

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Literature Review

Pada buku yang berjudul “*Sistem Proteksi Petir Pada Sistem Tenaga Listrik*”, Prof. Dr. Reynaldo Zoro (**Zoro, ©2018**) dalam buku tersebut memberikan gambaran analisis dan perancangan bagi sistem proteksi petir di lingkungan yang memiliki hubungan dengan system distribusi, sistem transmisi tenaga listrik dan gerdu induk. Bagaimana keunikan karakteristik petir di Indonesia serta pengaruh yang perlu diperhatikan dalam merancang sistem proteksi petir pada sistem tenaga listrik. Diantaranya adalah mekanisme sambaran petir, jarak sambaran petir, sistem proteksi petir dll.

Pada penelitian berjudul “*Design Of Lightning Arrester For Electrical Power Systems Protection*”, Shehab Abdulwadood (**Shehab, 2013**) membahas tentang proteksi jaringan transmisi 110 kV dengan cara memasang penangkal petir berupa *Arrester Tipe ATP MOV-TIPE 92* pada jaringan transmisi. Tipe *Arrester* konvensional tersebut tidak dapat mewakili perilaku kapasitif melainkan resistif, dengan disimulasikan dalam program *ATPDraw*.

Pada penelitian berjudul “*Simulation of Lightning Transients on 110 kV Overhead-Cable Transmission Line Using ATP-EMTP*”, Fekete, Kresimir (**Fekete, 2010**) melakukan penelitian membahas tentang sambaran yang terjadi pada kawat fasa jaringan Transmisi 110 kV dengan simulasi *ATP-EMTP*. Tipe *Arrester* yang digunakan yaitu tipe *ABB Peqlim Q* dan diaplikasikan antara kawat fasa dengan *down Conductor* sistem pentanahan.

Pada penelitian berjudul “*Dynamic Simulation of Lightning Strikes on Transmission Line Base Based on ATP-Matlab*”. Jhon A. Morales, Guillermo D. Guidi, Bjoern M. Keune (**Jhon, 2015**). Carrera de Ingeniera Electrica Universidad Politecnica Salesiana, Ecuador. Jurnal ini membahas tentang Simulasi Dinamis Serangan Petir pada Basis Jalur Transmisi Berbasis *ATP-Matlab*. Dalam makalah ini disajikan metodologi baru untuk simulasi sambaran petir. Metodologi ini menggunakan antarmuka antara *MATLAB-ATP*. Database besar diperlukan baik untuk *Relay* perlindungan dan untuk topik lain sebagai koordinasi isolator, sehingga pekerjaan yang dikembangkan dalam makalah ini adalah alat yang

berguna untuk sambaran petir simulasi pada TL. Karena potensi metodologi simulasi, pekerjaan ini dapat digunakan untuk menganalisis elemen lain, di mana kondisi tertentu harus dipertimbangkan.

Pada penelitian berjudul, “*Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations*”, Fernandez, F. And R. Diaz. (**Fernandez, 2001**). In: International Conference on Power System Transients IPST01. Rio De Janeiro: Federal University of Rio de Janeiro, 2001, pp. 144-1–144-5. Jurnal ini membahas tentang penggunaan *MOV (Metal Oxide Varistor)* untuk simulasi transient cepat. Model ini diverifikasi secara eksperimental dan secara numerik untuk beberapa *Arrester* tegangan sedang dan tinggi. Untuk lonjakan arus depan yang cepat dengan waktu depan 8 detik dan hingga 1 detik, model ini memiliki kesalahan maksimal 1,7% pada respons tegangan, dan karenanya sesuai untuk studi koordinasi tegangan lebih.

Pada Penelitian berjudul “*Analisis Sistem Proteksi Petir (Lightning Performance) Pada SUTT 150 Kv Sistem Sulawesi Selatan*”. (**Gassing 2012**). Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar. Jurnal ini membahas tentang Analisis Sistem Proteksi Petir (*Lightning Performance*) Pada SUTT 150 Kv Sistem Sulawesi Selatan dengan Metoda Desain Eksisting (*Cone Protection Method*) dan Metoda Perbaikan Desain (*Rolling Sphere Method*).

2.2 Pengertian Saluran Transmisi

Sistem transmisi adalah suatu sistem penyaluran energi listrik dari satu tempat ke tempat lain, seperti dari stasiun pembangkit ke *substation* (gardu induk). Pemakaian sistem transmisi didasarkan atas besarnya daya yang harus disalurkan dari pusat-pusat pembangkit ke pusat beban dan jarak penyaluran yang cukup jauh antara sistem sistem pembangkit dengan pusat beban tersebut. Sistem transmisi menyalurkan daya dengan tegangan tinggi yang digunakan untuk mengurangi adanya rugi-rugi akibat jatuh tegangan.

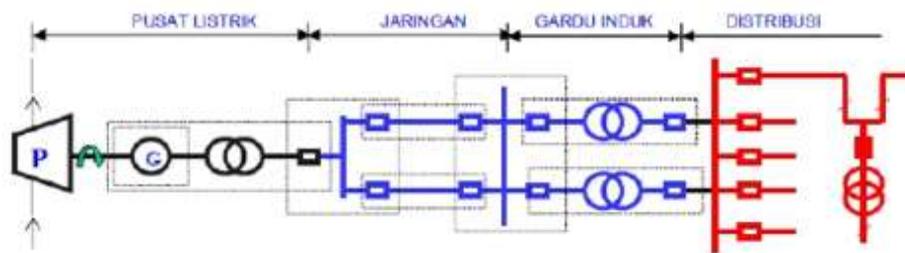
Sistem transmisi dapat dibedakan menjadi sistem transmisi tegangan tinggi (*high voltage*), sistem transmisi tegangan ekstra tinggi (*extra high voltage*), dan sistem transmisi ultra tinggi (*ultra high voltage*). Besaran tegangan nominal saluran transmisi tegangan tinggi ataupun ekstra tinggi berbeda-beda untuk setiap

negara atau perusahaan listrik di negara tersebut, tergantung kepada kemajuan tekniknya masing-masing. Di Indonesia tegangan tinggi yang digunakan adalah 150 kV dan tegangan ekstra tinggi adalah tegangan 500 kV yang terinterkoneksi antara Jawa dan Bali. Sistem interkoneksi ekstra tinggi ini merupakan bagian terpenting dari penyaluran daya di Indonesia sehingga kelangsungan dan keandalan sistem ini harus selalu dijaga.

Gambar 2.1 menunjukkan proses penyaluran energi listrik dari pusat listrik ke pusat beban disalurkan melalui saluran transmisi tegangan tinggi 150 kV atau tegangan 500 kV, kemudian di gardu induk tegangan diturunkan menjadi tegangan distribusi primer 20 kV. Pada Gardu Induk distribusi yang tersebar di pusat-pusat beban tegangan diubah oleh transformator distribusi, menjadi tegangan rendah 380 V, untuk fasa-fasa dan 220 V untuk fasa-netral. (Cristof, 2008)

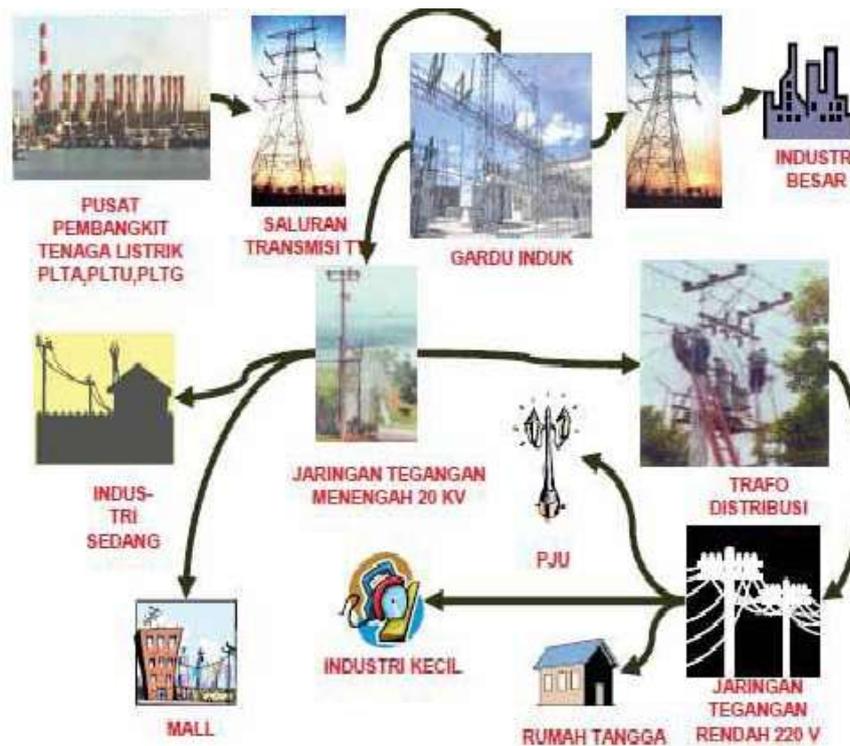
Proses penyaluran energi listrik ditunjukkan pada Gambar 2.1

2.3. Fungsi Saluran Transmisi



Gambar 2.1 Proses Penyaluran Energi Listrik (Cristof, 2008)

Gambar 2.2 menunjukkan proses penyediaan tenaga listrik secara garis besar terdiri dari pusat pembangkit, jaringan transmisi (gardu induk dan jaringan) dan jaringan distribusi



Gambar 2. 2 Sistem Tenaga Listrik (Cristof, 2008)

Dalam suatu sistem tenaga listrik dibangkitkan dalam pusat-pusat listrik, yang kemudian disalurkan melalui saluran transmisi, setelah terlebih dahulu dinaikan tegangannya oleh transformator penaik tenaga (*step up transformer*) yang ada dipusat listrik. Saluran transmisi bisa merupakan saluran udara dan ada pula yang berupa saluran kabel tanah, maka saluran transmisi di pusat-pusat listrik lebih banyak berupa saluran udara. Fungsi dari saluran transmisi itu adalah untuk memindahkan energi listrik dalam jumlah yang cukup besar, bisa mencapai ratusan mega watt (MW) dan dalam jarak yang cukup jauh, bias mencapai ratusan kilometer, maka digunakan saluran tegangan tinggi. Standar yang biasa digunakan di PT.PLN (Persero) ini adalah 70 kV , 150 kV, 275 kV, 500 kV.

2.4 Menara / Tower Menurut Fungsi

2.4.1 Tiang Penegang (*Tension Tower*)

Tiang penegang disamping menahan gaya berat juga menahan gaya tarik dari konduktor-konduktor saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) atau Ekstra Tinggi (SUTET). Tiang penegang terdiri dari :

- a. Tiang sudut (*Angle Tower*)

Pada Gambar 2.3 Tiang sudut adalah tiang penegang yang berfungsi menerima gaya tarik akibat perubahan arah SUTT atau SUTET.



Gambar 2. 3 Tiang Sudut (PT. PLN, 2014)

b. Tiang akhir (*Dead End Tower*)

Tiang akhir adalah tiang penegang yang direncanakan sedemikian rupa sehingga kuat untuk menahan gaya tarik konduktor-konduktor dari satu arah saja. Tiang akhir ditempatkan di ujung SUTT atau SUTET yang akan masuk ke *switch yard* Gardu Induk.

(PT. PLN, 2014)

2.4.2 Tiang penyangga (*Suspension Tower*)

Tiang penyangga untuk mendukung / menyangga dan harus kuat terhadap gaya berat dari peralatan listrik yang ada pada tiang tersebut.

1. Tiang penyekat (*section tower*)

Yaitu tiang penyekat antara sejumlah *tower* penyangga dengan sejumlah *tower* penyangga lainnya karena alasan kemudahan saat pembangunan (penarikan konduktor), umumnya mempunyai sudut belokan yang kecil.

2. Tiang transposisi

Dari Gambar 2.4 Tiang transposisi Adalah tiang penegang yang berfungsi sebagai tempat perpindahan letak susunan fasa konduktor-konduktor SUTT atau SUTET.



Gambar 2. 4 Tiang Transposisi (PT. PLN, 2014)

4. Tiang portal (*Gantry Tower*)

Dari Gambar 2.5 Tiang portal (*gantry tower*) berbentuk portal digunakan pada persilangan antara dua saluran transmisi yang membutuhkan ketinggian yang lebih rendah untuk alasan tertentu (bandara, tiang *crossing*). Tiang ini dibangun di bawah saluran transmisi eksisting.



Gambar 2. 5 Tiang Portal (PT. PLN, 2014)

5. Tiang kombinasi (*Combined Tower*)

Dari Gambar 2.6 Tiang kombinasi (*combined tower*) yaitu *tower* yang digunakan oleh dua buah saluran transmisi yang berbeda tegangan operasinya.

(PT. PLN, 2014)



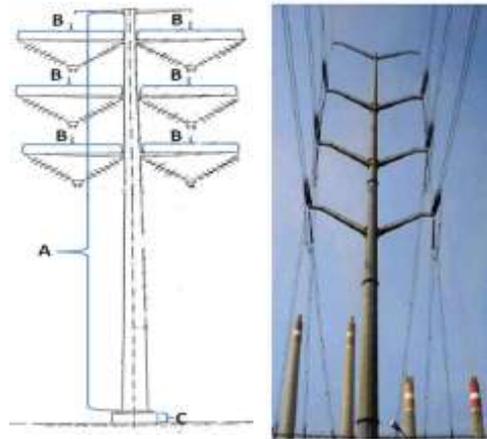
Gambar 2. 6 Tiang Kombinasi (PT. PLN, 2014)

2.5 Menara / Tower Transmisi Menurut Bentuk

2.5.1 Tiang Pole

Gambar 2.7 menunjukkan konstruksi SUTT dengan tiang beton atau tiang baja, pemanfaatannya digunakan pada perluasan SUTT dalam kota yang padat penduduk dan memerlukan lahan relatif sempit. Berdasarkan materialnya, terbagi menjadi :

- a. Tiang pole baja



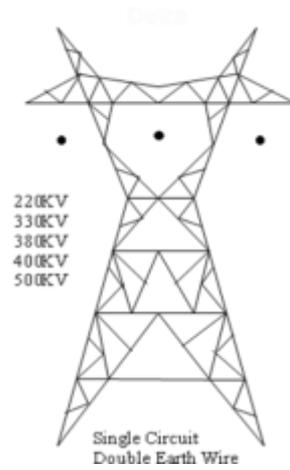
Gambar 2. 7 Tiang Pole (Sumber: PT. PLN, 2014)

- b. Tiang pole beton

2.5.2 Tiang Kisi – Kisi (*Lattice Tower*)

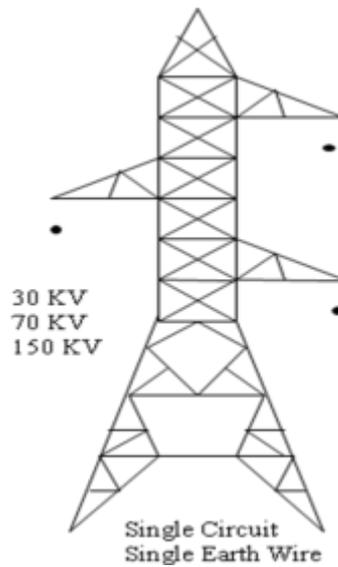
Terbuat dari baja profil, disusun sedemikian rupa sehingga merupakan suatu menara yang telah diperhitungkan kekuatannya disesuaikan dengan kebutuhannya. Berdasarkan susunan / konfigurasi penghantarnya dibedakan menjadi 3 (tiga) kelompok besar, yaitu:

1. Tiang Delta (*Delta Tower*)



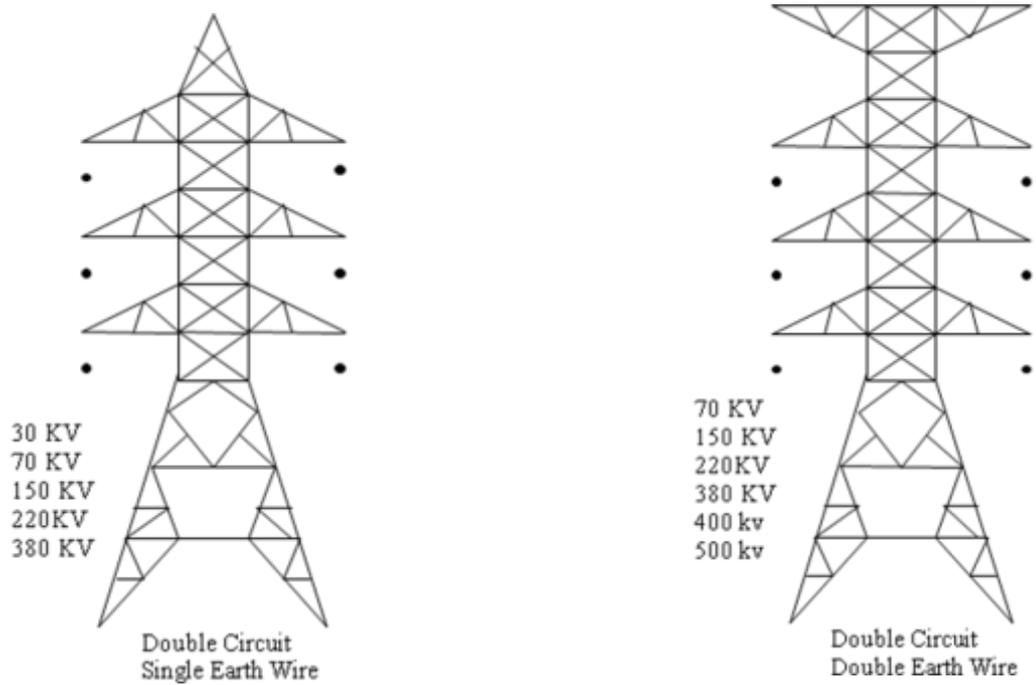
Gambar 2. 8 Tiang Delta (PT. PLN, 2014)

2. Tiang Zig-Zag (*Zig-Zag Tower*)



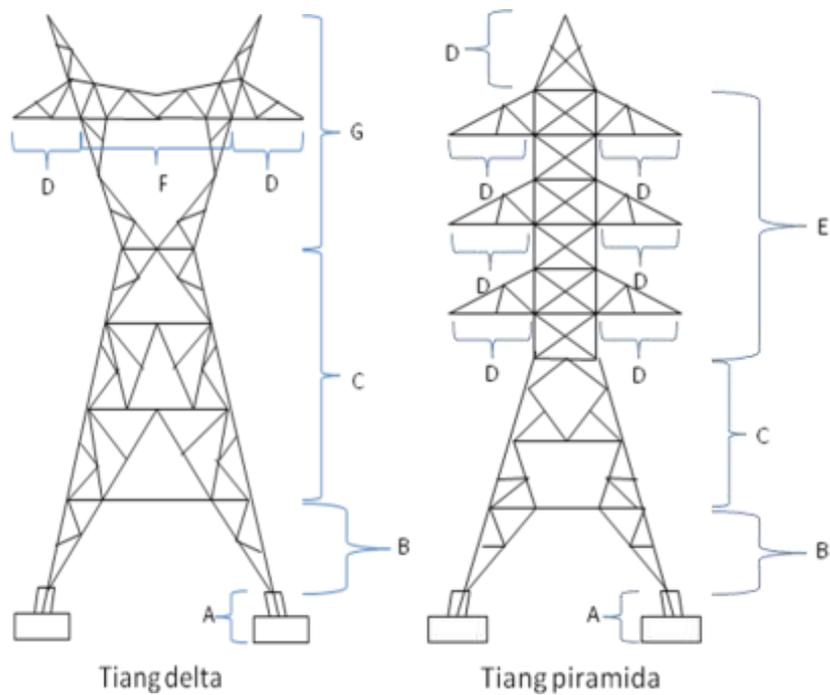
Gambar 2. 9 Tiang Zig-Zag (PT. PLN, 2014)

2.5.3 Tiang Piramida (*Pyramid Tower*)



Gambar 2. 10 Tiang Piramida (PT. PLN, 2014)

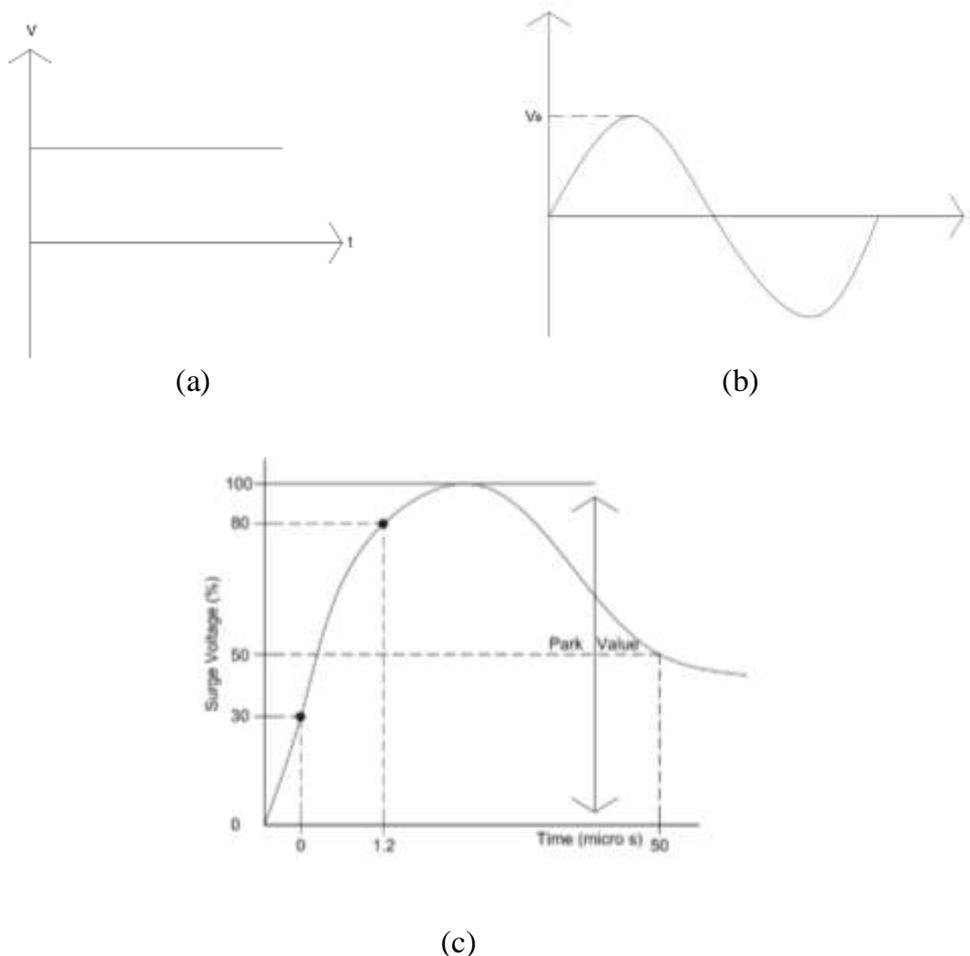
Bagian-Bagian Tiang Kisi-kisi :



Gambar 2. 11 Tiang *Lattice* (PT. PLN, 2014)

2.6 Sumber Tegangan Lebih Secara Umum

Gambar 2.12 menunjukkan secara umum ada 3 jenis bentuk fungsi tegangan terhadap waktu yang di kenal, di antaranya tegangan DC (*Direct Current*), tegangan AC (*Alternating Current*), dan tegangan Impuls. Gambar 2.12 menjelaskan bahwa tegangan AC adalah tegangan listrik yang polaritasnya berubah-ubah sehingga akan menghasilkan arus listrik yang arahnya bolak-balik. Tegangan DC adalah tegangan listrik yang polaritasnya tetap. Tegangan impuls adalah tegangan kejutan yang timbul akibat gelombang elektromagnetik. Berikut bentuk dari masing-masing gelombang tegangan. (Zoro, 2018)



Gambar 2. 12 (a) Gelombang Tegangan DC (b) Gelombang Tegangan AC (c) Gelombang Tegangan Impuls (Zoro, 2018)

Tegangan lebih adalah tegangan yang hanya dapat ditahan untuk waktu yang terbatas. Secara umum, tegangan lebih dapat dibagi menjadi 2, yaitu sebagai berikut:

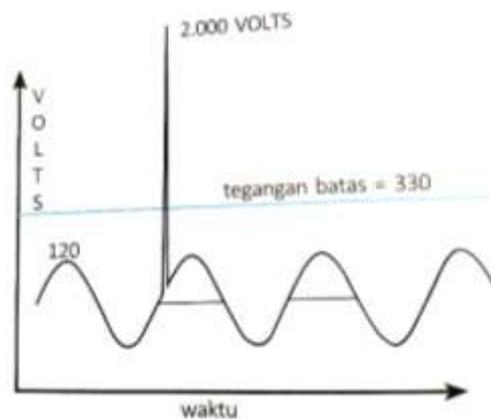
1. Berdasarkan bentuknya
 - a. Tegangan Lebih Periodik
 - b. Tegangan Lebih Aperiodik
2. Berdasarkan Sebabnya
 - a. Sebab Luar (*External Over Voltage*)
 - b. Sebab dalam (*Internal Over Voltage*)

Menurut standar IEC 71-1, ada juga definisi tegangan lebih yang lain, yaitu:

1. Tegangan Lebih Atmosfir

Contoh: Tegangan Lebih Petir (*Lightning Over Voltage*)

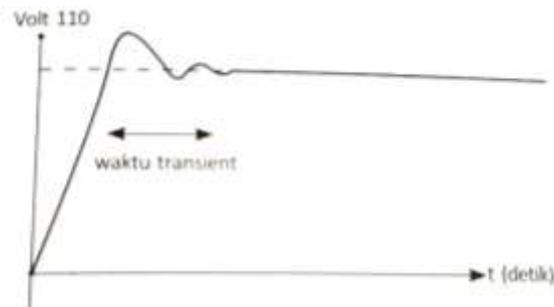
Tegangan lebih petir dapat berjalan di salah satu dari ketiga jenis fungsi tegangan lebih di atas sehingga teramati magnitudo tegangan yang meningkat sangat tinggi secara tiba-tiba pada selang waktu yang sangat sempit (sekitar 100 μ s) berikut pada Gambar 2.13 merupakan contoh ilustrasi gambar tegangan lebih petir yang menumpang pada tegangan sinusoidal.



Gambar 2. 13 Ilustrasi tegangan lebih petir pada tegangan sinusoid (Zoro, 2018)

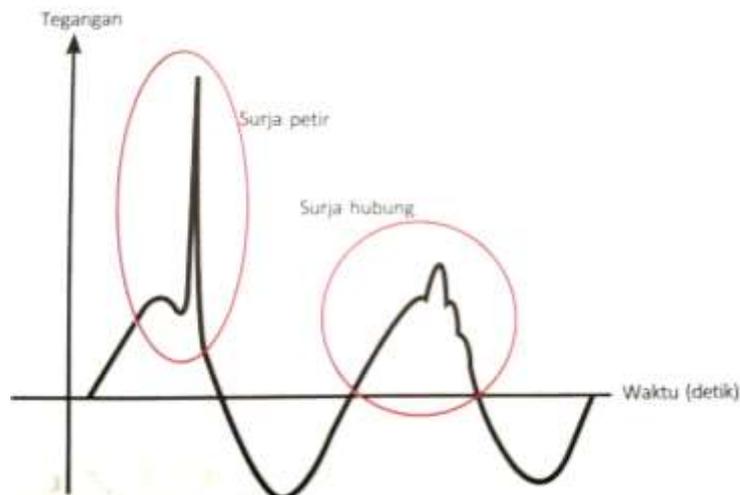
2. Tegangan Lebih Penyakelaran (*Switching Over Voltage*)
Contoh : saat ON dan OFF Sakelar

Switching Over Voltage (SOV) terjadi saat dilakukan proses penyalaan sakelar. Pada kondisi penyakelaran ideal, missal dengan sumber DC, tegangan akan langsung berubah dari 0 V menjadi 110 V_{DC} seperti yang ditunjukkan dengan garis putus – putus pada Gambar 2.14. Namun, dalam kenyataannya kondisi ideal ini tidak mungkin dicapai karena harus melewati kondisi transien terlebih dahulu sehingga akan terjadi fluktuasi tegangan yang magnitudenya akan menuju nilai V_{DC}. Tegangan lebih penyakelaran adalah beda potensial antara tegangan puncak fluktuasi pertama dengan V_{DC}.



Gambar 2. 14 Tegangan Lebih Hubung (Zoro, 2018)

Untuk lebih memahami fenomena tegangan lebih petir dan tegangan lebih penyakelaran, berikut pada Gambar 2.15 di tampilkan grafik perbandingan antara kedua jenis tegangan lebih ini.



Gambar 2. 15 Perbandingan Kurva Antara Tegangan Lebih Hubung Dan Tegangan Lebih Petir (Zoro, 2018)

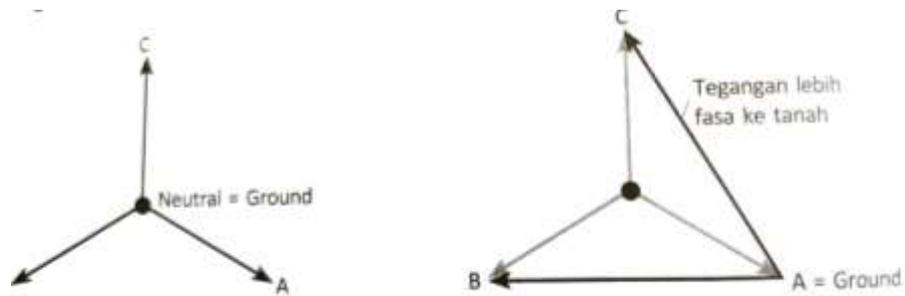
Pada Gambar 2.15 tersebut, label petir menunjukkan kondisi tegangan lebih akibat petir dan label *operations* menunjukkan kondisi tegangan lebih akibat proses penyakelaran. Teramati bahwa kondisi LOV memiliki magnitude yang jauh lebih

besar dan kondisi SOV dan kondisi LOV (sekitar 100 μ s) memiliki waktu gangguan yang lebih singkat dari waktu gangguan akibat SOV (sekitar 1000 μ s – 2000 μ s).

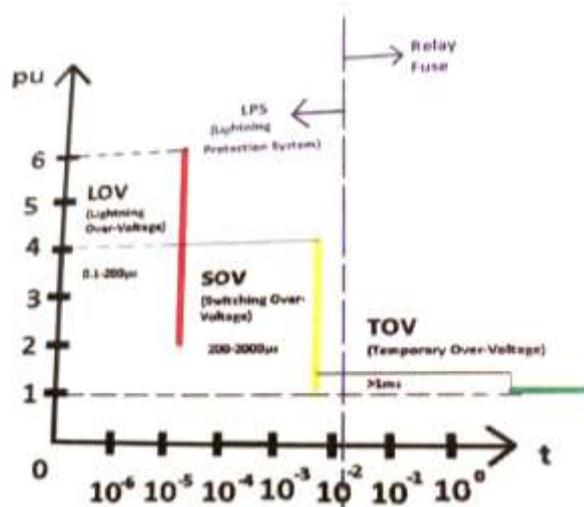
3. Tegangan Lebih Sementara

Contoh : saat terjadi hubung singkat satu fasa

Ilustrasi *short circuit* satu fasa dapat dilihat pada Gambar 2.16. Pada gambar tersebut, diilustrasikan fasa A mengalami hubung singkat sehingga titik pembumian seolah-olah berpindah ke ujung dari *vector* A. Kejadian ini mengubah magnitude dari *vector* B dan *vector* C menjadi lebih tinggi dari keadaan awal. Peningkatan nilai maginitude inilah yang di sebut sebagai tegangan lebih sementara.



Gambar 2. 16 Hubung Singkat Satu Fasa (Zoro, 2018)



Gambar 2. 17 Perbandingan Antara Tegangan Lebih Surja Petir, Tegangan Lebih Surja Hubung Dan Tegangan Lebih Sementara (Zoro, 2018)

Gambar 2.17 menunjukkan pemahaman lebih jelas mengenai perbandingan antara tegangan lebih surja petir , tegangan lebih surja hubung dan tegangan lebih sementara. (Zoro, 2018)

Tegangan lebih dapat dikelompokkan mengacu pada jenis bentuk dan sebab terjadinya sebagai terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Jenis- Jenis Tegangan Lebih (Zoro, 2018)

Tegangan lebih		Contoh
Berdasarkan sebabnya	Sebab dalam (<i>internal over voltage</i>)	Tegangan lebih <i>switching</i>
	Sebab luar (<i>eksternal over voltage</i>)	Tegangan lebih petir
Berdasarkan bentuknya	Periodik	Tegangan lebih temporer
	Aperiodik	Tegangan lebih petir
Berdasarkan sumbernya	Petir	Sambaran langsung pada kawat fasa
		Sambaran tak langsung, induksi kawat fasa
	Proses Hubung	Pemutusan arus hubung singkat
		Pemutusan arus pada penghantar terbuka
		Pemisahan dari trafo beban nol
		Penyambungan atau pemutusan beban
	Temporer	Gangguan kawat fasa ke tanah

Dalam dunia sehari- hari, peralatan atau benda – benda yang perlu di proteksi dari berbagai ancaman bahaya tegangan lebih yang dapat mengganggu kerja dan bahkan merusak system yang ada di antaranya adalah sebagai berikut :
(Zoro, 2018)

1. Bangunan dan struktur
2. Peralatan bertegangan rendah
3. Peralatan control, computer, dan telekomunikasi
4. Peralatan transmisi dan distribusi
5. Gardu induk

2.7 Proses Terjadinya Petir

Pada keadaan tertentu, di dalam lapisan atmosfer bumi dapat terjadi gerakan angin ke atas membawa udara lembab. Semakin tinggi udara lembab dari permukaan bumi, semakin rendah tekanan dan suhunya. Uap air terkondensasi menjadi titik – titik air dan kemudian membentuk awan. Awan tersebut tertiuap angin keras sehingga posisinya semakin jauh dari permukaan bumi. Pada ketinggian ± 5 km, awan tersebut membeku menjadi Kristal es yang turun lagi karena adanya gravitasi bumi. Adanya pergeseran horizontal maupun vertikal pada titik air menyebabkan terjadinya pemisahan muatan listrik. Titik – titik air di awan akan berbenturan dengan titik – titik air yang lainnya karena aliran udara. Perbenturan ini akan menyebabkan titik air menangkap muatan negatif dan melepaskan muatan positif ke udara yang yang secara bersamaan akan terangkut oleh aliran udara ke atas menuju puncak. Sedangkan muatan negatif tadi akan bersama sama tergerak turun ke bawah oleh titik air yang lebih besar sedangkan muatan positif mengumpul di puncak awan.

Dengan adanya awan yang bermuatan maka timbul muatan induksi pada muka bumi hingga timbul medan listrik. Mengingat dimensinya, bumi di anggap rata terhadap awan sehingga awan dan bumi dapat dianggap sebagai dua plat kondesator bermuatan. Jika medan listrik awan-bumi atau sebaliknya melebihi medan tembus udara, akan terjadi pelepasan muatan (*discharge*). Pelepasan inilah yang disebut dengan petir.

Kondisi ketidakmampuan atmosfer dapat timbul karena pemisahan muatan tidak terjadi secara sempurna (tidak seperti apa yang sudah di jelaskan di atas). Contoh: muatan yang terjadi berpisah ke arah horizontal yang kemudian menimbulkan pelepasan muatan antara dua awas atau pemisahan muatan vertikal tersebut terjadi sebaliknya hingga arah *discharge* muatan atau petir juga terbakik.

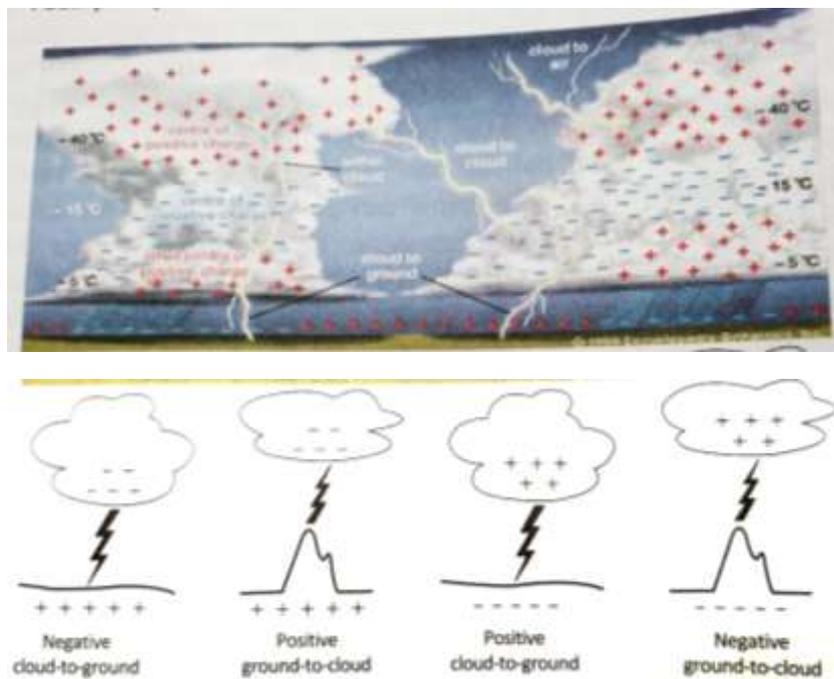
Tiga syarat awan petir dapat terbentuk adalah sebagai berikut:

- a. **Up-Draft:** udara naik ke atas akibat pemanasan permukaan tanah atau sifat orografis dari permukaan tanah. Contoh: matahari memanaskan tanah sehingga udara yang berasal dari tanah yang telah terkena panas matahari akan naik, kasus ini paling banyak terjadi di daerah khatulistiwa dan angin berhembus pada pulau tersebut sehingga menyebabkan terjadinya *up-draft* atau udara naik.
- b. **Aerosol:** merupakan partikel ringan yang kasar (*hygroskopis*) dan mengambang di udara dan menyerap air. *Aerosol* akan menjadi inti titik – titik air dan naik ke atas karena *up-draft* yang hangat. Udara hangat akan naik dan mendingin dan uap air mulai mengembu menjadi titik – titik air kecil dan membentuk awan. Pengembunan titik air dalam awan akan mengeluarkan panas terpendam penguapan. Panas ini akan menambah panas dari udara yang naik dan mengakibatkan kepadatannya berkurang dan pada gilirannya udara lebih hangat ini akan naik jauh lebih tinggi ke atmosfer. Disebut sebagai *up-draft*, udara naik ini akan membentuk awan hingga ketinggian 6000 m (6 km). Apabila udara hangat lebih tinggi lagi, dan mendingin di antara awan yang terbentuk akan mengakibatkan terbentuknya awan hingga ketinggian 17 km (tropis). Ketika titik – titik dan Kristal es mulai jatuh dengan cepat (*down-draft*) di dalam awan, karena beratnya tidak bias di tahan oleh udara naik. Gerakan udara turun dan naik yang membawa partikel ini akan menyebabkan terjadinya benturan antar partikel yang menghasilkan pemisahan muatan listrik.
- c. **Udara lembab:** udara lembab di butuhkan untuk membentuk *hailstone* (Indonesia memiliki daerah hutan yang cukup luas sehingga memiliki udara yang cukup lembab). (Zoro, 2018)

Adapun tipe – tipe petir yaitu sebagai berikut:

- a. Petir antar awan (*Cloud To Cloud Discharge*)
Petir ini terjadi dari satu awan CB ke awan lainnya.
- b. Petir awan ke tanah (*Cloud To Ground Flash*)
Petir ini terjadi dari suatu awan CB ke tanah.

- c. Petir pada awan yang sama (*Intracloud Discharge*)
Petir ini terjadi dari satu awan CB yang sama.
- d. Petir antar awan (*Cloud To Air Discharge*)
Petir ini terjadi antara awan CB ke udara. Fenomena ini umumnya terjadi di daerah gurun karena kurangnya udara lembab.
- Dari tipe –tipe petir tersebut (Gambar 2.18), jika diklasifikasikan berdasarkan pelepasan muatannya, petir awan ke tanah (*Cloud To Ground Flash*) dapat dikelompokkan lagi menjadi.
- Negative Cloud-To-Ground (Downward Negative Leader)*
Pada petir jenis ini terjadi pelepasan muatan negatif dari awan ke tanah.
 - Positive Ground-To Cloud (Upward Positive Leader)*
Pada petir jenis ini terjadi pelepasan muatan positif dari tanah ke awan.
 - Positive Cloud –To-Ground (Downward Positive Leader)*
Pada petir jenis ini terjadi pelepasan muatan positif dari awan ke tanah.
 - Negative Ground-To-Cloud (Upward Negative Leader)*
Pada petir jenis ini terjadi pelepasan muatan negatif dari tanah ke awan.



Gambar 2. 18 Tipe Petir Berdasarkan Muatannya (Zoro, 2018)



Gambar 2. 19 Tipe Petir Berdasarkan Pergerakannya (Zoro, 2018)

Berdasarkan percabangannya petir pada Gambar 2.19 diklasifikasikan menjadi:

- a. Petir yang memiliki cabang ke atas, yaitu petir yang berasal dari tanah ke awan
- b. Petir yang memiliki cabang ke bawah, yaitu petir yang berasal dari awan ke tanah.

Petir bercabang dikarenakan udara bukan merupakan penghantar yang baik sehingga petir akan mencari arah ke sisi lain untuk menemukan daerah yang memiliki kerapatan muatan yang tinggi. Pada tanah datar sering kali terjadi lidah pelopor ke atas karena memicu petir dari tanah ke awan diakibatkan kuat medan yang kuat. (Zoro, 2018)

2.8 Mekanisme Sambaran Petir ke Tanah

Petir merupakan pelepasan muatan listrik di udara, yang terjadi:

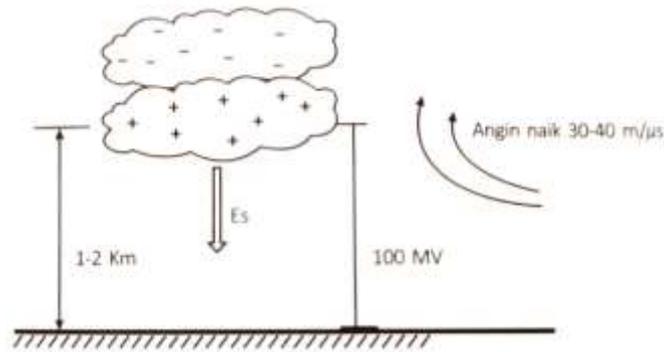
1. di antara awan-awan;
2. antara pusat-pusat muatan di dalam awan tersebut;
3. antara awan dan tanah.

Lebih banyak pelepasan muatan (*discharge*) terjadi antara awan-awan dan di dalam awan itu sendiri daripada pelepasan muatan yang terjadi antara awan ke tanah. Namun, petir awan-tanah ini sendiri sudah cukup besar untuk dapat menyebabkan terjadinya kerusakan pada benda-benda di permukaan tanah.

Petir merupakan proses alam yang terjadi di atmosfer pada waktu hujan (*thunder storm*). Muatan akan terkonsentrasi di dalam awan atau bagian dari awan dan muatan yang berlawanan akan timbul pada permukaan tanah di bawahnya.

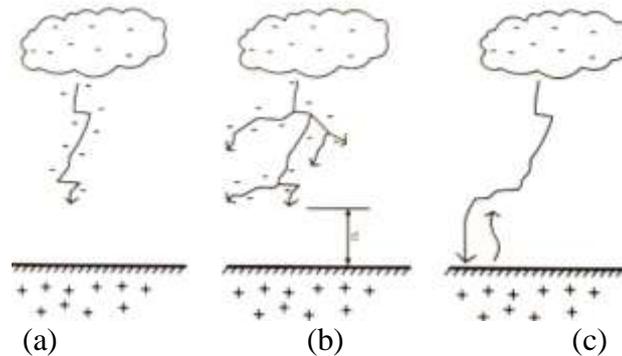
Jika muatan bertambah, beda potensial antara awan dan tanah akan naik,

maka kuat medan di udara pun akan naik. Jika kuat medan ini melebihi kuat medan di antara awan-awan tersebut maka akan terjadi pelepasan muatan. Kuat medan yang diperlukan untuk memulai aliran (*streamer*) adalah $E_B = 10 - 40$ kV/m. Pada awan yang mempunyai ketinggian 1-2 km di atas tanah dapat menghasilkan tegangan 100 MV (Gambar 2.20)



Gambar 2. 20 Awan CB saat akan terjadi sambaran petir (Zoro, 2018)

Pilot leader yang membawa muatan akan mengawali aliran ke tanah sehingga saluran yang dibuat oleh pilot leader ini menjadi bermuatan dan kuat medan (*potential gradient*) dari ujung *leader* ini sangat tinggi. Selama pusat muatan di awan mampu memberikannya pada ujung *leader* lebih besar dari kuat medan udara, maka petir (*leader*) akan tetap mampu melanjutkan perjalanannya (Gambar 2.21). Jika kuat medan pada ujung *leader* lebih lemah dari medan udara, maka petir (*leader*) akan terhenti dan muatan akan dilepaskan tanpa pelepasan muatan yang lengkap (tidak ada pukulan balik).

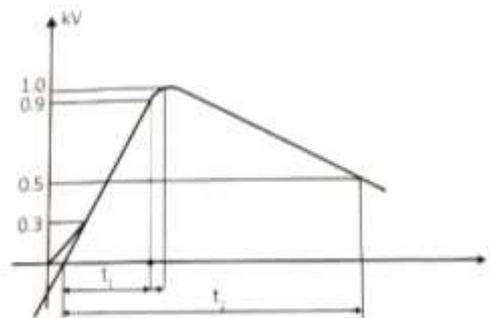


Gambar 2. 21 (a) Pelopor Awal (B) Titik Sambar (Jarak Sambar = D) (C) Sambaran Petir Dan Pukulan Balik (Zoro, 2018)

Love	10,0	0,65	10,0	0,65
Anderson dan IEE-1985	Brc(1)	0,65	8,0	0,65
IEEE-1991 T & D Committee	Brc(2)	0,65	8,0	0,6
IEEE-1992 T & D Committee	Brc(3)	0,65	10,0	0,65
Mousa dan IEEE-1995 Substation Committee (4)	8,0	0,65	8,0	0,65
Eriksson	Sambaran ke kawat fasa: $r_c = 0,84hc^{0,61^{0,74}}$ Sambaran ke kawat tanah: $r_g = 0,84hg^{0,61^{0,74}}$ Sambaran ke tanah -			
(1) $\beta = 0,64$ untuk UHV LINES, 0,80 untuk EHV lines 1,0 untuk yang lain				
(2) $\beta = 22/y$ adalah tinggi konduktor, $0,6 < \beta < 0,9$				
(3) $\beta = 0,36 = 0,17 \ln(43-h)$, jika $h > 40$ maka $h = 40$				
(4) untuk mast, Mousa menggunakan $a = 8,8$				
(5) $g = 444/(462-h)$ untuk $h > 18$ m, $g = 1$ untuk $h < 18$ m				

2.10 Surja Petir

Surja petir dapat di gambarkan sebagai berikut (Gambar 2.22)



Gambar 2. 22 Gelombang surja petir (Zoro, 2018)

Di mana: t_1 berharga 1~10 us

T_2 berharga 10 ~100 us

Surja petir umumnya digambarkan sebagai t_1/t_2

Polaritas petir dalam statistik yaitu petir positif sebesar 14%, petir negatif sebesar 80% dan petir positif/negatif sebesar 6%.

Data statistik petir di India:

25% di bawah 10 kA, 86% di bawah 50 kA, 11% antara 50 - 100 kA, 2% antara 100 - 150 kA, 0.5% > 150 kA

Arus petir tertinggi yang pernah diukur di India adalah 400 kA, di Indonesia sebesar 900 KA, yaitu di daerah Jakarta Selatan tahun 1995. Statistik petir di Indonesia diberikan pada Tabel 2.4 (disertasi Zoro, 1999) dan statistik di Eropa diberikan pada Tabel 2.3 (Berger, 1983), sehingga kemungkinan 50% statistik peta negatif di Eropa adalah 30 kA dengan (di/dt) maksimum 40 kA/ μ s dan di Indonesia adalah 40 kA dengan (di/dt) maksimum 119 kA/ μ s. (Zoro, 2018)

Tabel 2. 3 Statistik petir di Eropa (Zoro, 2018)

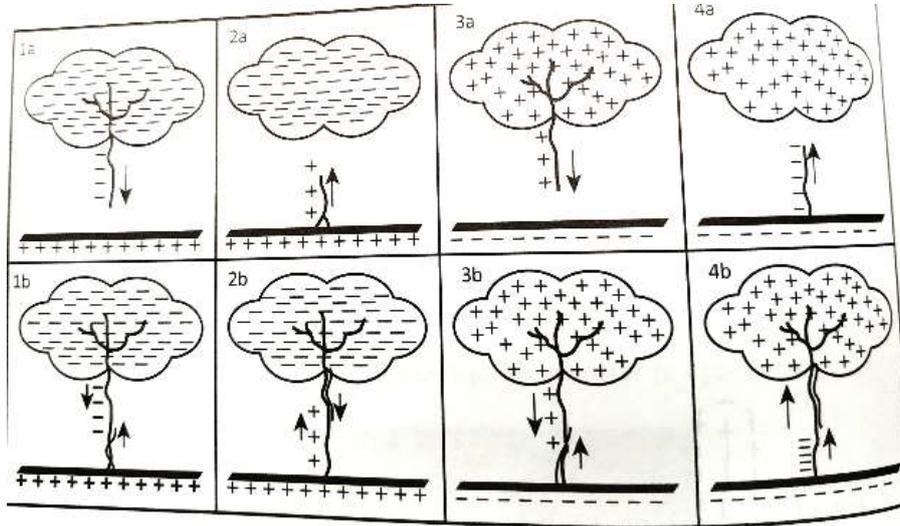
		I (kA)	(di/dt) [Ka/m ^{max}]	$\int i dt$ [AS]	$\int I^2 dt$ [A ² s]
50 %	Negatif	30	40	7,5	0,055
	Positif	35	24	80	0,65
5 %	Negatif	80	120	40	0,55
	Positif	250	32	350	15,0
Arus tertinggi yang pernah diukur		515	230	400	19,0

Tabel 2. 4 Statistik arus petir di Indonesia (Zoro, 2018)

Karakteristik Petir			Polaritas Negatif	Polaritas Positif
Arus Puncak (i)	Maksimum	Tangkuban Perahu	280 kA	298 kA
		Jawa Barat	335 kA	392 kA
Probabilitas 50%			40 kA	18 kA
Rata – Rata			41 kA	30 kA
Kecuraman (di/dt)	Maksimum		119 kA/ μ s	120 kA/ μ s
Kerapatan sambaran (sambaran/km ² /tahun)			4,1-12,4	1,4-3,8
Kerapatan sambaran total (sambaran/km ² /tahun)			7,9-15,5	

2.11 Pengaruh Polaritas Awan

Bagian dasar awan kebanyakan bermuatan negatif, tetapi juga dapat bermuatan positif. Polaritas ini berpengaruh pada bedar arus di samping arahnya. Tipe arus sambaran yang timbul dapat dilihat pada gambar 2.23 berikut.



Gambar 2. 23 Tipe-tipe arus sambaran (Zoro, 2018)

Keterangan:

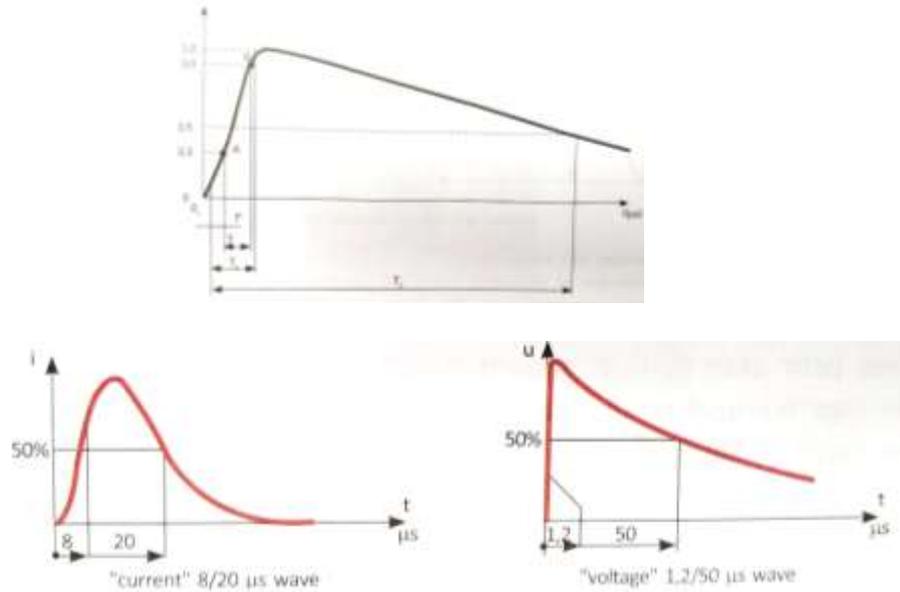
1. *Negative Cloud to Ground* (petir awan ke tanah negatif) (a) sambaran pertama petir (b) sambaran balik petir.
2. *Positive Ground to Cloud* (petir tanah ke awan positif) (a) sambaran pertama petir (b) sambaran balik petir.
3. *Positive Cloud to Ground* (petir awan ke tanah positif) (a) sambaran pertama petir (b) sambaran balik petir.
4. *Negative Ground to Cloud* (petir tanah ke awan negatif) (a) sambaran pertama petir (b) sambaran balik petir.

Di bawah awan positif arus sambaran perintis berkisar antara 1000-3000 A di bawah awan negative berkisar 50-300A. Namun sambaran balik berkisar 8-150 kA di bawah awan negatif dan sampai 300 kA di bawah awan positif.

(Zoro, 2018)

2.12 Bentuk Arus Petir

Berikut seperti terlihat pada gambar 2.24 adalah bentuk gelombang dari surja petir tegangan dan surja petir arus sesuai standar IEC 60-2/73. (Zoro, 2018)



Gambar 2. 24 Gelombang Surja Arus Dan Tegangan (standar IEC 62305/2006) (Zoro, 2018)

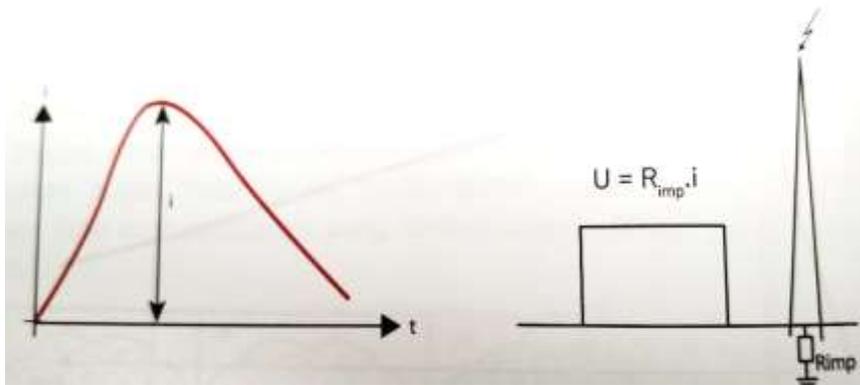
2.13 Parameter Petir

Petir memiliki 4 parameter yang dapat digunakan untuk studi dan aplikasi dalam system proteksi petir. Masing-masing parameter petir ini memiliki pengaruh pada objek yang disambarnya. Parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut.

1. Arus Puncak (i)

Parameter ini merupakan arus puncak petir maksimum (*Max Lightning Peak Current*) yang berbentuk impuls (Gambar 2.25). Arus puncak ini menyebabkan drop tegangan pada tahanan tanah objek yang disambar, misalnya pada tahanan pentanahan (*Grounding Resistance*) atau impedansi struktur sebesar:

$$U = R_{imp} \cdot I \text{ (kV)} \dots\dots\dots(2.2)$$

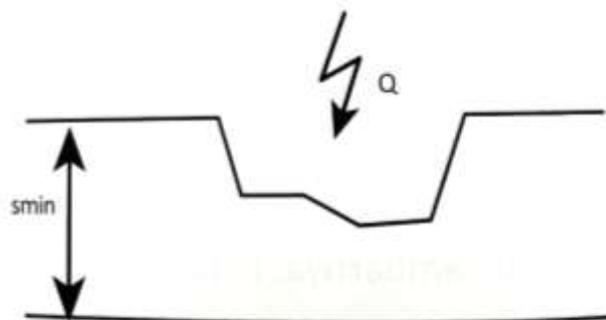


Gambar 2. 25 Arus Puncak Parameter Petir (Zoro, 2018)

2. Muatan Arus Impuls (Q)

Parameter ini merupakan jumlah dari kapasitas energi (*Energy Capacity*, yang menjumlahkan kapasitas energi-energi pada titik sambar di mafia arus petir akan terlihat seperti loncatan api pada material. Parameter ini juga merupakan ukuran energi arus petir sebagai arus loncat petir ke logam. Akibat dari muatan arus petir ini dapat terjadi melelehnya batang penangkal petir, terjadi lubang pada badan aluminium pesawat, tangki atau lapisan logam pada Gambar 2.26.

$$Q = \int i dt \text{ (C) atau (AS)} \dots \dots \dots (2.3)$$



Gambar 2. 26 Fenomena pelelehan pada metal/logam (Zoro, 2018)

3. *Impulse Force* (E) atau energi spesifik

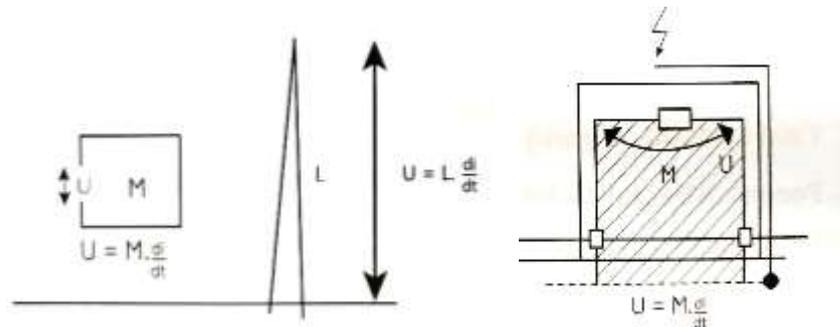
Parameter ini merupakan kekuatan impuls yang menyebabkan pemanasan dan gaya elektrodinamis pada konduktor atau struktur di mana arus petir mengalir. Parameter ini juga merupakan dasar efek mekanik dan menyebabkan panas impuls listrik pada resistor.

$$Q = \int i dt \text{ (kA}^2\text{s) atau MJ}/\Omega \dots \dots \dots (2.4)$$

4. Kecuraman gelombang arus (di/dt) atau $kA/\mu s$

Parameter ini merupakan kecuraman arus petir maksimum yang menyebabkan tegangan induktif pada konduktor atau gelung pada jaringan atau konstruksi maupun rangkaian terkopling magnetis.

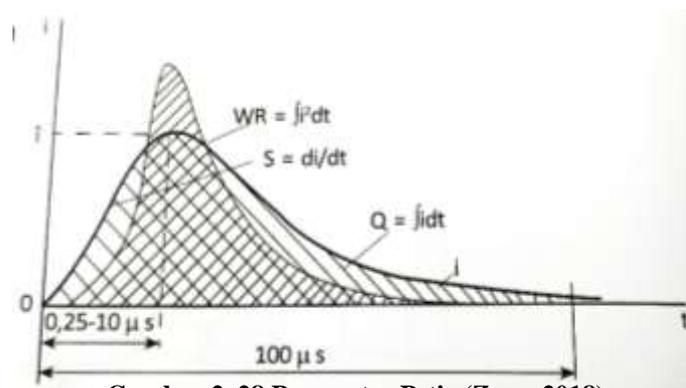
Contohnya, sebuah gedung dilengkapi dengan sebuah komputer, ada kabel masuk sebagai sumber dari komputer tersebut dan kabel listrik (Gambar 2.27). Kedua kabel yang masuk dari dua tempat yang berbeda membentuk loop (gelung) sehingga timbul tegangan sebesar: $U = M \cdot \frac{di}{dt}$, dan memiliki penangkal petir dengan kawat ke tanah yang terkena petir menimbulkan tegangan sebesar:



$$U = M \cdot \frac{di}{dt} \text{ (kV)} \dots\dots\dots(2.5)$$

Gambar 2. 27 Kecuraman Gelombang Arus Petir (Zoro, 2018)

Pada pusat-pusat penelitian petir di dunia, dilakukan pengukuran bentuk gelombang arus petir akan dapat memberikan keempat parameter petir tersebut (Gambar 2.28). Mengacu standard IEC 62305/2006 parameter arus petir dikaitkan pada kelas proteksi petir dijabarkan pada table 2.5. (Zoro, 2018)



Gambar 2. 28 Parameter Petir (Zoro, 2018)

Tabel 2. 5 Parameter Arus Petir Berdasarkan IEC 6230/2006 (Zoro, 2018)

Parameter	Level /Kelas Proteksi Petir		
	I	II	III
Arus Impuls: i (kA)	200	150	100
Energi Spesifik: W/R (MJ/ Ω)	10	5,6	2,5
Muatan Impuls: Q (As)	100	75	50
Muatan Waktu Lama: Q_{long} (As)	200	150	100
Efektivitas	98%	95%	80-90%

2.14 Fakta Mengenai Petir

Berikut ini beberapa fakta tentang petir lainnya.

- 1) Tegangan antara awan dan tanah dapat mencapai 100 MV.
- 2) Arus petir negatif tertinggi yang pernah tercatat adalah 800 kA di daerah Jakarta (1995).
- 3) Temperatur pada kanal petir dapat mencapai 10.000°C.
- 3) Petir dapat bergerak dan menyambar secara horizontal mencapai jarak sampai 15 km.
- 5) Indonesia memiliki hari guruh terbanyak (Guinness Book of World Record), yaitu 322 hari guruh setahun dan bertempat di Bogor. (Zoro, 2018)

2.15 Faktor yang mempengaruhi sambaran Petir

1. Pengaruh Bentuk Objek pada Permukaan Bumi

Petir lebih cenderung menyambar tempat-tempat yang tinggi di permukaan bumi. Hal ini karena kuat medan di sekitar ujung atau puncak bangunan tersebut lebih rapat, dan sifat dari muatan akan cenderung mengumpul pada puncak atau ujung dari bagian yang runcing, begitu pula tepian-tepian runcing bangunan.

Bukan tidak mungkin pula sebuah bangunan yang tinggi tidak disambar petir pada puncaknya, melainkan pada dasar atau tengah bangunan tersebut. Hal ini disebabkan oleh adanya lompatan dari petir pelopor dan petir penghubung dari objek di atas tanah.

2. Pengaruh Resistivitas Udara

Arus petir akan dilepaskan ke bumi melalui jalan yang paling konduktif atau paling kecil resistivitasnya sehingga petir akan kelihatan bercabang.

3. Efek Kedekatan dengan Konduktor Pentanahan

Pada saat konduktor penangkal petir dilalui arus sambaran petir, orang ataupun bangunan di sekitarnya akan dapat diloncati oleh arus sambaran tersebut, sering disebut sambaran samping atau *Side-Flash*. Peralatan berbasis elektronik dan mikroprosesor juga dapat rusak karena induksi elektromagnetik.

4. Kepadatan Sambaran Petir (Ng)

Dalam perencanaan perlindungan terhadap sambaran petir, angka kerapatan harus ditinjau terlebih dahulu untuk menentukan mutu sistem proteksi yang akan dipasang. Hal ini dapat diketahui dengan mempergunakan peta hari guruh per tahun (*Isokeraunic Level*) kemudian mencari harga korelasinya dengan kepadatan sambaran petir ke tanah.

Untuk menentukan kerapatan sambaran petir (F) dapat diperoleh dari hubungan empiris sebagai berikut.

$$F_t = 0,25 \times T \quad \text{Sambaran/km}^2/\text{tahun}$$

$$F_t = 0,44 \times T^{0,79} \quad \text{Sambaran/ km}^2/\text{tahun (sirait, 1982)}$$

$$F_g = 3,84 \times 10^3 \times T^{0,82} \times P^{0,52} \quad \text{Sambaran/ km}^2/\text{tahun}$$

Di mana:

P = jumlah curah ujan/tahun, mm

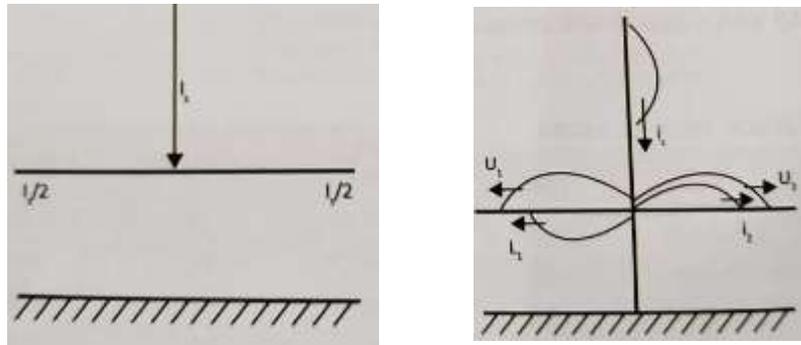
T = jumlah hari guruh/tahun

Jumlah sambaran petir ke tanah hanya 125% dari seluruh pelepasan muatan yang terjadi di alam.

Semakin besar harga kerapatan sambaran petir pada suatu daerah maka kegagalan perlindungan dari saluran transmisi atau gardu Induk akan semakin besar. Sambaran petir ke tanah saat ini diukur dengan *Lightning Location System* menggunakan teknologi satelit sehingga akurasi menjadi sangat baik. Indonesia saat ini dapat memanfaatkan jaringan Deteksi Petir Nasional (JADPEN) sejak tahun 1995. (Zoro, 2018)

2.16 Sambaran Langsung Pada Kawat Fasa

Jika hantaran udara tersambar petir, maka tegangan pada titik sambar adalah (Gambar 2.29):



$$V_L = Z_L \frac{i_s}{2} \dots\dots\dots (2.6)$$

Gambar 2. 29 Gelombang Surja Petir Pada Kawat Fasa (Zoro, 2018)

Muatan yang dilepas oleh petir pada konduktor akan mengalir ke dua arah dalam bentuk gelombang berjalan. (Zoro, 2018)

Jika: $I = 30 \text{ kA}$; $Z_L = 300 \Omega$, maka $V_L = \frac{30}{2} \times 300 = 4,5 \text{ MV}$

2.17 Sambaran Pada Menara

Sambaran langsung pada menara akan menyebabkan terjadinya kenaikan tegangan yang dapat menyebabkan terjadinya *Back Flash Over* (tegangan tembus balik) (Gambar 2.30).

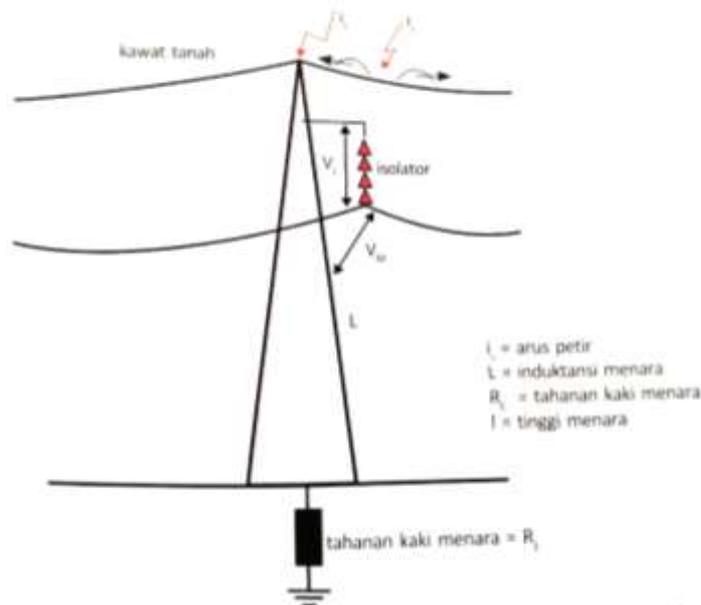
$$V_M = (I \times R_E) + L \frac{di}{dt} + V_L \dots\dots\dots (2.7)$$

$$V_L = \text{Tegangan Sistem} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V_L$$

$$V_M = \text{Tegangan pada menara}$$

Pada sisten tegangan tinggi dan ekstra tinggi formula (2.7) umumnya di tulis sebagai:

$$V_M = i_s \times R_E + L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots (2.8)$$



Gambar 2. 30 Sambaran Petir Pada Menara (Zoro, 2018)

Untuk tinggi menara transmisi 150 kV yang normal, harga $L \approx 10 - 30 \mu s$

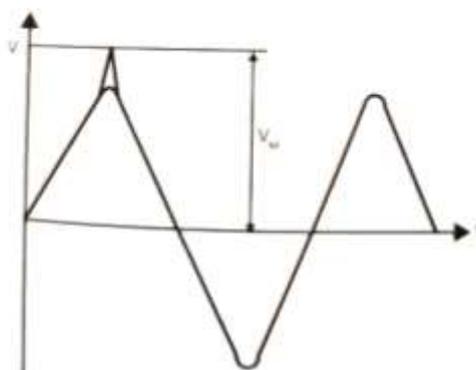
Jika $R = 10 \Omega$, $I_s = 30 \text{ kA}$, $di/dt \approx 30 \text{ kA}/\mu s$, maka:

$$V_M = 30 \cdot 10 + 30 \mu H \cdot 30 \text{ kA}/\mu s = 1200 \text{ kV}$$

Tegangan sistem 150 kV, $V_L = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 150 = 120 \text{ kV}$

Jadi $V_M = 1200 + 120 = 1320 \text{ Kv}$

Jika ketahanan impuls isolator (*BiL–Basic Impuls Insulation Level*) adalah 1100 kV untuk 12 piringan, isolator (tegangan system 150 kV), maka $1320 \text{ kV} > 1100 \text{ kV}$ terjadi *back flashover* atau BFO (Gambar 2.31)



Gambar 2. 31 Ilustrasi VM (Zoro, 2018)

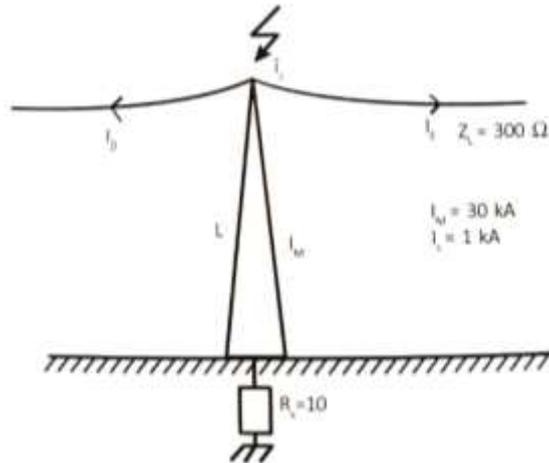
Jika tegangan surja petir melebihi tegangan tembus dari isolator maka terjadi *Back Flashover*. Pada tabel 2.6 – FOV dari piringan isolator untuk 150 kV - $\pm 1105 \text{ kV}$ sehingga telah terjadi *Back Flash Over*. (Zoro, 2018)

Tabel 2. 6 F.O.V OF STANDARD DICS (256x146) (Zoro, 2018)

No. of discs	Dry FOV rms	Wet FOV rms	Impulse FOV (standard full wares) Kv crest
1	80	50	150
2	155	90	255
3	215	130	355
4	270	170	440
5	325	215	525
6	380	255	610
7	435	295	895
8	485	335	780
9	540	370	860
10	590	415	945
11	640	455	1025
12	690	490	1105
13	735	525	1185
14	785	585	1265
15	830	600	1345
16	875	630	1425
18	965	690	1585
19	1010	720	1655
20	1055	750	1745
25	1230	900	2145
30	1505	1050	2145

2.18 Sambaran Pada Menara dengan Kawat Tanah

Sambaran petir pada transmisi dengan 1 kawat tali, maka arus akan terbagi 3 sesuai dengan impedansi surja kawat tanah dan menara (Gambar 2.32). Arus yang melalui menara akan melalui induktansi menara (L).

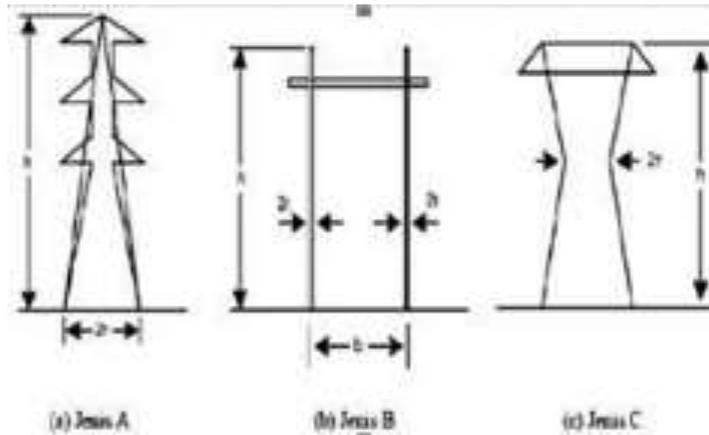


Gambar 2. 32 Sambaran Pada Menara Dengan Tanah Kawat (Zoro, 2018)

Jika saluran transmisi menggunakan 2 kawat tanah maka arus akan terbagi 5 dan seterusnya. Arus puncak yang melalui menara akan semakin kecil amplitudonya, tetapi kecuraman gelombang arus petir (-) akan tetap sama. (Zoro, 2018)

2.19 Impedansi Surja Menara

Menara dapat direpresentasikan sebagai impedansi surja atau induktansi. Tegangan lebih yang terjadi pada menara sebagai impedansi surja berbanding lurus dengan arus puncak, sedangkan pada menara sebagai induktansi tegangan lebih berbanding lurus dengan kecuraman arus. Impedansi surja menara diturunkan dari bentuk geometri menara. Dalam saluran transmisi terdapat tiga jenis tiang (a) Jenis Persegi (b) Jenis *Gantry* (c) Jenis Korset.



Gambar 2. 33 Jenis Menara Transmisi (a) Jenis Persegi (b) Jenis Gantry (c) Jenis Korset (Hutahuruk, 1991)

a. Menara Jenis Persegi

$$Z_t = 30 \ln = \left[\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right] \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana:

- Z_t = Impedansi Tiang (Ω)
- r = Jarak Tengah Lengan Tiang (m)
- h = Tinggi Tiang (m)

b. Menara Jenis Gantry

$$Z_t = 0.5 \{ [60 \ln \frac{h}{b} + 90 \frac{b}{n} - 60] + [60 \ln \frac{h}{r} + 90 \frac{r}{h} - 60] \} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana:

- b = Jarak Gawang Tiang (m)
- r = Jarak Tengah Lengan Tiang (m)

c. Menara Jenis Korset

$$Z_t = \left[\ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r} - 1 \right) \right] \dots \dots \dots (2.11)$$

Dimana: r = Jarak Tengah Lengan Tiang (m)

2.20 Tahanan Jenis Tanah

Faktor paling dominan mempengaruhi tahanan sistem pentanahan adalah tahanan jenis tanah dimana elektroda pentanahan ditanam. Harga tahanan jenis tanah pada daerah kedalaman yang terbatas tergantung beberapa faktor, yaitu:

a. Jenis Tanah

Berikut jenis tahanan jenis tanah menurut ketentuan PUIL 2000

Tabel 2. 7 Tahanan Jenis Tanah (PUIL 2000)

NO	Jenis Tanah	Tahanan Jenis (ohm.m)
1	Tanah Rawa	10 s.d. 40
2	Tanah liat dan ladang	20 s.d. 100
3	Pasir Basah	50 s.d. 200
4	Kerikil Basah	200 s.d. 3000
5	Pasir dan Kerikil Kering	< 10.000
6	Tanah Berbatu	2.000 s.d. 3.000
7	Air laut dan tawar	10 s.d. 100

b. Lapisan tanah (berlapis-lapis dengan tahanan jenis berlainan atau sama)

c. Kelembaban tanah

d. Tempaeratur

Berikut pengaruh suhu dengan tahanan jenis tanah menurut standar IEEE STD 142-19912000.

Tabel 2. 8 Temperatur Terhadap Resistivitas Tanah (IEEE STD 142-1991)

NO	Jenis Tanah	Tahanan Jenis (ohm.m)
1	-5	70.000
2	0	30.000
3	0	10.000
4	10	8.000
5	20	7.000
6	30	6.000
7	40	5.000
9	50	4.000

2.21 Jenis-jenis Kawat Penghantar Pada Saluran Transmisi

Jenis – jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah : Tembaga dengan konduktivitas 100% (CU 100%), tembaga konduktivitas 97,5% (CU 97,5%) atau aluminium dengan konduktivitas 61% (Al 61%). Kawat penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambang sebagai berikut :

- a. AAC = *All - Aluminium Conductor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.
- b. AAAC = *All Aluminium - Alloy Conductor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.
- c. ACSR = *Aluminium Conductor Steel - Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium ber-inti kawat baja.
- d. ACAR = *Aluminium Conductor Alloy - Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

Kawat rongga (*Hollow Conductor*) adalah kawat berongga yang dibuat untuk mendapatkan garis tengah luar yang besar.

Ada dua jenis kawat rongga :

- (1) yang rongganya dibuat oleh kawat lilit yang ditunjang oleh sebuah batang
- (2) yang rongganya dibuat oleh kawat – kawat komponen yang membentuk segmen-segmen sebuah silinder.

Kawat penghantar tembaga mempunyai beberapa kelebihan dibanding dengan kawat penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. tapi kelemahannya ialah untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat dari aluminium dan juga lebih mahal. Oleh karena itu kawat penghantar aluminium telah menggantikan kedudukan tembaga. Untuk memperbesar kuat tarik dari kawat aluminium digunakan campuran aluminium (*Aluminium Alloy*). Untuk saluran - saluran tegangan tinggi, dimana jarak antara dua tiang/menara jauh (ratusan meter), dibutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi, untuk itu digunakan kawat penghantar ACSR.

2.21.1 Klasifikasi Kawat Menurut Fungsinya

Yang dinamakan kawat padat (*Solid Wire*) adalah kawat tunggal yang padat (tidak berongga) dan berpenampang bujur ; jenis ini hanya dipakai untuk penampang-penampang yang kecil, karena penghantar-penghantar yang berpenampang besar sukar ditangani serta kurang *flexible*.

Apabila diperlukan penampang yang besar, maka dipergunakan 7 sampai 61 kawat padat yang dililit menjadi satu, biasanya secara berlapis dan konsentris. Tiap-tiap kawat padat merupakan kawat komponen dari kawat berlilit tadi. Apabila kawat-kawat komponen itu sama garis tengahnya maka persamaan-persamaan berikut berlaku :

$$N = 3n (1 + n) + 1 \dots\dots\dots(2.12)$$

$$D = d (1 + 2n) \quad A = an \dots\dots\dots(2.13)$$

$$W = wN (1 + k_1) \dots\dots\dots(2.14)$$

$$R = (1 + k_2) r/N \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana:

- N = Jumlah kawat komponen
- n = Jumlah lapisan kawat komponen
- D = Garis-tengah luar dari kawat berlilit
- d = Garis-tengah kawat komponen
- A = Luas penampang kawat berlilit
- W = Berat kawat berlilit
- w = Berat kawat komponen per satuan panjang
- k₁ = Perbandingan berat terhadap lapisan
- R = Tahanan kawat berlilit
- r = Tahanan kawat komponen per satuan panjang
- k₂ = Perbandingan tahanan terhadap lapisan

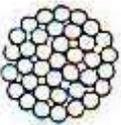
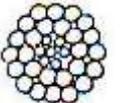
Kawat rongga (*Hollow Conductor*) adalah kawat berongga yang dibuat untuk mendapatkan garis tengah luar yang besar. Ada dua jenis kawat rongga : (a) yang rongganya dibuat oleh kawat lilit yang ditunjang oleh sebuah batang, dan (b) yang rongganya dibuat oleh kawat-kawat komponen yang membentuk segmen-segmen sebuah silinder.

2.21.2 Klasifikasi Kawat Menurut Bahannya

Kawat logam biasa dibuat dari logam-logam biasa seperti tembaga, aluminium, besi, dsb. Kawat logam campuran (*Alloy*) adalah penghantar dari tembaga atau aluminium yang diberi campuran dalam jumlah tertentu dari logam jenis lain guna menaikkan kekuatan mekanisnya. Yang sering digunakan adalah “*Copper Alloy*”, tetapi “*Aluminium Alloy*” juga lazim dipakai.

(Arismunandar A,1972)

Tabel 2. 9 Daftar Kawat Yang Digunakan Untuk SUTT
(Arismunandar A, 1972)

KODE	PENAMPANG KAWAT (mm ²)	BAJA	ALUMINIUM	GAMBAR PENAMPANG KAWAT
HEN	298,07	7 x 3,20 mm	30 x 3,20 mm	
ORIOLE	210,26	7 x 2,69 mm	30 x 2,69 mm	
PIPER	187,48	7 x 2,54 mm	30 x 2,54 mm	
DRAKE	468,45	7 x 3,45 mm	26 x 4,44 mm	
DOVE	327,94	7 x 2,89 mm	26 x 3,72 mm	
LINNET	198,19	7 x 2,25 mm	26 x 2,89 mm	
AL/ST 120/120	141,4	7 x 1,90 mm	26 x 2,44 mm	
PIGEON	99,22	1 X 4,25 mm	6 x 4,25 mm	
RAVEN	62,38	1 x 3,37 mm	6 x 3,37 mm	
SWALLOW	31,09	1 x 2,38 mm	6 x 2,38 mm	

2.22 Transmission Line Arrester (TLA)

Pada dasarnya Jalur transmisi dirancang dengan baik sehingga kebal terhadap sambaran petir. Parameter penting dalam desain tower adalah geometri, ketinggian, *Shiled Wire* dan tingkat pentanahan tower. Namun dalam beberapa kasus tidak mungkin untuk merancang dengan sempurna, hanya solusi optimal yang dapat dilakukan. Optimalisasi ini berdasarkan keseimbangan biaya dari desain dan *Outage* yang dapat ditoleransi. Mengingat geografis jalur transmisi memiliki life cycle dan kebutuhan pelanggan terhadap tingkat pelayanan semakin tinggi. Sementara perubahan desain jalur transmisi biasanya mahal, memasang

arrester petir pada saluran transmisi TLA merupakan solusi yang efektif untuk meningkatkan reliability sistem.

Sebuah transmission lightning arrester harus mampu bertindak sebagai insulator, mengalirkan beberapa miliampere arus bocor ke tanah pada tegangan sistem dan berubah menjadi konduktor yang sangat baik, mengalirkan ribuan ampere arus surja ke tanah, memiliki tegangan yang lebih rendah daripada tegangan *Withstand String* insulator ketika terjadi tegangan lebih, dan menghilangkan arus susulan mengalir dari sistem melalui TLA (*Power Follow Current*) setelah surja petir berhasil didisipasikan.

TLA dapat melindungi sistem dari kejadian-kejadian sebagai berikut:

1. *Back flashover*

Kejadian dimana petir menyambar bagian-bagian grounding sistem (seperti tower dan GSW) tetapi arus petir tidak dapat dialirkan ke tanah karena *impact local grounding* desainya yang tidak bekerja dengan baik.

2. *Flash over*

Kejadian dimana perlindungan GSW tidak maksimal sehingga petir menyambar langsung pada konduktor.



Gambar 2. 34 Transmision Line Arrester (TLA) (PT. PLN, 2014)

Komponen utama dari TLA

1. Clamp

Alat yang dipasangkan pada konduktor penghantar ke TLA yang berfungsi untuk memegang konduktor penghantar. Pada jenis konduktor penghantar yang memiliki permukaan lebih banyak komposisi Aluminium seperti ACCC, maka konduktor harus dilapisi armour rod untuk mengurangi kelelahan bahan.

2. Corona Ring

Peran korona ring adalah untuk mendistribusikan gradien medan listrik dan menurunkan nilai maksimum di bawah ambang batas corona, mencegah debit korona.

3. Insulator Housing

Adalah tabung yang terbuat dari aluminium yang dilapisi insulator. Tabung ini merupakan ruang untuk material metal oksida pembentuk TLA. Biasanya insulator pelapis yang digunakan adalah tipe silikon, karena memiliki bobot yang ringan.

4. Disconnecter

Adalah alat yang dipasangkan pada TLA sisi tidak bertegangan yang diteruskan ke konduktor grounding. *Disconnecter* akan bekerja memutuskan, apabila kondisi TLA sudah rusak.

5. Grounding

Adalah konduktor yang dipasangkan pada TLA yang fungsinya untuk meneruskan arus petir dan arus bocor ke tanah.

6. Arrester Coondition Monitoring (ACM)

Adalah alat ukur untuk mengetahui data arus bocor dan data petir yang melewati TLA tersebut. Untuk mengetahui data petir dan data TLA tersebut maka diperlukan download data arus petir (*Leakage Current*) dan arus bocor (*Leakage Current*).

2.23 Metal Oxide Varistor

Tidak seperti sekering atau pemutus sirkuit yang menawarkan proteksi arus berlebih, varistor memberikan proteksi tegangan berlebih melalui penjepit tegangan dengan cara yang mirip dengan dioda zener.

Kata "Varistor" adalah kombinasi dari kata-kata VARI -able resi-STOR yang digunakan untuk menggambarkan mode operasi mereka di masa awal perkembangannya yang sedikit menyesatkan karena varistor tidak dapat divariasikan secara manual seperti potensiometer atau rheostat .

Tetapi tidak seperti resistor variabel yang nilai resistansinya dapat divariasikan secara manual antara nilai minimum dan maksimumnya, varistor mengubah nilai resistansinya secara otomatis dengan perubahan tegangan yang membuatnya menjadi resistor non-linier yang bergantung pada tegangan atau singkatnya VDR.

Saat ini badan resistif varistor terbuat dari bahan semikonduktor sehingga menjadi jenis resistor semikonduktor dengan tegangan simetris non-ohmik dan karakteristik arus yang cocok untuk aplikasi tegangan AC dan DC.

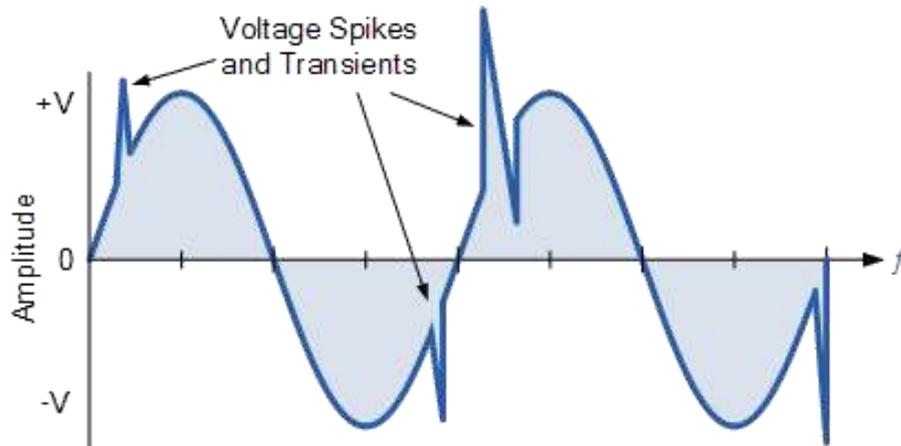
Dalam banyak hal, varistor terlihat serupa dalam ukuran dan desain dengan kapasitor dan sering disalahartikan sebagai kapasitor. Namun, kapasitor tidak dapat menekan lonjakan tegangan dengan cara yang sama seperti varistor. Ketika lonjakan tegangan tinggi diterapkan ke rangkaian, hasilnya biasanya bencana bagi rangkaian, oleh karena itu varistor memainkan peran penting dalam melindungi rangkaian elektronik yang halus dari paku switching dan transien tegangan berlebih.

Lonjakan transien berasal dari berbagai rangkaian dan sumber listrik terlepas dari apakah mereka beroperasi dari supply AC atau DC karena sering dihasilkan di dalam rangkaian itu sendiri atau ditransmisikan ke rangkaian dari sumber eksternal. Transien dalam suatu rangkaian dapat naik dengan cepat meningkatkan tegangan hingga beberapa ribu volt, dan lonjakan tegangan inilah yang harus dicegah agar tidak muncul di seluruh rangkaian dan komponen elektronik yang rumit.

Salah satu sumber transien tegangan yang paling umum adalah efek L (di/dt) yang disebabkan oleh pengalihan kumparan induktif dan arus magnetisasi

transformator, aplikasi pengalihan motor DC, dan lonjakan dari pengaktifan rangkaian lampu fluoresen atau lonjakan suplai lainnya.

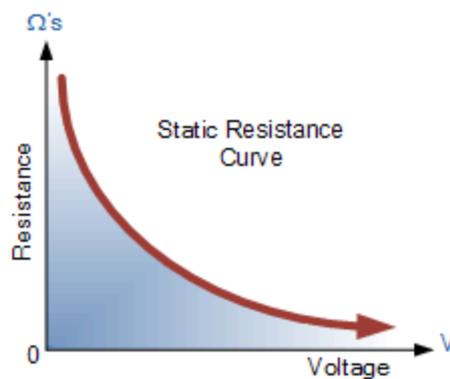
2.23.1 Transien Bentuk Gelombang AC



Gambar 2. 35 Bentuk Gelombang AC Transien

Varistor dihubungkan dalam rangkaian di seluruh suplai utama baik fase-ke-netral, fase-ke-fase untuk operasi AC, atau positif-ke-negatif untuk operasi DC dan memiliki peringkat tegangan yang sesuai dengan aplikasinya. Varistor juga dapat digunakan untuk stabilisasi tegangan DC dan terutama untuk perlindungan sirkuit elektronik terhadap pulsa tegangan berlebih.

2.23.2 Resistensi Statis Varistor



Gambar 2. 36 Kurva Resistensi Statis

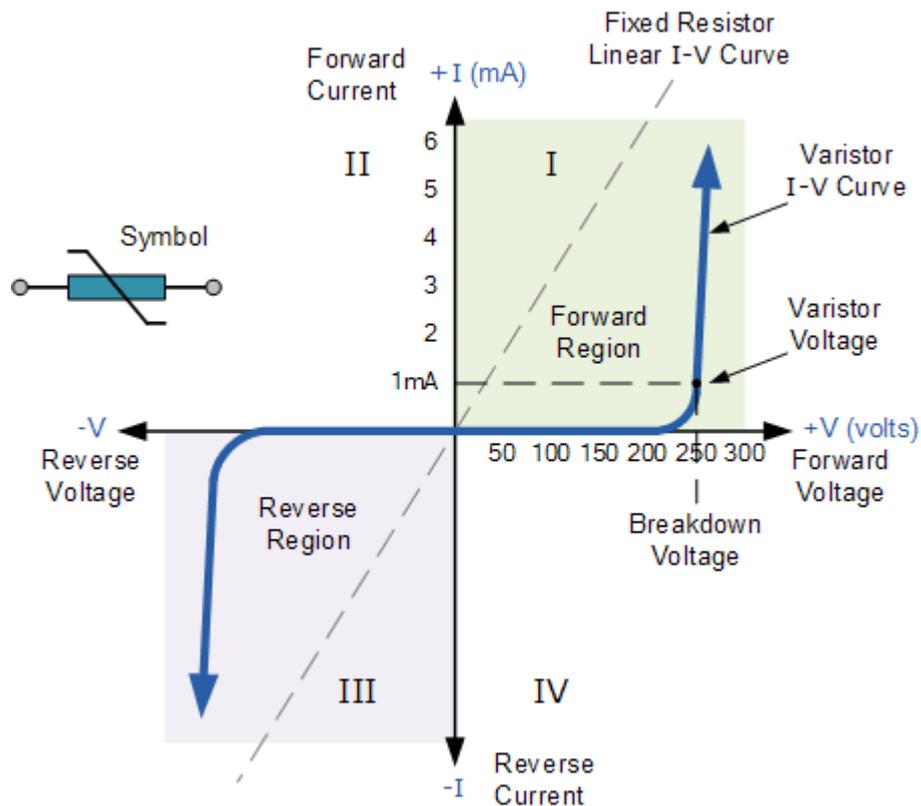
Dalam operasi normal varistor memiliki resistansi yang sangat tinggi, oleh karena itu bagian dari namanya, beroperasi dengan cara yang mirip dengan dioda zener dengan membiarkan tegangan ambang bawah lewat tanpa terpengaruh.

Namun, ketika tegangan melintasi varistor (baik polaritas) melebihi nilai pengenal varistor, resistansi efektifnya menurun dengan kuat dengan meningkatnya tegangan seperti yang ditunjukkan.

Kita tahu dari Hukum Ohm bahwa karakteristik tegangan arus (I-V) dari resistor tetap adalah garis lurus asalkan R dijaga konstan. Kemudian arus berbanding lurus dengan beda potensial di ujung resistor.

Tetapi kurva I-V dari varistor bukanlah garis lurus karena perubahan kecil tegangan menyebabkan perubahan arus yang signifikan. Tegangan normalisasi terhadap kurva karakteristik arus untuk varistor standar diberikan di bawah ini.

2.23.3 Kurva Karakteristik Varistor



Gambar 2. 37 Kurva Karakteristik Varistor

Kita dapat melihat dari atas, bahwa varistor memiliki karakteristik dua arah simetris, yaitu varistor beroperasi di kedua arah (kuadran I dan III) dari bentuk gelombang sinusoidal yang berperilaku mirip dengan dua dioda zener yang terhubung secara back-to-back. Saat tidak dihantarkan, kurva I-V menunjukkan hubungan linier karena arus yang mengalir melalui varistor tetap konstan dan

rendah hanya pada beberapa mikro-ampere arus "bocor". Hal ini karena resistansinya yang tinggi bertindak sebagai rangkaian terbuka dan tetap konstan sampai tegangan melintasi varistor (baik polaritasnya) mencapai "tegangan pengenalan" tertentu.

Tegangan pengenalan atau penjepit ini adalah tegangan melintasi varistor yang diukur dengan arus DC yang ditentukan sebesar 1mA. Artinya, level tegangan DC yang diterapkan di terminalnya yang memungkinkan arus 1mA mengalir melalui benda resistif varistor yang bergantung pada bahan yang digunakan dalam konstruksinya. Pada level tegangan ini, varistor mulai berubah dari status isolasi menjadi status konduksi.

Ketika tegangan transien melintasi varistor sama dengan atau lebih besar dari nilai pengenalan, resistansi perangkat tiba-tiba menjadi sangat kecil mengubah varistor menjadi konduktor karena efek longsor bahan semikonduktornya. Arus bocor kecil yang mengalir melalui varistor dengan cepat naik tetapi tegangan yang melewatinya terbatas pada level tepat di atas tegangan varistor.

Dengan kata lain, varistor mengatur sendiri tegangan transien yang melewatinya dengan membiarkan lebih banyak arus mengalir melaluinya dan karena kurva I-V non-liniernya yang curam, varistor dapat melewatkan arus yang sangat bervariasi pada rentang tegangan yang sempit yang memotong setiap lonjakan tegangan.

2.23.4 Nilai Kapasitansi Varistor

Karena daerah penghantar utama varistor antara dua terminalnya berperilaku seperti dielektrik, di bawah tegangan penjepitnya, varistor bertindak seperti kapasitor daripada resistor. Setiap varistor semikonduktor memiliki nilai kapasitansi yang bergantung langsung pada luasnya dan berbanding terbalik dengan ketebalannya.

Ketika digunakan dalam rangkaian DC, kapasitansi varistor tetap kurang lebih konstan asalkan tegangan yang diterapkan tidak meningkat di atas level tegangan penjepit, dan turun secara tiba-tiba mendekati tegangan DC kontinu pengenalan maksimumnya.

Namun, di sirkuit AC, kapasitansi ini dapat mempengaruhi ketahanan tubuh perangkat di daerah kebocoran non-konduksi dari karakteristik I-V-nya.

Karena biasanya dihubungkan secara paralel dengan perangkat listrik untuk melindunginya dari tegangan berlebih, resistansi kebocoran varistor turun dengan cepat dengan peningkatan frekuensi.

Hubungan ini kira-kira linier dengan frekuensi dan resistansi paralel yang dihasilkan, reaktansi AC-nya, X_c dapat dihitung menggunakan $1 / (2\pi fC)$ biasa seperti untuk kapasitor normal. Kemudian ketika frekuensi meningkat demikian pula arus bocornya.

Tetapi selain varistor berbasis semikonduktor silikon, varistor oksida logam telah dikembangkan untuk mengatasi beberapa keterbatasan yang terkait dengan sepupu silikon karbida mereka.

2.23.5 Varistor Oksida Logam

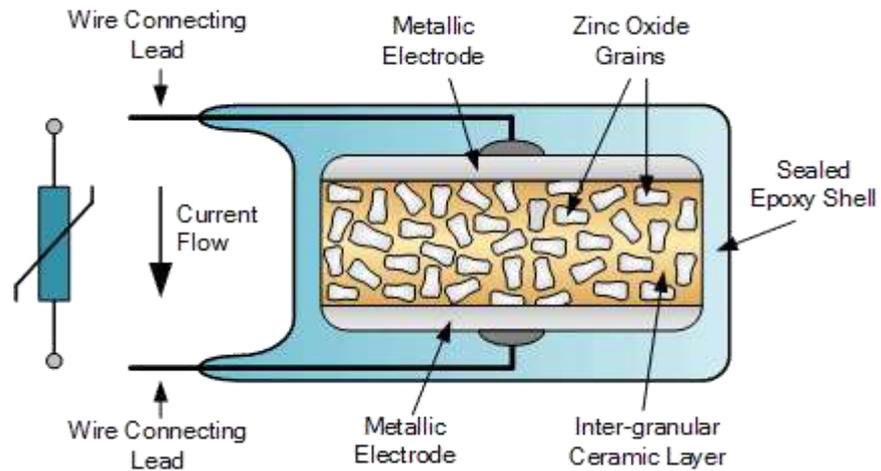
Metal Oxide Varistor atau MOV singkatnya, adalah resistor yang bergantung pada tegangan di mana bahan resistansinya adalah oksida logam, terutama seng oksida (ZnO) yang ditekan menjadi bahan seperti keramik.

Variabel oksida logam terdiri dari sekitar 90% seng oksida sebagai bahan dasar keramik ditambah bahan pengisi lainnya untuk pembentukan sambungan antar butir seng oksida. Variabel oksida logam sekarang adalah jenis perangkat penjepit tegangan yang paling umum dan tersedia untuk digunakan pada berbagai tegangan dan arus. Penggunaan oksida logam dalam konstruksinya berarti MOV sangat efektif dalam menyerap transien tegangan jangka pendek dan memiliki kemampuan penanganan energi yang lebih tinggi.

Seperti pada varistor normal, varistor oksida logam memulai konduksi pada tegangan tertentu dan menghentikan konduksi ketika tegangan turun di bawah tegangan ambang batas. Perbedaan utama antara varistor silikon karbida (SiC) standar dan varistor tipe MOV adalah bahwa arus bocor melalui bahan seng oksida MOV adalah arus yang sangat kecil pada kondisi operasi normal dan kecepatan operasinya dalam menjepit transien jauh lebih cepat.

MOV umumnya memiliki ujung radial dan lapisan epoksi biru atau hitam luar yang keras yang sangat mirip dengan kapasitor keramik cakram dan dapat dipasang secara fisik pada papan sirkuit dan PCB dengan cara yang sama. Konstruksi varistor oksida logam tipikal diberikan sebagai:

2.23.6 Metal Oxide Varistor Construction



Gambar 2. 38 Kontruksi Metal Oxide Varistor

Untuk memilih MOV yang benar untuk aplikasi tertentu, diinginkan untuk memiliki pengetahuan tentang impedansi sumber dan daya pulsa yang mungkin dari transien. Untuk transien saluran masuk atau fase terbawa, pemilihan MOV yang benar sedikit lebih sulit karena umumnya karakteristik catu daya tidak diketahui. Secara umum, pemilihan MOV untuk proteksi listrik rangkaian dari transien catu daya dan lonjakan sering kali lebih dari sekadar tebakan.

Namun, varistor oksida logam tersedia dalam berbagai tegangan varistor, dari sekitar 10 volt hingga lebih dari 1.000 volt AC atau DC, sehingga pemilihan dapat dibantu dengan mengetahui tegangan suplai. Misalnya, memilih MOV atau varistor silikon dalam hal ini, untuk tegangan, peringkat tegangan rms kontinu maksimumnya harus tepat di atas tegangan suplai tertinggi yang diharapkan, katakanlah 130 volt rms untuk suplai 120 volt, dan 260 volt rms untuk 230 volt Pasokan.

Nilai arus lonjakan maksimum yang akan diambil varistor bergantung pada lebar pulsa transien dan jumlah pengulangan pulsa. Asumsi dapat dibuat berdasarkan lebar pulsa transien yang biasanya berukuran 20 hingga 50 mikrodetik (μs). Jika peringkat arus pulsa puncak tidak mencukupi, varistor dapat menjadi terlalu panas dan menjadi rusak. Jadi agar varistor dapat beroperasi tanpa kegagalan atau degradasi, ia harus dapat dengan cepat menghilangkan energi yang diserap dari pulsa transien dan kembali dengan aman ke kondisi pra-pulsa.

2.24 ATP Draw

Penelitian ini dilakukan dengan perhitungan untuk menghitung nilai variabel yang akan dimasukkan pada simulasi dan selanjutnya dilakukan simulasi menggunakan software *Alternatice Transiens Program (ATP)*, ATP merupakan sistem program universal yang digunakan untuk simulasi digital terhadap gejala fenomena transien serta sifat elektromekanis dalam sistem tenaga elektrik.

Dengan program digital ini, jaringan yang kompleks dan sistem control dapat disimulasikan. Software ATP dipilih untuk penelitian ini karena ATP memiliki fitur-fitur yang lengkap untuk simulasi tegangan lebih transien, namun dengan sistem operasi *user* yang tidak terlalu kompleks dan data yang dimasukkan dalam program simulasi dapat menggunakan data yang real sehingga hasil yang didapat akan lebih mendekati keadaan yang sebenarnya.

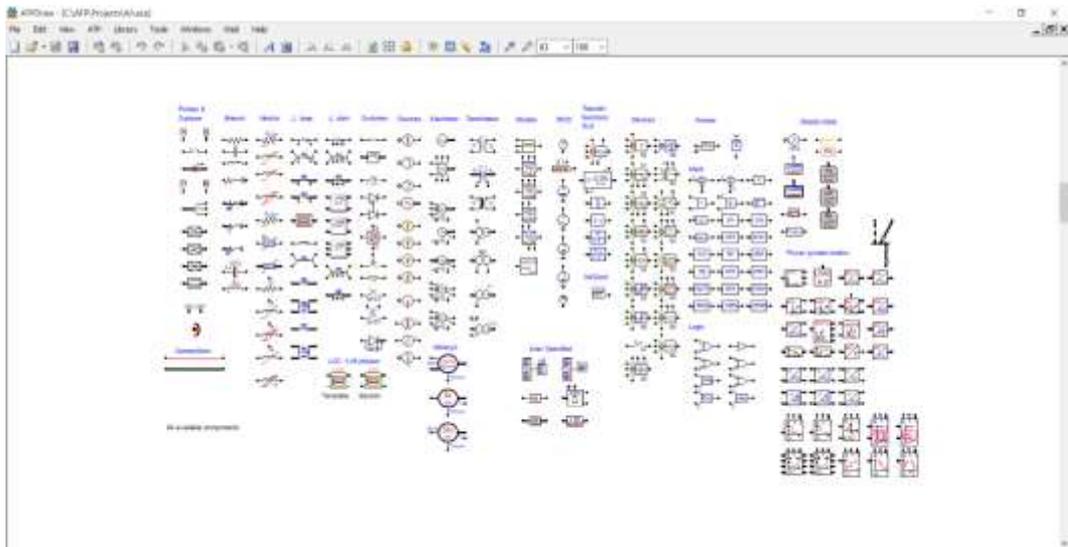
ATP memiliki kemampuan pemodelan yang luas dan fitur penting tambahan selain perhitungan transien. ATP memprediksi variabel kepentingan dalam jaringan tenaga listrik sebagai fungsi waktu, biasanya dimulai oleh beberapa gangguan. ATP memiliki banyak model termasuk motorm transformator, surja arrester, saluran transmisi dan kabel.

MODELS (bahasa simulasi) pada ATP ditujukan sebagai Bahasa deskripsi yang didukung oleh serangkaian alat simulasi untuk representasi dari studi tentang sistem varian waktu. Sebagai tujuan umum pemrograman, MODELS dapat digunakan untuk hasil simulasi pengolahan baik dalam domain *Frequency* atau dalam domain waktu.

TACS (*Transien Analysis of Control System*) adalah modul simulasi untuk analisis domain waktu sistem control yang awalnya dikembangkan untuk simulasi control HVDC converter. Untuk TACS, digunakan sistem diagram blok kontrol. *Interface* antara jaringan listrik dan TACS dilakukan dengan pertukaran sinyal seperti node tegangan, saklar arus, resistansi variasi waktu serta tegangan dan sumber arus.

Kemampuan untuk model program TACS dan MODELS memungkinkan pemodelan sistem control dan komponen dengan karakteristik nonlinear seperti busur api dan korona. Sistem dinamis tanpa jaringan listrik juga dapat

disimulasikan dengan menggunakan pemodelan sistem kontrol TACS dan MODELS.



Gambar 2. 39 Main Window ATP (Ayu, 2015)

Gambar 2.39 memperlihatkan tampilan pada software ATP, gangguan simetris atau tidak simetris dapat dibuat, seperti surja petir dan beberapa jenis operasi alih hubung (*Switching*). Model pada ATP terdiri dari komponen sebagai berikut : element R,L,C, saluran transmisi dan kabel, resistansi nonlinear dan induktansi, transformator, surge *Arrester*, saklar, *Diode*, *Thyristor*, *Triac*, mesin sinkron 3 fasa. (Ayu, 2015)