegangan pengenalan dapat diperhitungkan dengan rumus:

$$U_r = U_m \times \alpha \times \beta \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana:

U_r = tegangan pengenalan

U_m = tegangan nominal sistem

α = koefisien pentanahan (koefisien 0,8 / 80 % untuk sistem yang ditanahkan langsung yaitu sistem 150 kV dan koefisien 1,0 / 100 % untuk sistem yang tidak ditanahkan langsung yaitu sistem 70 kV) rekomendasi IEC

β = toleransi untuk menghitung fluktansi tegangan (105-110%)

b. Arus peluahan nominal

Arus peluahan nominal adalah arus pelepasan dengan harga puncak dan bentuk gelombang tertentu yang digunakan untuk menentukan kelas dari arrester sesuai dengan kemampuannya melewatkan arus dan karakteristik



perlindungannya melewati arus dan karakteristik perlindungannya.

Bentuk gelombang arus pelepasan tersebut adalah:

1. Menurut standar Inggris/Eropa (IEC) 8 μ s/ 20 μ s.
2. Menurut standar Amerika 10 μ s/ 20 μ s dengan kelas:
 - a) 10 kA, 10/20 μ s: digunakan pada gardu induk, gardu yang berada dikawasan yang sering terjadi petir dan sistem bertegangan 66 kV.
 - b) 5 kA, 10/20 μ s: digunakan pada gardu bertegangan ≤ 66 kV.
 - c) 2.5 kA, 10/20 μ s: digunakan pada sistem bertegangan ≤ 22 kV.
 - d) 1.5 kA, 10/20 μ s: digunakan pada sistem distribusi bertegangan ≤ 22 kV.

Sebelum menentukan nilai arus pelepasan impuls dari arrester, pertama-tama kita harus mencari nilai impedansi hantaran udaranya. Nilai impedansi dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$Z = \frac{60}{\ln \frac{2h}{r}} \text{ ohm} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:

Z = impedansi surja saluran datang (Ohm)

h = ketinggian hantaran dari permukaan tanah (m)

r = jari-jari hantaran (m)

Dalam menentukan arus pelepasan impuls dari arrester sewaktu melepas arus surja petir dapat digunakan rumus sebagai berikut:

$$I_a = \frac{2U_d - U_a}{Z} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana:

I_a = arus pelepasan arrester (kA)

U_d = tegangan gelombang datang (kV)

U_a = tegangan kerja/tegangan sisa (kV)



Besar tegangan gelombang datang diperoleh dari OFV (*Flashover voltage*) dengan mengetahui rancangan isolator saluran.

c. Frekuensi pengenalan

Sama dengan frekuensi sistem dimana arrester terpasang.

d. Tegangan percik frekuensi daya

Tegangan percik frekuensi daya adalah besar tegangan efektif frekuensi daya yang membuat terjadinya di sela arrester tidak terpercik jika terjadi hubung singkat atau fasa ke tanah maupun pada saat terjadi operasi hubung-buka (*switching operation*). Untuk alasan ini maka ditentukan tegangan percikan frekuensi jala-jala minimum.

1. Menurut standar Inggris tegangan percikan jala-jala minimum adalah 1.6 kali tegangan pengenalan arrester.
2. Menurut standar IEC tegangan percikan jala-jala minimum adalah 1.5 kali tegangan pengenalan arrester.

e. Tegangan percik impuls maksimal

Tegangan percik impuls maksimal adalah puncak tegangan surja 1.2/ 50 μ s, yang membuat sela arrester pasti terpercik atau yang membuat arrester pasti bekerja. Misalnya ada suatu arrester mempunyai tegangan percik impuls maksimal 65 kV. Jika arrester ini dibari tegangan 65 kV-1.2/ 50 μ s, sebanyak 5 kali maka arrester akan terpercik 5 kali juga.

f. Tegangan pelepasan

Tegangan kerja atau tegangan pelepasan merupakan salah satu faktor yang menentukan tingkat perlindungan dari penangkap petir. Jika tegangan kerja penangkap petir ada di bawah BIL (Basic Impulse Level) dari peralatan yang dilindungi, maka faktor keamanan yang cukup untuk perlindungan peralatan yang optimum dapat diperoleh. Tegangan kerja tergantung pada:

- 1) Arus pelepasan dari arrester
- 2) Kecuraman gelombang arus (di/dt)

g. Faktor Perlindungan dari Arrester (*Protection Margin*)

Ketahanan suatu peralatan memikul tegangan surja petir, jika dipasang pada suatu sistem bertegangan tertentu disebut (Basic Impulse Level). Untuk



tegangan sistem tertentu, telah dipasang pada sistem tersebut. Selisih BIL peralatan yang dilindungi dengan tingkat proteksi arrester yang melindunginya disebut *margin*. Margin biasanya ditetapkan 20-30% dari BIL peralatan yang dilindungi.

Faktor perlindungan lightning arrester adalah perbandingan antara selisih tegangan tingkat isolasi dasar peralatan (TID) yang dilindungi dengan tingkat perlindungan (TP) dari arrester terhadap tingkat perlindungan dari arrester. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$TP = \frac{U_a}{10\%} \times \dots \dots \dots (2.4)$$

$$FP = \frac{TID - TP}{TP} \times 100 \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana:

FP = Faktor perlindungan

TID = Tingkat isolasi dasar

TP = Tingkat perlindungan

Faktor tingkat perlindungan dari arrester adalah harga puncak tegangan yang terjadi pada terminal arrester saat kondisi kerja, yaitu pada saat menyalurkan arus surja ke tanah. Ada dua harga yang biasa dipertimbangkan sebagai harga tingkat perlindungan impuls dan tegangan arrester. Dalam menentukan tingkat perlindungan peralatan yang akan dilindungi oleh arrester umumnya diambil harga 10% lebih tinggi dari tegangan pelepasan arrester.

Pada waktu menentukan tingkat perlindungan peralatan yang dilindungi oleh arrester umumnya diambil harga 10% diatas tegangan kerja arrester, tujuannya adalah untuk mengatasi bila ada kenaikan tegangan pada kawat penghubung dan toleransi dari pabrik. Besarnya faktor perlindungan pada



umumnya 20% dari TID peralatan untuk lightning arrester yang dipasang dekat dengan peralatan yang akan dilindungi.

h. Arus peluahan maksimal

Arus peluahan maksimal adalah nilai puncak tertinggi dari arus surja 5/10 μ s yang dapat dialirkan arrester tanpa merusak arrester. Dewasa ini, arus peluahan maksimal arrester dirancang 100 kA untuk jenis gardu 65 kA untuk arrester jenis saluran.

2.7. Isolasi Peralatan Listrik

2.7.1. Bahan dan Jenis Isolasi

Dalam sistem tenaga listrik, mengisolasi dimaksudkan sebagai memisahkan dan melindungi alat-alat yang bermuatan listrik untuk mencegah kebocoran arus ke sekelilingnya, dari segi penggunaannya, bahan nonkonduktif haruslah memenuhi persyaratan dasar isolasi sehingga fungsi memisahkan dan melindungi alat-alat yang bermuatan listrik dari kebocoran arus dapat dipenuhi dengan tidak menimbulkan akibat yang merugikan sistem dalam pengoperasiannya

1. Bahan harus mempunyai kekuatan dielektrik (*dielectric strength*) dan konduktivitas panas yang tinggi
2. Bahan isolasi tidak mudah bereaksi dengan bahan lain sehingga sifat isolasinya tetap dapat dipertahankan.
3. Untuk bahan gas haruslah mempunyai temperatur pencarian yang rendah sehingga pada tekanan yang tinggi tidak mudah meleleh.
4. Selama masa ionisasi sifat konduktivitas bahan tidak boleh berubah.
5. Harga bahan isolasi haruslah murah.

Di tinjau dari bahan pembuatannya, isolasi digolongkan menjadi tiga golongan, yaitu:

- a. Isolasi bahan gas : seperti N₂, SF₆
- b. Isolasi bahan cair : seperti minyak CB, diala B
- c. Isolasi bahan padat : seperti porselen, keramik

2.7.2. Peristiwa Tembus Pada Bahan Isolasi

Peristiwa tembus dapat diartikan pada peristiwa berubahnya susunan partikel atom bahan isolasi sedemikian rupa sehingga bahan nonkonduktor berubah sifat



menjadi konduktor. Jadi dalam keadaan tembus, isolasi sudah tidak berfungsi lagi untuk mengisolasi alat-alat bermuatan listrik terhadap kebocoran arus ke sekelilingnya.

Tembus pada isolasi di sebabkan tingginya tegangan yang dikenakan pada isolasi, dimana tegangan ini lebih besar dari kekuatan tegangan tembus isolasi bahan digunakan. Pada bahan isolasi padat, tembus dapat terjadi tepat pada tengah isolator yang disebut tembus langsung (*break down*), melalui permukaan yang disebut *flashover*, dan melalui bagian samping isolator yang disebut tembus samping.

Ada tiga gejala tembus pada bahan isolasi padat, yaitu :

1. *Intrinsic Breakdown*

Terjadi jika kuat medan ϵ sedemikian tinggi sehingga ionisasi menyebabkan pelepasan muatan.

2. *Thermal Breakdown*

Kenaikan temperature menyebabkan terjadinya pemanasan berlebihan pada bahan isolasi sehingga tahanan isolasi bahan menurun.

3. Tembus Erosi

Penggunaan isolasi yang terlalu lama mengakibatkan terjadinya perubahan kimiawi pada isolasi daya tahan bahan menurun yang mana akan mempercepat terjadi tembus pada tegangan yang lebih rendah.

2.7.3. Karakteristik Isolasi Peralatan Listrik

Karakteristik isolasi suatu peralatan listrik dibentuk oleh bahan isolasinya dan bentuk padat yang digunakan. Karakteristik isolasi padat di tentukan dari tegangan *breakdown* dan tegangan *flashhover*. Dalam pembuatannya isolasi padat di kontruksi sedemikian sehingga tegangan *breakdown*nya lebih besar satu tingkat dari tegangan *flashover*.

Penentuan kuat elektrik dan besar tegangan yang masih dapat di tahan oleh isolasi sehingga tidak terjadi *breakdown* atau *flashhover* di gambarkan oleh tiga karakteristik umum:

- a. Tegangan *flashover* kering pada frekuensi daya



Yaitu tegangan pada frekuensi jala-jala yang dapat menimbulkan kegagalan pada isolasi.

- b. Tegangan *flashover* basah pada frekuensi daya

Tegangan frekuensi jala-jala yang dapat menimbulkan kegagalan pada isolasi jika isolasi tersebut di semprot oleh suatu sumber air dengan persyaratan tertentu antara lain di beri tegangan persyaratan tertentu antara lain di beri tegangan 20 kV selama 1 menit.

- c. Karakteristik tegangan waktu pada gelombang impuls standar

2.7.4. Tingkat Isolasi Dasar (TID)

Tingkat isolasi dasar (TID) dikenal juga sebagai basic impuls insulation level (BIL) dari suatu peralatan. Untuk mencapai keandalan sistem yang tinggi ada beberapa metode untuk mengkoordinasikan isolasi peralatan jaringan dengan alat-alat proteksinya. Salah satu metode yang baik adalah menentukan level tertentu isolasi. Level isolasi peralatan harus lebih tinggi dari level isolasi ditentukan dengan pertimbangan dasar sebagai berikut:

- a. Memilih level isolasi yang optimal
- b. Jaminan bahwa breakdown dan kekuatan flashover seluruh isolasi peralatan lebih besar atau sama dengan level yang di pilih.
- c. Penggunaan alat proteksi yang cukup baik dan ekonomis.

Perencanaan sistem perlindungan transformator distribusi dalam menentukan posisi peralatan pelindung dari kemungkinan bahaya surja petir. Pertama kali yang harus dilakukan adalah menentukan kekuatan isolasi impuls dasar.

Isolasi transformator daya didasarkan atas tingkat isolasi impuls dasar (TID). Tingkat isolasi dasar didefinisikan sebagai tingkat patokan yang dinyatakan dalam tegangan puncak impuls suatu gelombang dasar, yaitu menurut IEC adalah $1,2 \times 50 \mu s$. Dalam menentukan TID transformator biasanya terlebih dahulu ditentukan tegangan tertinggi peralatan yang besarnya 10% diatas tegangan nominal sistem.²

² Arismunandar Artono, Teknik Tenaga Listrik, PT. Pradnya Paramita, Jakarta, 1979, hal : 41



2.7.5. Jarak Lindung Lightning Arrester

Arrester ditempatkan sedekat mungkin dengan peralatan yang dilindungi. Tetapi untuk memperoleh kawasan perlindungan yang lebih baik, maka adakalanya arrester ditempatkan dengan jarak tertentu dari peralatan yang dilindungi. Jarak arrester dengan peralatan yang dilindungi dipengaruhi oleh besarnya tegangan yang tiba pada peralatan jika jarak arrester terlalu jauh, maka tegangan yang tiba pada peralatan dapat melebihi tegangan yang dapat dipikulnya.

Dalam prakteknya, tegangan mungkin lebih dari perkiraan karena terjadinya isolasi akibat adanya induktansi penghantar yang menghubungkan arrester dengan transformator dan adanya kapasistansi dari transformator itu sendiri. Di samping itu, saat arrester bekerja mengalirkan arus surja ke bumi, maka terjadi jatuh tegangan pada tahanan penghantar penghubung arrester dengan jaringan dan penghubung arrester dengan elektroda pembumian. Jatuh tegangan ini dipengaruhi oleh kenaikan arus surja dan akan menaikkan kenaikan tegangan antara terminal arrester dengan bumi. Adanya perbedaan potensial pembumian transformator dengan potensial pembumian arrester juga menambah tegangan transformator. Oleh karena itu lebih baik membuat penghantar penghubung sependek mungkin dan menghubungkan elektroda pembumian arrester dengan elektroda pembumian transformator. Tahanan pembumian diusahakan serendah mungkin, akan lebih baik jika dapat dibuat dibawah satu Ohm.

Jika diketahui tegangan maksimum yang dapat dipikul transformator (TID) dalam kV, maka jarak maksimum arrester dari peralatan dapat ditentukan sebagai berikut:

$$L = \frac{U_t - U_a}{\frac{2du}{dt}} \times v \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana:

U_a : tegangan kerja arrester (kV)

U_t : tegangan gelombang datang pada jepitan transformator (kV)

du/dt : kecuraman gelombang datang (kV μ s)



Politeknik Negeri Sriwijaya

L : jarak antara arrester dan transformator (m)

V : kecepatan rambat gelombang (di udara : $300 \text{ m}/\mu\text{s}$)