

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai koordinasi isolasi pada gardu induk dan saluran transmisi akibat sambaran petir telah banyak dilakukan sebelumnya. Beberapa penelitian yang relevan antara lain sebagai berikut:

Penelitian yang dilakukan oleh Elan, dkk pada tahun 2020 berjudul *“Analisis Koordinasi Isolasi di Gardu Induk Kuta terhadap Tegangan Lebih akibat Sambaran Petir pada Saluran Transmisi 150 kV”*. Penelitian ini menggunakan metode gelombang berjalan, teori elektro-geometris, dan metode pantulan berulang untuk menganalisis besarnya gangguan petir serta efektivitas arrester dalam melindungi peralatan gardu induk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem proteksi di GI Kuta sudah baik, dengan arus pelepasan arrester sebesar 3,918 kA yang masih jauh di bawah kapasitas nominal 10 kA, serta tegangan puncak pada transformator sebesar 588 kV yang lebih rendah dari Basic Insulation Level (BIL) 650 kV. Dengan demikian, koordinasi isolasi di GI Kuta dinilai efektif dan tidak memerlukan perbaikan tambahan.[2]

Penelitian lain dilakukan oleh Samad, dkk pada tahun 2024 dengan judul *“Insulation Coordination System 150 kV Substation and Transmission Line against Lightning Surge Interference in Nickel Smelting Plant”*. Penelitian ini berfokus pada sistem kelistrikan PT Vale Indonesia di Sorowako yang rawan sambaran petir. Metode yang digunakan adalah survei lapangan, pengumpulan data teknis, serta pemodelan dan simulasi menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tanpa proteksi, tegangan akibat sambaran petir dapat mencapai 833 kV, melebihi BIL insulator 730 kV sehingga berpotensi menimbulkan *flashover*. Namun, dengan pemasangan *Transmission Line Arrester (TLA)* dan sistem pentanahan, tegangan dapat ditekan hingga 319 kV atau terjadi reduksi sekitar 60%, sehingga tidak lagi melewati BIL. Hal ini membuktikan bahwa koordinasi isolasi dengan proteksi tambahan sangat penting untuk menjaga keandalan sistem tenaga listrik pada kawasan industri.[3]

Sementara itu, Kolompoy dkk pada tahun 2020 dalam penelitian berjudul *“Analisa Koordinasi Isolasi Arrester pada Transformator di Gardu Induk Paniki 150 kV”* menekankan pada evaluasi efektivitas arrester dalam melindungi transformator. Penelitian dilakukan dengan pengumpulan data teknis gardu induk, data sambaran petir, serta perhitungan manual untuk menentukan tegangan sistem, tegangan pengenalan arrester, tegangan

pelepasan, arus pelepasan, faktor perlindungan, dan jarak aman arrester-trafo. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa arrester dengan tegangan pengenal 138 kV memiliki kemampuan proteksi yang memadai dengan faktor perlindungan sebesar 22%. Tegangan pelepasan arrester sebesar 460 kV masih berada di bawah BIL transformator sebesar 650 kV, sehingga sistem proteksi di GI Paniki dapat dikatakan efektif. [4]

Dari ketiga penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa koordinasi isolasi memegang peranan penting dalam menjaga keandalan gardu induk dan sistem transmisi terhadap sambaran petir. Supriyatna dkk. (2020) dan Kolompoy dkk. (2020) lebih menitikberatkan pada analisis perhitungan manual berdasarkan data teknis, sedangkan Samad dkk. (2024) menggunakan simulasi perangkat lunak untuk memodelkan dampak sambaran petir dan efektivitas proteksi. Perbedaan pendekatan ini memberikan gambaran bahwa kombinasi analisis teoritis dan simulasi numerik akan menghasilkan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap sistem proteksi gardu induk dan saluran transmisi.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Jenis Gardu Induk

Gardu Induk adalah suatu instalasi yang menjadi pusat penerimaan dan penyaluran tenaga listrik pada tegangan yang berbeda. Pada gardu induk terdapat peralatan – peralatan listrik yang mempunyai fungsi: [1]

1. Berfungsi untuk mentransformasikan energi listrik antar tingkat tegangan, baik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah maupun sebaliknya.
2. Berfungsi untuk menyalurkan dan mengatur daya ke gardu induk lainnya melalui jaringan tegangan tinggi serta ke gardu distribusi melalui penyulang tegangan menengah. Adapun jenis gardu induk menurut tempat pemasangan sebagai berikut:

2.2.1.1 Gardu Induk Pasangan Luar (*Conventional*)

Gardu induk (GI) jenis pasangan luar terdiri atas peralatan tegangan tinggi yang dipasang di ruang terbuka, seperti transformator utama dan peralatan hubung (switchgear), serta dilengkapi peralatan kendali yang dipasang di dalam ruang, seperti panel penghubung (switchboard) dan baterai. Gardu induk transmisi yang memiliki kondensator sinkron terpasang di dalam ruang pada sisi tersier transformator utama serta transformator pasangan dalam juga umumnya

diklasifikasikan sebagai GI jenis pasangan luar. Jenis pasangan luar memerlukan lahan yang relatif luas, namun memiliki biaya konstruksi yang lebih rendah dan sistem pendinginan yang lebih mudah. Oleh karena itu, GI jenis ini umumnya dibangun di wilayah pinggiran kota (suburban) yang memiliki harga lahan lebih terjangkau.

2.2.1.2 Gardu Induk Pasangan Dalam

Pada gardu induk (GI) jenis pasangan dalam, seluruh peralatan utama, baik peralatan tegangan tinggi seperti transformator utama dan peralatan hubung, maupun peralatan kendali seperti panel penghubung, dipasang di dalam bangunan, meskipun sebagian kecil peralatan dapat ditempatkan di luar. Apabila sebagian peralatan tegangan tinggi dipasang di bawah permukaan tanah, gardu induk tersebut diklasifikasikan sebagai jenis pasangan setengah bawah tanah (*semi-underground type*). GI jenis pasangan dalam umumnya dibangun di pusat kota dengan harga lahan yang tinggi serta di wilayah pesisir yang memiliki tingkat kontaminasi garam yang tinggi. Selain itu, jenis ini juga dipilih untuk menjaga keserasian dengan lingkungan sekitar, serta untuk mengurangi risiko kebakaran dan gangguan kebisingan.

2.2.1.3 Gardu Induk Setengah Pasangan Luar (*Semioutdoor Substation*)

Untuk GI jenis ini sebagian dari peralatan tegangan tingginya terpasang di dalam gedung. GI jenis ini dipakai bermacam – macam corak dengan pertimbangan – pertimbangan ekonomi, pencegahan kontaminasi garam, pencegahan gangguan suara, pencegahan kebakaran dan sebagainya.

2.2.1.4 Gardu Induk Pasangan Bawah Tanah

Pada gardu induk (GI) jenis pasangan bawah tanah, hampir seluruh peralatan dipasang di dalam bangunan bawah tanah. Peralatan pendingin umumnya ditempatkan di atas permukaan tanah, dan dalam beberapa kasus ruang kontrol juga berada di atas tanah. Jenis ini banyak diterapkan di pusat kota dengan ketersediaan lahan yang terbatas, seperti di kawasan dengan tingkat kepadatan tinggi, area pertokoan, serta jalan-jalan yang dikelilingi gedung bertingkat. Sebagian besar gardu induk jenis ini dibangun di bawah badan jalan raya.

2.2.1.5 Gardu Induk Jenis Mobil (*Portable*)

Gardu induk jenis bergerak dilengkapi dengan peralatan yang dipasang pada kereta hela (*trailer*) atau kendaraan sejenis truk. Gardu

induk bergerak digunakan pada kondisi terjadinya gangguan pada gardu induk tetap, untuk mencegah terjadinya beban lebih secara berkelanjutan, serta sebagai solusi penyediaan tenaga listrik sementara di lokasi tertentu. Jenis gardu induk ini tidak digunakan secara luas, melainkan berfungsi sebagai transformator atau peralatan hubung yang mudah dipindahkan menggunakan trailer atau truk guna memenuhi kebutuhan dalam kondisi darurat.

Tabel 2.1 Perbandingan Berbagai Jenis Gardu Induk ^[1]

ITEM	JENIS		
	Pasangan Luar	Pasangan Dalam	Bawah Tanah
Saluran Transmisi yang Keluar	Atas Tanah	Terutama Bawah Tanah	Bawah Tanah
Keselarasan dengan Lingkungan	Cocok untuk daerah jalur hijau dan daerah industri	Cocok untuk daerah perumahan dan daerah industri	Cocok untuk Jalan - jalan yang ramai dan banyak gedung tinggi
Pencegahan terhadap Gangguan Suara	Agak Sukar	Mudah	Mudah
Pencegahan Terhadap Kebakaran	Mudah	Mudah	Sukar, Perlu hati - hati
Pencegahan Terhadap Banjir	Sukar di daerah yang rendah	Mudah	Sukar, Perlu hati - hati
Pencegahan Terhadap Salju	Sukar, Perlu hati – hati	Tidak Perlu	Tidak Perlu
Pencegahan Terhadap		Tidak Perlu	Tidak Perlu

Debu dan Pengotoran Garam	Sukar, Perlu hati – hati		
Daerah yang Diperlukan	Besar	Sedang	Kecil
Mudah atau Sukar Dibangun	Mudah	Agak Sukar	Agak Sukar
Waktu Pembangunan	Singkat	Agak Lama	Lama
Harga Tanah	Cocok bila harga tanah murah	Cocok bila harga tanah mahal	Cocok bila harga tanah mahal sekali
Operasi dan Pemeliharaan	Mudah	Agak Sukar	Agak Sukar

2.2.2 Peralatan Gardu Induk

Agar gardu induk dapat menjalankan fungsi dan tujuannya secara optimal, maka gardu induk dilengkapi dengan berbagai peralatan dan fasilitas pendukung. Secara umum, peralatan yang terdapat pada gardu induk meliputi:

2.2.2.1 Transformator Utama

Trafo utama dipakai untuk menurunkan atau menaikkan tegangan. Di gardu induk trafo menurunkan tegangan, sementara trafo di pusat pembangkit berfungsi menaikkan tegangan. Ada 2 jenis transformator, yaitu 1 fasa dan 3 fasa. Akhir – akhir ini banyak terlihat kemajuan dalam teknik pembuatan trafo, dan keandalannya makin baik. Trafo 3 fasa banyak dipakai karena menguntungkan. Demikian pula halnya dengan pengubah – pengubah-penyadap-berbeban, kemampuannya makin baik, lebih awet dan pemeliharannya mudah. Oleh karena itu makin banyak dipakai pengubah-penyadap-berbeban untuk GI tegangan sangat tinggi. Untuk sistem rangkaian tertutup (loop)

kadang – kadang dipakai transformator dengan pengubah fasa berbeban untuk mengatur aliran daya. [6]



Gambar 2.1. Transformator Tenaga^[5]

2.2.2.2 *Current Transformer (CT)*

Transformator arus (Current Transformer/CT) merupakan peralatan yang digunakan untuk mengukur besaran arus pada instalasi tenaga listrik di sisi primer (TET, TT, dan TM) yang memiliki nilai arus besar, dengan cara mentransformasikan arus tersebut menjadi arus bernilai lebih kecil secara akurat dan presisi untuk keperluan pengukuran dan sistem proteksi. [7]

Fungsi transformator arus adalah:

1. Mengubah besaran arus pada sistem tenaga listrik dari sisi primer menjadi besaran arus sekunder untuk keperluan pengukuran (metering) dan sistem proteksi.
2. Memberikan isolasi antara rangkaian primer dan rangkaian sekunder sebagai bentuk pengamanan bagi personel atau operator yang melakukan pengukuran.
3. Menstandarkan besaran arus sekunder pada nilai nominal tertentu, yaitu 1 A dan 5 A.

Berdasarkan fungsinya, transformator arus dibedakan menjadi dua jenis, yaitu:

a. Transformator Arus Pengukuran

Transformator arus untuk pengukuran (metering) memiliki tingkat ketelitian yang tinggi pada rentang kerja sekitar 5% hingga 120% dari

arus nominalnya, bergantung pada kelas akurasinya, serta memiliki tingkat kejenuhan yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan transformator arus untuk proteksi. Transformator arus jenis ini digunakan pada peralatan ukur seperti amperemeter, wattmeter, VARh meter, dan $\cos \phi$ meter.

b. Transformator Arus Proteksi

Transformator arus untuk proteksi dirancang memiliki ketelitian tinggi pada kondisi gangguan, ketika arus yang mengalir dapat mencapai beberapa kali arus nominalnya, serta memiliki tingkat kejenuhan yang lebih tinggi. Transformator arus jenis ini digunakan pada sistem proteksi, seperti relai arus lebih (OCR dan GFR), relai beban lebih, relai diferensial, relai daya, dan relai jarak.



Gambar 2.2, *Current Transformer* ^[5]

2.2.2.3 Potential Transformer (PT)

Transformator tegangan (Potential Transformer/PT) berfungsi menurunkan besaran tegangan pada sistem tenaga listrik menjadi tegangan yang sesuai untuk keperluan pengukuran dan proteksi. Selain itu, PT juga memberikan isolasi antara rangkaian primer dan rangkaian sekunder, sehingga instalasi pengukuran dan proteksi terpisah dari tegangan tinggi pada sistem utama. Trafo tegangan dapat diklasifikasikan menjadi 2 [8], yaitu:

1. PT Induktif (Inductive Voltage Transformer atau Electromagnetic Transformer) terdiri atas belitan primer dan sekunder, di mana tegangan pada sisi primer diinduksikan ke belitan sekunder melalui inti (core).
2. CVT (Capacitor Voltage Transformer) merupakan transformator tegangan yang menggunakan rangkaian kapasitor sebagai pembagi tegangan tinggi menjadi tegangan menengah, yang selanjutnya diinduksikan ke belitan sekunder melalui media kapasitif.



Gambar 2.3. Potential Transformer ^[5]

2.2.2.4 Neutral Grounding Resistance (NGR)

Neutral Grounding Resistor (NGR) merupakan komponen yang dipasang antara titik netral transformator dan sistem pentanahan, yang berfungsi untuk membatasi besarnya arus gangguan yang terjadi.



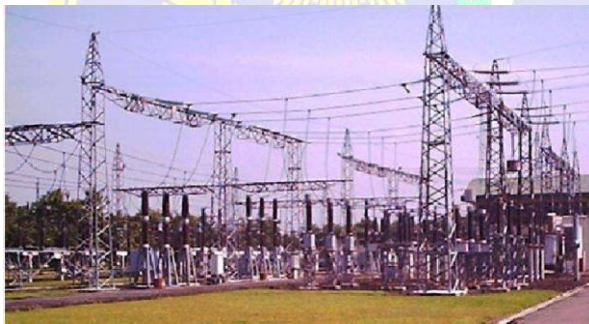
Gambar 2.4. Neutral Grounding Resistance ^[6]

2.2.2.5 Peralatan Penghubung

Saluran Transmisi dan distribusi dihubungkan dengan gardu induk, sehingga GI merupakan tempat pemusatan dari tenaga yang dibangkitkan dan interkoneksi dari sistem transmisi dan distribusi dari para pelanggan. Saluran transmisi dan distribusi ini dihubungkan dengan rel (*bus*) melalui transformator utama, setiap saluran memiliki pemutus beban (*circuit breaker*) dan pemisah (*disconnect switch*) pada sisi keluaranya. Pemutusan beban ini dipakai untuk menghubungkan dan melepaskan beban. Jika terjadi gangguan pada saluran transmisi atau alat lain, pemutus beban dipakai untuk memutuskan beban secara otomatis. Jika saluran transmisi dan distribusi, transformator, pemutus beban dan sebagainya mengalami perbaikan atau pemeriksaan, pemisah dipakai untuk memisahkan saluran dan peralatan tadi. Pemutus beban dan pemisah dinamakan peralatan penghubung atau *switchgear* [1]

1. Rel / Busbar

Rel (busbar) berfungsi sebagai titik penghubung antara transformator tenaga, saluran udara tegangan tinggi (SUTT), dan peralatan listrik lainnya dalam proses penerimaan serta penyaluran energi listrik. Rel umumnya dibuat dari bahan konduktor seperti tembaga (bar tembaga atau konduktor berongga), ACSR, Almalec, atau aluminium (bar aluminium atau konduktor berongga).



Gambar 2.5. Rel / Busbar ^[7]

2. Circuit Breaker (CB) / PMT

Circuit Breaker (CB) atau Pemutus Tenaga (PMT), berdasarkan *IEV (International Electrotechnical Vocabulary)* 441-14-20, merupakan peralatan saklar mekanis yang mampu menutup, mengalirkan, dan memutus arus beban pada kondisi normal, serta mampu menutup, mengalirkan dalam jangka waktu tertentu, dan memutus arus pada kondisi tidak normal atau gangguan, seperti hubung singkat (short circuit).

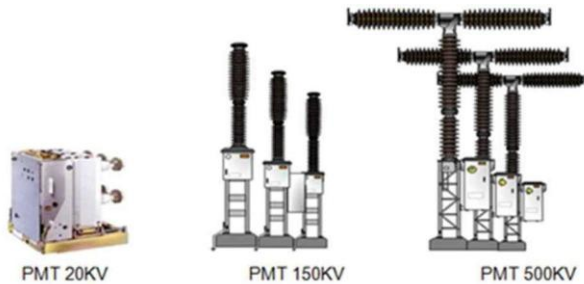
Menurut IEEE C37.100:1992 (Standard Definitions for Power Switchgear), Pemutus Tenaga (PMT) adalah peralatan saklar mekanis yang dirancang untuk menutup, mengalirkan, dan memutus arus beban pada kondisi normal sesuai dengan nilai ratingnya, serta mampu menutup, mengalirkan dalam jangka waktu tertentu, dan memutus arus pada kondisi tidak normal atau gangguan sesuai dengan batas kemampuan operasinya. Fungsi utama PMT adalah sebagai perangkat untuk menghubungkan atau memutus rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta melakukan pemutusan atau penyambungan saat terjadi arus gangguan, seperti hubung singkat, pada jaringan maupun peralatan listrik lainnya.

Klasifikasi pemutus tenaga dapat dibedakan ke dalam beberapa kategori, antara lain berdasarkan tegangan nominal, jumlah mekanisme penggerak, media isolasi yang digunakan, serta metode pemadaman busur api.

a. PMT Berdasarkan Besar/Kelas Tegangan.

PMT dapat dibedakan menjadi:

- PMT tegangan rendah (*Low Voltage*) dengan range tegangan 0.1 s/d 1 kV (SPLN 1.1995 - 3.3)
- PMT tegangan menengah (*Medium Voltage*) dengan range tegangan 1 s/d 35 kV (SPLN 1.1995 – 3.4)
- PMT tegangan tinggi (*High Voltage*) dengan range tegangan 35 s/d 245 kV (SPLN 1.1995 – 3.5)
- PMT tegangan extra tinggi (*Extra High Voltage*) dengan range tegangan lebih besar dari 245 kVAC (SPLN 1.1995 – 3.6).

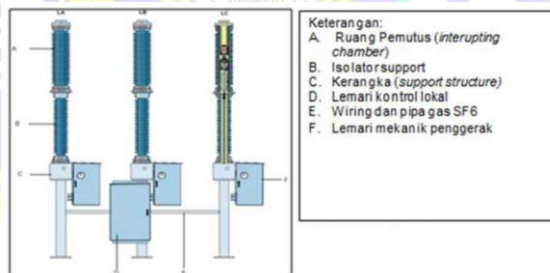


Gambar 2.6. PMT Berdasarkan Rating Tegangan ^[8]

b. PMT Berdasarkan Jumlah Mekanik Penggerak/Tripping Coil

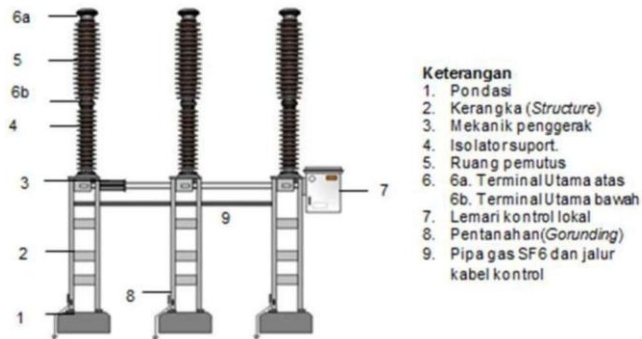
PMT dapat dibedakan menjadi:

- **PMT Single Pole.** PMT jenis ini mempunyai mekanik penggerak pada masing-masing *pole*, umumnya PMT jenis ini dipasang pada bay penghantar agar PMT bisa reclose satu fasa.



Gambar 2.7. PMT Single Pole ^[8]

- **PMT Three Pole.** PMT jenis ini mempunyai satu mekanik penggerak untuk tiga fasa, guna menghubungkan fasa satu dengan fasa lainnya di lengkapi dengan kopel mekanik, umumnya PMT jenis ini di pasang pada bay trafo dan bay kopel serta PMT 20 kV untuk distribusi.



Gambar 2.8. PMT Three Pole ^[8]

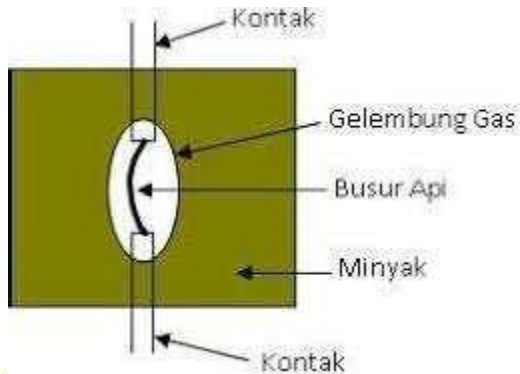
c. PMT Berdasarkan Media Isolasi

Jenis PMT dapat dibedakan menjadi:

- PMT Minyak

Ketika kontak dipisahkan, busur api terbentuk di dalam minyak sehingga menyebabkan minyak menguap dan membentuk gelembung gas yang menyelubungi busur tersebut. Panas yang dihasilkan oleh busur api mengakibatkan minyak mengalami dekomposisi dan menghasilkan gas hidrogen yang berperan dalam menghambat pembentukan pasangan ion. Oleh karena itu, proses pemadaman busur api dipengaruhi oleh pemanjangan dan pendinginan busur, serta oleh jenis gas yang dihasilkan dari dekomposisi minyak.

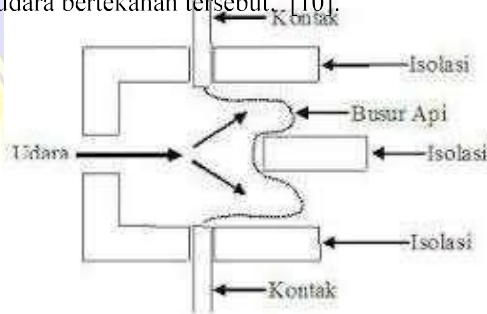
Kelemahan utama sistem ini adalah sifat minyak yang mudah terbakar serta viskositas minyak yang dapat memperlambat proses pemisahan kontak, sehingga kurang sesuai untuk sistem yang memerlukan pemutusan arus secara cepat.



Gambar 2.9. PMT dengan Media Isolasi Minyak ^[8]

- PMT Udara Tekan

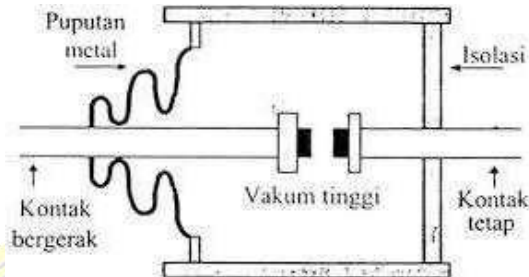
Pemutus tenaga udara tekan dirancang untuk mengatasi kelemahan pada pemutus tenaga minyak, yaitu dengan menggunakan media isolasi yang tidak mudah terbakar dan tidak menghambat proses pemisahan kontak, sehingga pemisahan kontak dapat berlangsung dengan sangat cepat. Ketika busur api terbentuk, udara bertekanan tinggi dialirkan melalui nosel pada kontak pemisah menuju busur api, sehingga proses ionisasi pada media di antara kontak dapat dipadamkan oleh hembusan udara bertekanan tersebut. [10].



Gambar 2.10. PMT dengan Media Isolasi Udara Tekan
[8]

- PMT Vakum (*Vacuum Circuit Breaker*)

Pada PMT vakum, kontak ditempatkan pada suatu bilik vakum. Untuk mencegah udara masuk kedalam bilik, maka bilik ini harus ditutup rapat dan kontak Bergeraknya diikat ketat dengan perapat logam [10].



Gambar 2.11. PMT dengan media isolasi vakum [8]

Ketika kontak dibuka, pada katoda terjadi emisi termis akibat medan tegangan yang tinggi sehingga menghasilkan elektron bebas. Elektron-elektron hasil emisi tersebut bergerak menuju anoda tanpa mengalami tumbukan dengan molekul udara, sehingga proses ionisasi tidak terjadi. Akibatnya, tidak terbentuk penambahan elektron bebas yang dapat memicu terbentuknya busur api. Dengan demikian, busur api dapat dipadamkan.

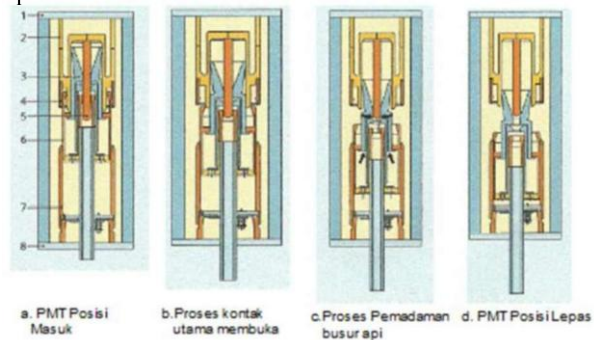
- d. PMT Berdasarkan Proses Pemadaman Busur Api di Ruang Pemutus

PMT SF6 dapat dibagi dalam 2 (dua) jenis, yaitu:

- PMT Jenis Tekanan Tunggal

PMT terisi gas SF6 dengan tekanan kira-kira 5 kg/cm², selama terjadi proses pemisahan kontak – kontak, gas SF6 ditekan (fenomena *thermal overpressure*) ke dalam suatu tabung/*cylinder* yang menempel pada kontak bergerak selanjutnya saat terjadi pemutusan, gas SF6 ditekan melalui *nozzle* yang menimbulkan tenaga

hembus/tiupan dan tiupan ini yang memadamkan busur api.



Gambar 2.12. PMT SF6 Saat Proses Pemutusan Arus Listrik [8]

Keterangan Gambar:

1. Terminal Utama atas (Rod Kontak diam)
2. Support Kontak diam
3. *Nozzle*
4. Kontak Utama (*main contact*)
5. *Arcing contact*
6. Kontak bergerak
7. Support kontak bergerak
8. Terminal utama bawah

- PMT Jenis Tekanan Ganda

PMT terisi gas SF6 dengan sistem tekanan tinggi kira-kira 12 kg / cm² dan sistem tekanan rendah kira-kira 2 kg / cm², pada waktu pemutusan busur api gas SF6 dari sistem tekanan tinggi dialirkan melalui *nozzle* ke sistem tekanan rendah. Gas pada sistem tekanan rendah kemudian dipompakan kembali ke sistem tekanan tinggi, saat ini PMT SF6 tipe ini sudah tidak diproduksi lagi.

3. *Disconnecting Switch (DS) / PMS*

Disconnecting switch atau pemisah (PMS) merupakan peralatan pada sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai saklar pemisah untuk memutus dan menyambung rangkaian pada arus yang sangat kecil (± 5 A) atau dalam kondisi tanpa beban. PMS tidak diperkenankan dioperasikan dalam kondisi pemutus tenaga (PMT) masih terhubung, guna mencegah timbulnya busur api yang dapat merusak peralatan di sekitarnya. Untuk keperluan tertentu, pemisah pada penghantar atau kabel dilengkapi dengan pemisah tanah (pisau pentanahan/*earthing blade*). Pada umumnya, antara pemisah penghantar atau kabel dan pemisah tanah dipasang perangkat pengunci mekanis (*interlock*) untuk mencegah terjadinya kesalahan operasi.



Gambar 2.13. *Disconnecting Switch* ^[5]

Sesuai dengan fungsinya, pemisah dapat dibagi menjadi:

- a. Pemisah Tanah (Pisau pentanahan) / *Earthing Switch (ES)*
Berfungsi untuk mengamankan peralatan dari sisa tegangan yang timbul sesudah SUTT diputuskan atau induksi tegangan dari penghantar atau kabel lainnya. Hal ini perlu untuk keamanan bagi orang yang bekerja pada peralatan instalasi.
- b. Pemisah Peralatan
Berfungsi untuk mengisolasi peralatan listrik dari peralatan lain atau instalasi yang bertegangan. Pemisah ini harus dimasukkan atau dibuka dalam keadaan tanpa beban.

2.2.2.6 Peralatan Pelindung

Peralatan pelindung (*Protective device*) dalam arti yang luas, disamping pemutus beban dan rele pengamanan adalah sebagai berikut:

Arrester mengamankan peralatan GI terhadap tegangan lebih abnormal yang bersifat kejut (surja / *surge*), misalnya kejutan petir dan surja hubung (*switching surge*). Akhir – akhir ini *Arrester* jenis tiupan – magnetis umum dipakai.

Beberapa peralatan netral sering dipakai di titik netral transformator untuk pengamanan pada waktu terjadi gangguan tanah. Tahanan pembumian netral dipakai untuk menekan tegangan lebih abnormal dan untuk memastikan bekerjanya rele pengamanan. Kumputan pemadam busur api (kumputan *Petersen*) dipakai untuk menghilangkan atau memadamkan busur api tanah secara otomatis, atau reactor pembumian netral dipasang untuk kompensasi arus kapasitif urutan fasa nol. Sering pula dipasang *Arrester* pada titik netral transformator untuk pengamanan isolasinya.

Bila terjadi gangguan (hubung singkat) tanah atau gangguan petir, potensial dari gardu induk mungkin naik abnormal sehingga membahayakan orang atau binatang yang ada di dekatnya, atau menyebabkan kerusakan alat. Untuk menghindarkan resiko ini, ditanamlah penghantar pentanahan dengan tahanan tanah yang diusahakan sekecil mungkin. Semua peralatan dan bangunan luar dihubungkan pada peralatan pembumian tadi.

Di dalam gardu induk dipasang peralatan perisai (*shielding device*) berupa kawat tanah atas (*overhead ground wire*) guna melindungi peralatan gardu terhadap sambaran petir langsung.

1. Lightning Arrester (LA)

Arrester merupakan peralatan proteksi yang berfungsi melindungi peralatan listrik dari tegangan lebih akibat surja petir maupun surja hubung (*switching surge*). Perangkat ini bekerja sebagai jalur pintas (*bypass*) terhadap isolasi dengan menyediakan lintasan berimpedansi rendah bagi arus menuju sistem pentanahan, sehingga tegangan lebih tidak mencapai tingkat yang dapat merusak peralatan listrik. Dalam kondisi normal, *arrester* bersifat sebagai isolator. Namun, ketika tegangan akibat surja melebihi tegangan pelepasannya, nilai resistansinya menurun sehingga

arrester bersifat konduktif. Setelah surja mereda, *arrester* dengan cepat kembali ke kondisi isolatif.



Gambar 2.14. *Lightning Arrester* ^[5]

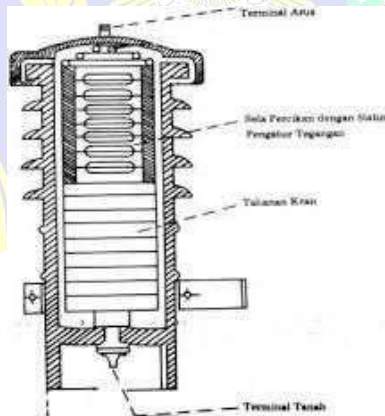
2. Prinsip Kerja Arrester

Peralatan proteksi yang paling efektif terhadap tegangan lebih adalah arrester (lightning arrester/surge diverter). Pada prinsipnya, arrester terdiri atas dua komponen utama, yaitu sela api (spark gap) dan tahanan nonlinier atau tahanan katup (valve resistor) yang dihubungkan secara seri. Batas atas dan bawah tegangan percikan ditentukan oleh tegangan maksimum sistem serta tingkat ketahanan isolasi peralatan yang dilindungi. Dalam praktiknya, permasalahan ini sering diatasi melalui penerapan metode pengaturan tegangan (voltage control) tertentu. Oleh karena itu, arrester pada dasarnya tersusun atas tiga unsur, yaitu sela api, tahanan katup, dan sistem pembagian atau pengaturan tegangan (grading system). Apabila tujuan perlindungan hanya untuk mencegah kerusakan isolasi akibat gangguan tanpa mempertimbangkan kontinuitas pelayanan, maka sela batang dapat digunakan untuk menghasilkan percikan ketika tegangan mencapai tingkat berbahaya. Namun, dalam kondisi tersebut tegangan bolak-balik sistem dapat mempertahankan busur api hingga pemutus beban dioperasikan. Dengan menambahkan tahanan secara seri pada sela api, busur api tersebut dapat

dipadamkan. Namun, apabila tahanan yang digunakan memiliki nilai tetap, maka jatuh tegangan yang timbul akan menjadi sangat besar sehingga tujuan untuk mereduksi tegangan lebih tidak tercapai dan perlindungan terhadap isolasi menjadi tidak efektif. Oleh karena itu digunakan tahanan katup (valve resistor) yang memiliki karakteristik nonlinier, yaitu nilai tahanannya menjadi sangat kecil ketika tegangan dan arus meningkat. Proses penurunan tahanan tersebut berlangsung sangat cepat, khususnya saat tegangan lebih mencapai nilai puncaknya. Dalam kondisi ini, tegangan lebih menyebabkan penurunan drastis nilai tahanan sehingga jatuh tegangan dapat dibatasi meskipun arus yang mengalir besar. [1].

Ketika tegangan lebih telah hilang dan sistem kembali pada tegangan normal, nilai tahanan meningkat kembali sehingga arus susulan dibatasi hingga sekitar 50 A. Arus susulan tersebut selanjutnya dipadamkan oleh sela api pada saat tegangan sistem mencapai titik nol pertama, sehingga perangkat ini bekerja menyerupai katup yang mengatur aliran arus, yang menjadi dasar penamaan tahanan katup. Pada arrester modern, pemadaman arus susulan yang relatif besar (sekitar 200–300 A) dilakukan dengan bantuan medan magnet. Dengan metode ini, baik amplitudo maupun durasi arus susulan dapat dikurangi, sehingga proses pemadaman dapat

nol.



terjadi sebelum tegangan sistem mencapai nilai

Gambar 2.15. Bagian - bagian Lightning Arrester ^[9]

3. Rating Arrester

Tegangan dasar arrester merupakan tegangan kerja di mana arrester masih dapat beroperasi sesuai dengan karakteristiknya. Arrester tidak boleh beroperasi pada tegangan maksimum sistem yang direncanakan, namun tetap harus mampu memutuskan arus susulan dari sistem secara efektif. Untuk menentukan tegangan dasar arrester, terlebih dahulu harus diketahui tegangan maksimum sistem yang dinyatakan dengan persamaan berikut.: [15]

$$V_m = 1,1 \times V_{nom} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dan untuk tegangan dasar arrester menggunakan persamaan: [15]

$$V_{arrester} = V_m \times \text{koefisien pentanahan} \dots\dots\dots (2.2)$$

Pada sistem yang diketanahkan efektif, nilai koefisien pentanahan adalah 80%. Untuk menentukan tegangan puncak antara fasa (V_{rms}) dengan tanah / *grounding* adalah dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_m = \frac{V_{rms} \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

V_m = Tegangan puncak antara fasa dengan ground (kV)

V_{rms} = Tegangan nominal sistem (kV)

Tabel 2.2 Karakteristik Kerja Arrester^[13]

Pengenal Tegangan Arrester KV (Puncak)	Tegangan Impuls Maksimum KV (Puncak)		Tegangan Puncak									
			3000 Ampere		5000 Ampere		10000 Ampere		E0 (KV)		R (Ohm)	
	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I
121	390	390	301	375	320	375	350	415	290	415	6	15
133	430		328		350		380		320		6	
145	460		350		408		408		342		6.6	
169	540		423		490		490		410		8	
182	585		440		510		510		430		8	
195	610		470		545		545		455		9	
285	830		645		745		745		625		12	
276	900		685		795		795		665		13	
345	1250		835		930		930		805		13	
390	1330		870		995		995		860		17	
440	1550		960		1270		1270		942		19	

4. Puncak Tegangan Surja yang Datang

Harga puncak tegangan surja yang datang atau yang masuk ke gardu induk datang dari saluran yang dibatasi oleh BIL (*Basic Insulation Level*). Dengan mengingat variasi tegangan *flashover* dan probabilitas tembus isolator maka 20% untu faktor keamanannya, sehingga harga e adalah

$$e = 1,2 \times \text{BIL saluran/trafo} \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan:

e = Tegangan surja yang datang (kV)

BIL = Tingkat isolasi dasar trafo (kV)

5. Impedansi Surja

Impedansi surja dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan surja dan arus surja, dimana gelombang surja yang merambat sepanjang saluran akan mempunyai impedansi surja tertentu. Luas penampang (A) pada penghantar dengan jari – jari kawat udara dengan tinggi (h) di atas permukaan tanah, maka dapat dinyatakan dengan persamaan berikut [13], yaitu:

$$A = \pi \times r^2 \dots\dots\dots(2.5)$$

Pada kawat udara dengan jari – jari r dan tinggi h di atas tanah,

$$L = 2 \left\{ \frac{\ln 2.h}{r} \right\} \times 10^{-7} \text{ H/m} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$C = \frac{10^{-11}}{18 \ln \left(\frac{2.5}{0.102} \right)} \text{ F/m} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dari persamaan di atas maka hantaran udara akan mempunyai impedansi surja (Z) sebesar

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana:

Z = Impedansi surja (Ω)

L = Induktansi (H/cm)

C = Kapasitansi (fard/cm)

Besar impedansi surja untuk kawat udara = 400-600 Ω dan untuk kabel = 50 – 60 Ω [13].

6. Kecepatan Merambat Gelombang

Apabila suatu gelombang energi listrik merambat sepanjang kawat dengan konstanta L dan C, maka gelombang tegangan dan arus merambat dengan kecepatan yang sama. Kedua besaran ini dihubungkan oleh suatu faktor proporsional yaitu karakteristik kawat tersebut. Untuk menentukan cepat rambat gelombang digunakan persamaan [13]:

$$V^2 = \frac{1}{L \times C} \dots \dots \dots (2.9)$$

7. Arus dan Tegangan Pelepasan Nominal

Arus pelepasan nominal adalah arus surja yang dapat mengalir melalui *Arrester* setelah tembusnya sela seri tanpa merusak atau merubah karakteristik dari penangkap petir. Besarnya arus pelepasan ini adalah [13]:

$$I = \frac{2.V - E_0}{Z + R} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana:

I_a = arus pelepasan *Arrester* (kA)

V = besarnya tegangan surja yang datang (kV)

E_0 = tegangan terminal *Arrester* (kV)

Z = impedansi surja dari kawat transmisi (Ω)

R = tahanan *Arrester*

Tegangan pelepasan *Arrester* adalah karakteristik yang paling penting dari penangkap petir untuk perlindungan peralatan dalam gardu. Tegangan pelepasan atau tegangan kerja ini menentukan tingkat perlindungan dari penangkap petir tersebut. Jika tegangan kerja *arrester* ada di bawah BIL dari peralatan yang dilindungi, maka dengan faktor keamanan yang cukup perlindungan peralatan yang optimal dapat diperoleh.

Tegangan pelepasan *arrester* didapatkan dengan persamaan [13]:

$$E_a = E_0 + (I \times R) \dots \dots \dots (2.11)$$

8. Jarak Sambaran yang Dapat Diamankan Oleh Arrester

Sambaran dekat merupakan gelombang berjalan yang mencapai gardu induk akibat sambaran petir pada saluran transmisi yang berjarak beberapa kilometer dari gardu induk. Besarnya gelombang dibatasi oleh tegangan lompatan isolator saluran selama perambatannya melalui beberapa menara transmisi. Namun, peredaman terhadap kecuraman muka gelombang relatif kecil apabila jarak rambatannya pendek, sehingga gelombang tetap memiliki kecuraman yang tinggi. Dalam kondisi tertentu, nilai puncak gelombang dapat mencapai sekitar 120–130% dari Basic Insulation Level (BIL) peralatan gardu induk, dengan kecuraman muka gelombang hingga 500 kV/μs. Meskipun demikian, karena rel gardu induk tegangan tinggi memiliki kapasitansi statis yang besar, mencapai beberapa ribu hingga puluhan ribu pikofarad, kecuraman muka gelombang umumnya mengalami penurunan yang cukup signifikan. [1].

Apabila sistem perisaian pada gardu induk dan saluran transmisinya berfungsi dengan baik, maka gelombang tegangan yang mencapai gardu induk umumnya berasal dari sambaran petir jauh. Gelombang berjalan ini dapat timbul akibat sambaran langsung pada saluran, sambaran induksi, sambaran lompatan balik dari menara, maupun sambaran pada bagian tengah gawang saluran. Dalam setiap kondisi tersebut, gelombang merambat sepanjang saluran dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya (sekitar 300 m/μs). Nilai puncak surja awal dibatasi oleh tegangan lompatan isolator saluran. Selama proses perambatan, nilai puncak dan kecuraman gelombang mengalami penurunan yang signifikan akibat peredaman dan distorsi yang disebabkan oleh korona serta efek kulit pada penghantar. Semakin pendek ekor gelombang, semakin besar pengaruh peredaman yang terjadi. Perubahan karakteristik gelombang berlangsung secara kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain polaritas gelombang (lebih besar pada polaritas positif), nilai puncak, ukuran penghantar, keberadaan kawat tanah, serta bentuk gelombang. Hubungan tersebut secara empiris dirumuskan oleh Foust dan Menger sebagai berikut. [1]:

$$E = e_0 / (1 + K \times e_0 \times X) \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana:

- E = Harga puncak (kV) setelah merambat X km
- e_0 = Tegangan surja asal (kV)
- K = Faktor atenuasi (km-1 kV-1)
 = 0.0001 untuk gelombang 20 μ s
 = 0.0002 untuk gelombang 5 μ s
 = 0.004 untuk gelombang terpotong (chopped)

9. Jarak Antara Arrester dan Alat yang Dilindungi

Meskipun yang paling baik adalah menempatkan *Arrester* sedekat mungkin dengan alat yang dilindungi, tetapi dalam praktek kadang – kadang hal ini tidak dimungkinkan. Jika jarak itu terlalu jauh, tegangan abnormal yang sampai pada terminal dari peralatan akan lebih tinggi dari tegangan pelepasan arrester. Hubungan antara tegangan terminal dari alat yang dilindungi dan jarak dari arrester, dengan memisalkan hanya ada satu saluran dan gelombang yang datang berbentuk segitiga, adalah sebagai berikut [13]:

$$E_p = E_a + \frac{2 \times A \times S}{v} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana:

E_p = Tegangan terminal dari peralatan yang dilindungi (kV)

E_a = Tegangan pelepasan dari Arrester (kV)

A = Kecuraman muka gelombang dari gelombang yang datang (kV/ μ s)

V = Kecepatan rambat gelombang yang datang (m)

S = jarak dari arrester ke alat yang dilindungi (m)

10. Penerapan Arrester

Agar penggunaan arrester dalam koordinasi isolasi dapat memberikan hasil yang optimal, perlu diperhatikan beberapa asas sebagai berikut. [1]:

- a. Seperti telah diuraikan sebelumnya, tegangan dasar 50 Hz arrester dipilih sedemikian rupa sehingga nilainya tidak terlampaui selama operasi, baik pada kondisi normal maupun saat terjadi hubung singkat.
- b. Arrester akan memberikan perlindungan yang efektif apabila terdapat selisih (margin) yang memadai antara tingkat isolasi arrester dan peralatan yang dilindungi. Daerah perlindungan harus memiliki jangkauan yang cukup untuk melindungi seluruh peralatan gardu induk dengan nilai BIL yang sama atau lebih rendah dari tingkat perlindungan arrester.
- c. Arrester harus dipasang sedekat mungkin dengan peralatan utama dan memiliki tahanan pentanahan yang rendah.
- d. Kapasitas termis arrester harus mampu menahan arus besar yang berasal dari energi tersimpan pada saluran yang panjang.
- e. Tegangan jatuh maksimum pada arrester digunakan sebagai tingkat perlindungan arrester, bukan nilai tegangan jatuh rata-rata.
- f. Nilai tegangan pelepasan arus petir harus ditentukan untuk menetapkan tingkat perlindungan arrester yang akan dikoordinasikan dengan BIL. Umumnya digunakan dua nilai arus, yaitu 5.000 A dan 10.000 A. Pada beberapa sistem, seperti di Amerika Serikat, nilai 5.000 A dianggap telah memenuhi persyaratan perlindungan.
- g. Apabila terdapat keraguan terhadap kemampuan arrester pada frekuensi 50 Hz, maka nilai tegangan yang ditetapkan ditambah dengan persentase tertentu sebagai faktor keamanan. Penambahan sekitar 10% masih umum digunakan untuk mengantisipasi kemungkinan terjadinya tegangan peralihan yang dapat menumpuk pada tegangan 50 Hz dan harus diputus oleh arrester.

2.2.2.7 Panel Hubung

Panel hubung merupakan pusat kendali utama pada suatu gardu induk. Melalui panel hubung, operator dapat memantau kondisi peralatan, melakukan pengoperasian peralatan, serta melakukan pengukuran besaran listrik seperti tegangan, arus, dan daya secara berkelanjutan. Apabila terjadi gangguan, panel hubung akan mengoperasikan pemutus tenaga secara otomatis melalui relai proteksi untuk memisahkan bagian sistem yang mengalami gangguan. Karena pengukuran tegangan dan arus tidak dapat dilakukan secara langsung pada sisi tegangan tinggi, maka digunakan transformator instrumen

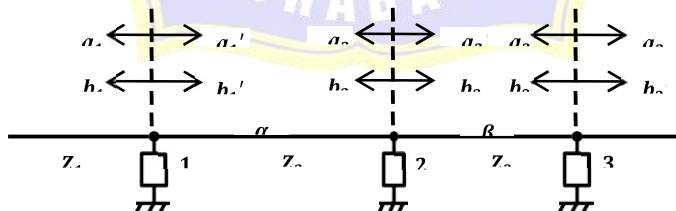
untuk menurunkan besaran tersebut menjadi nilai yang lebih rendah sekaligus memberikan isolasi antara peralatan ukur dan sisi tegangan tinggi. Panel hubung juga dikenal dengan istilah kubikel. [1].



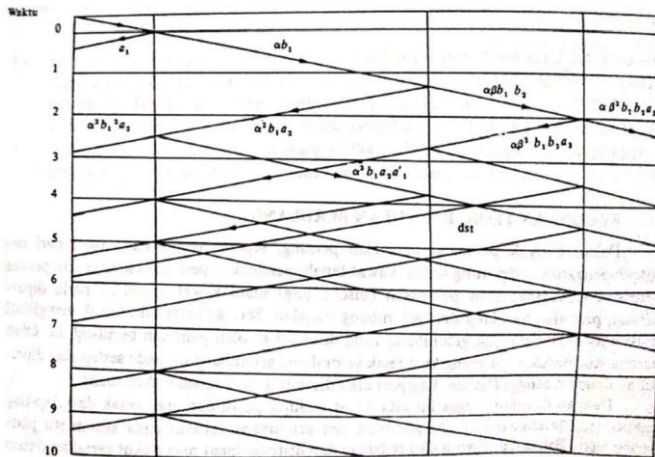
Gambar 2.16. Panel Hubung atau Kubikel ^[14]

2.2.3 Diagram Tangga

Dalam banyak persoalan – persoalan penting, seperti halnya pada teori dari pengaruh – pengaruh sepotong kabel, kawat tanah, penangkal petir dan proses pengisian atau pelepasan suatu kawat transmisi, perlu diperhatikan pantulan berulang dari gelombang berjalan. Sering sangat sulit mengikuti jejak dari begitu banyak gelombang yang disebabkan oleh pantulan berulang itu. Oleh karenanya, untuk dapat mengikuti jejak gelombang – gelombang tersebut pada setiap saat diperlukan diagram atau disebut juga diagram waktu ruang. Dengan lattice diagram dapat melihat posisi dan arah gerak dari tiap-tiap gelombang datang, gelombang pantuan dan gelombang terusan pada sistem itu secara *real-time*, serta pengaruh dari redaman dan distorsi.



Gambar 2.17. Pantulan pada Kawat Pentanahan ^[13]



Gambar 2.18. Diagram Tangga ^[13]

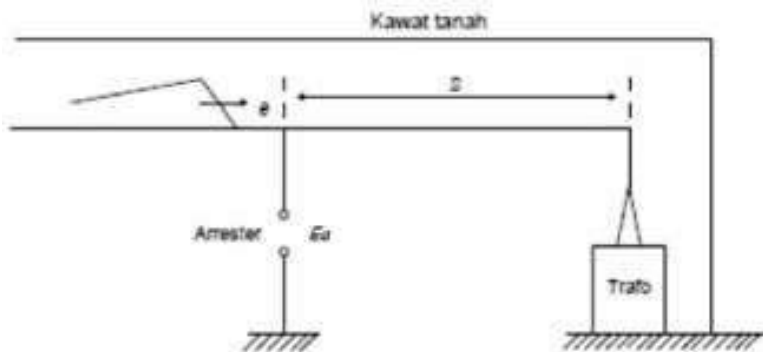
Gambar 2.1. menggambarkan suatu kawat yang diketanahkan di titik-titik 1,2 dan 3. Gelombang datang dimisalkan dari kiri. Setelah menemui titik 1 sebagai dipantulkan dan sebagian diteruskan. Gelombang yang diteruskan mencapai titik 2 dan di sini sebagian gelombang dipantulkan dan sebagian diteruskan. Hal yang sama juga terjadi pada titik 3 dan titik selanjutnya. Penghantar antara titik sambungan dapat berupa penghantar udara atau kabel yang memiliki impedansi surja, kecepatan merambat, dan redaman yang berbeda-beda.

2.2.4 Jarak Maksimum Arrester dan Transformator yang Dihubungkan dengan Saluran Udara

Disini akan dibahas jarak maksimum Arrester dan transformator bila dihubungkan dengan saluran udara dan transformator dianggap sebagai jepitan terbuka, pada Gambar 2.18 menunjukkan hubungan antara Arrester dan transformator.

Perlindungan yang baik diperoleh bila Arrester ditempatkan sedekat mungkin pada jepitan transformator. Tetapi dalam praktek sering Arrester itu harus ditempatkan sejarak S dari transformator yang dilindungi. Karena itu, jarak tersebut harus ditentukan agar perlindungan dapat berlangsung dengan baik. Untuk keperluan analisa, transformator dianggap sebagai jepitan

terbuka, yaitu keadaan yang paling berbahaya, dimana koefisien terusan sama dengan 2.



Gambar 2.19. Transformator dan Arrester Terpisah Sejauh S ^[13]

Apabila gelombang mencapai transformator, terjadi pantulan total, dan gelombang ini kembali ke kawat dengan polaritas yang sama. Waktu yang dibutuhkan oleh gelombang untuk merambat kembali ke *Arrester* = $2S/v$. Bila *Arrester* memercik (*sparkover*) tegangan jepitan *Arrester* ditentukan sebagai berikut.

$$E_a = A t + A (t - 2S/v) \\ = 2At - 2A S/v \dots\dots\dots(2.14)$$

Bila waktu percik *Arrester* t_{so} , dihitung mulai gelombang itu pertama kali sampai ke *Arrester*, maka didapatkan persamaan berikut:

$$t_{so} = \frac{E_a + 2A S/v}{2A} \dots\dots\dots(2.15)$$

Setelah *Arrester* itu memercik ia berlaku sebagai jepitan hubung singkat, dan menghasilkan gelombang sebesar:

$$-A (t - t_{so})$$

Ke kedua pihak dari *Arrester* supaya tegangan tetap E_a .

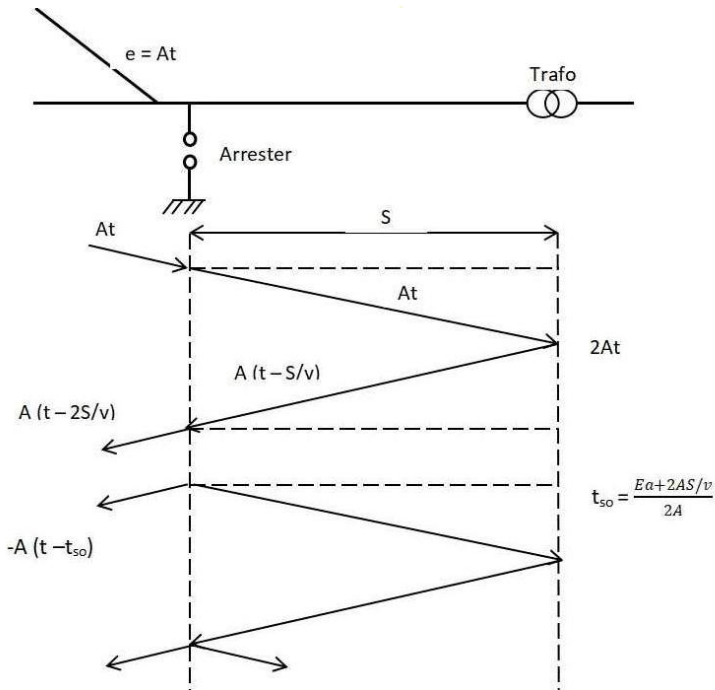
Gelombang negatif ini yang merambat ke transformator, dan setelah pantulan pertama pada transformator terjadi, jumlah tegangan pada transformator menjadi

$$\begin{aligned}
 E_p &= 2At - 2A(t - t_{so}) \\
 &= 2A t_{so} \\
 &= 2A \frac{Ea + 2AS/v}{2A} \text{ maka,}
 \end{aligned}$$

$$E_p = E_a + 2A S/v \dots \dots \dots (2.16)$$

Harga maksimum $E_p = 2E_a$

Semua kejadian di atas dapat diikuti lebih jelas melihat gambar 2.19 di bawah :



Gambar 2.19. Diagram Tangga Transformator dan Arrester ^[13]

2.2.5 Tegangan Abnormal

Meskipun tidak terdapat standar baku mengenai besaran tegangan abnormal yang harus diperhitungkan dalam perencanaan gardu induk, secara umum sumber tegangan tersebut dapat dirangkum meliputi gelombang petir, tegangan frekuensi rendah, dan surja hubung. [1].

2.2.6 Gelombang Sambaran Petir

Sambaran langsung yang mengenai rel (busbar) maupun peralatan di dalam gardu induk merupakan jenis gangguan yang paling berat dibandingkan gelombang berjalan lain yang mencapai gardu induk. Sambaran tersebut menimbulkan tegangan lebih yang sangat tinggi dan umumnya melampaui kemampuan ketahanan isolasi yang tersedia. Upaya yang umum dilakukan untuk mencegah kondisi ini adalah dengan meningkatkan sistem perlindungan petir, antara lain melalui pemasangan kawat tanah (ground wire) di atas gardu induk serta pada saluran transmisi di sekitarnya.

Sambaran induksi dapat terjadi ketika awan bermuatan petir berada di atas peralatan yang berisolasi. Awan tersebut menginduksikan muatan listrik dalam jumlah besar dengan polaritas yang berlawanan, sehingga terbentuk muatan terikat pada peralatan. Ketika terjadi pelepasan muatan dari awan petir, muatan terikat tersebut kembali menjadi muatan bebas dan merambat sebagai gelombang berjalan yang besarnya bergantung pada karakteristik pelepasan tersebut. Meskipun nilai tegangan induksi bervariasi sesuai kondisi, umumnya berada pada kisaran 100–200 kV, dengan waktu muka gelombang (wave front) lebih dari 10 μ s dan waktu ekor gelombang (wave tail) sekitar 50–100 μ s. Oleh karena itu, sambaran induksi relatif tidak terlalu berbahaya bagi peralatan tegangan tinggi, namun tetap berpotensi menimbulkan gangguan pada peralatan sistem distribusi.

Sambaran dekat merupakan gelombang berjalan yang mencapai gardu induk akibat sambaran petir pada saluran transmisi yang berjarak hanya beberapa kilometer dari gardu induk. Besarnya gelombang dibatasi oleh tegangan lompatan isolator saluran selama perambatannya melalui beberapa menara. Namun, peredaman terhadap kecuraman muka gelombang relatif kecil apabila jarak rambatannya pendek, sehingga gelombang tetap memiliki kecuraman yang tinggi. Dalam kondisi tertentu, nilai puncak gelombang dapat mencapai sekitar 120–130% dari Basic Insulation Level (BIL) peralatan gardu induk, dengan kecuraman muka gelombang hingga 500 kV/ μ s. Meskipun demikian, karena rel gardu induk tegangan tinggi memiliki kapasitansi statis yang besar, mencapai beberapa ribu hingga puluhan ribu

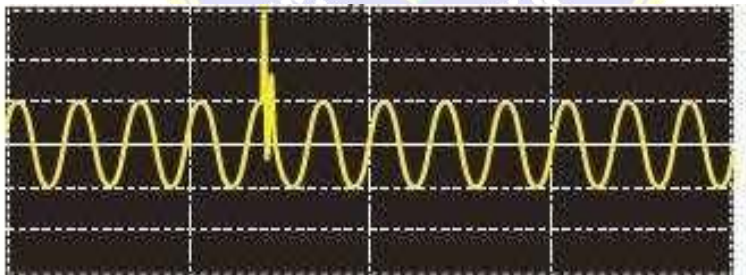
pikofarad, kecuraman muka gelombang umumnya mengalami penurunan yang cukup signifikan.

Apabila sistem perisai (shielding) pada gardu induk dan saluran transmisinya berfungsi dengan baik, maka gelombang tegangan yang mencapai gardu induk umumnya berasal dari sambaran petir jauh. Gelombang berjalan tersebut dapat disebabkan oleh sambaran langsung pada saluran, sambaran induksi, sambaran lompatan balik (back flashover) dari menara, maupun sambaran pada bagian tengah gawang (span). Dalam setiap kondisi tersebut, gelombang merambat sepanjang saluran dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya (sekitar $300 \text{ m}/\mu\text{s}$). Nilai puncak surja awal dibatasi oleh tegangan lompatan isolator saluran.

Selama proses perambatan, nilai puncak dan kecuraman gelombang mengalami penurunan yang cukup besar akibat peredaman dan distorsi yang disebabkan oleh korona serta efek kulit (skin effect) pada penghantar. Semakin pendek ekor gelombang, semakin besar pengaruh peredaman yang terjadi. Perubahan karakteristik gelombang berlangsung secara kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain polaritas gelombang (lebih besar pada polaritas positif), nilai puncak, ukuran penghantar, keberadaan kawat tanah di atasnya, serta bentuk gelombang. [1].

2.2.7 Tegangan Transien

Tegangan lebih transien adalah sebuah fenomena yang berpengaruh terhadap *power quality* suatu sistem. Fenomena ini adalah naiknya puncak tegangan hingga mencapai ribuan volt, dan terjadi dalam durasi waktu yang sangat singkat (sekitar 50 nanosecond sampai 50 milisecond). Bahkan karena sangat singkatnya kita tidak menyadari transien, dan baru kita ketahui setelah peralatan (terutama peralatan yang menggunakan *microcontroller*, *CPU*, *inverter*, dll) mengalami *failure* akibat tegangan transien.



Gambar 2.20. Ilustrasi Tegangan Transien ^[16]

Penyebab tegangan lebih transient:

- Petir
- *Switching* beban – beban besar
- Terganggunya saluran distribusi akibat kecelakaan seperti pohon tumbang, cuaca buruk, *human error*, dan lain – lain

Terjadinya tegangan transien dapat dibedakan menjadi dua kondisi, yaitu: antara live konduktor *phase to phase* dan *phase to netral* atau live konduktor dengan pentanahan. Sedangkan dampak dari tegangan lebih transien:

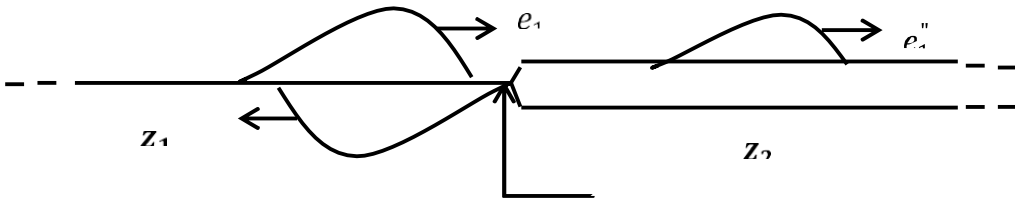
1. *Equipment failure (error process)*
2. Sistem isolasi rusak (*dielectric breakdown*)
3. *Thermal stress*, dll

Untuk mengantisipasinya diperlukan peralatan dan perbaikan sistem yang memenuhi prinsip – prinsip perlindungan tegangan lebih yaitu:

- Menahan arus transien agar tidak mrenuju ke beban
- Mengurangi atau mencegah aliran arus transien melalui pentanahan
- Membentuk filter lolos bawah (*low pass filter*) yang bersifat membatasi atau menahan gangguan.
- Membatasi tegangan yang melalui isolasi yang sensitif.
- Menyatukan pentanahan sistem dan peralatan.
- Mengalihkan arus transien menjauhi beban.

2.2.8 Pantulan Pada Gelombang Berjalan

Apabila suatu gelombang berjalan mencapai titik peralihan, seperti pada hubungan terbuka, hubungan singkat, atau perubahan impedansi, maka sebagian gelombang akan dipantulkan dan sebagian lainnya akan diteruskan melewati titik tersebut. Pada titik peralihan, nilai tegangan dan arus dapat berkisar antara 0 hingga dua kali nilai tegangan gelombang datang. Gelombang yang datang disebut sebagai gelombang insiden (*incident wave*), sedangkan gelombang yang timbul akibat peralihan tersebut disebut gelombang pantulan (*reflected wave*) dan gelombang terusan (*transmitted wave*).



Gambar 2.21. Perubahan Impedansi pada Titik Peralihan ^[13]

Keterangan Gambar:

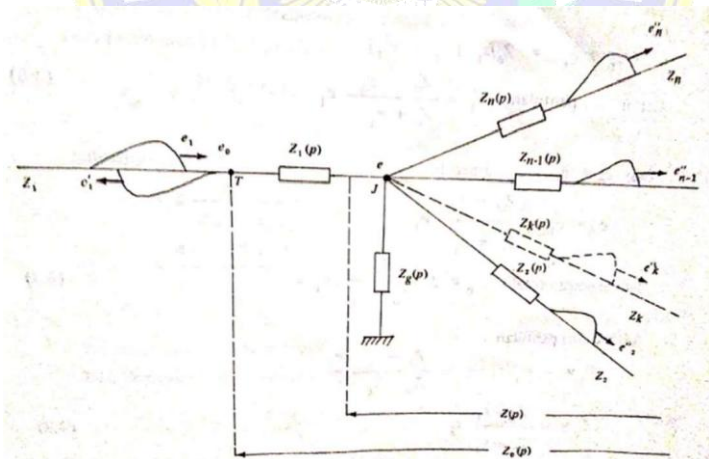
e_1 = Incident wave (gelombang datang)

e_1' = Reflected wave (gelombang pantulan)

e_1'' = Transmitted wave (gelombang terusan)

a) Titik-titik Peralihan

Diberikan permisalan sebuah gelombang datang e_1 merambat pada saluran dengan impedansi surja z_1 dan menemui titik peralihan T , seperti yang terlihat pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22. Titik Peralihan ^[13]

Bila gelombang datang e_1 mencapai titik peralihan, sebagian akan dipantulkan yaitu berupa e_1' , dan sebagian lain akan diteruskan, yaitu e_2'' , e_2''' , e_n''' pada kawat z_2 , z_k , z_n .

Dengan,

e = tegangan pada titik sambungan J .

e_0 = tegangan pada titik peralihan T .

$Z_k(p)$ = impedansi seri pada saluran k .

$Z(p)$ = impedansi di belakang titik sambungan J .

$Z_0(p)$ = impedansi di belakang titik peralihan T .

z_k = impedansi surja saluran k .

Dimisalkan titik peralihan tersebut sebagai pusat koordinat, dan semua kawat tipikal, maka terdapat hubungan-hubungan:

$$(i) \text{ Gelombang datang: } \frac{e_1}{i_1} = z_1 \dots\dots\dots (2.17)$$

$$(ii) \text{ Gelombang pantulan: } \frac{e_1'}{i_1'} = -z_1 \dots\dots\dots (2.18)$$

$$(iv) \text{ Gelombang terusan: } \frac{e_1''}{i_1''} = z_k \dots\dots\dots (2.19)$$

Jumlah gelombang tegangan dan arus pada titik peralihan:

$$i_0 = i_1 + i_1' \dots\dots\dots (2.20)$$

$$e_0 = e_1 + e_1' = Z_0(p) \cdot i_0 \dots\dots\dots (2.21)$$

Kemudian, substitusi Persamaan (2.13) dan (2.14) ke dalam persamaan (2.15) dan (2.16):

$$*i_0 = i_1 + i_1' = \frac{e_1}{z_1} - \frac{e_1'}{z_1}$$

$$e_0 = e_1 + e_1' = Z_0 \cdot i_0 = Z_0 \cdot \left(\frac{e_1}{z_1} - \frac{e_1'}{z_1} \right)$$

$$\Rightarrow e_1 + e_1' = \frac{Z_0}{z_1} \cdot (e_1 - e_1')$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow e_1' &= -e_1 + \frac{Z_0}{z_1} \cdot (e_1 - e_1') \\
\Rightarrow e_1' &= -e_1 + e_1 \frac{Z_0}{z_1} - e_1' \frac{Z_0}{z_1} \\
\Rightarrow e_1' + e_1' \frac{Z_0}{z_1} &= e_1 \left(-1 + \frac{Z_0}{z_1} \right) \\
\Rightarrow e_1' \left(1 + \frac{Z_0}{z_1} \right) &= e_1 \left(-1 + \frac{Z_0}{z_1} \right) \\
\Rightarrow e_1' &= e_1 \frac{(-1 + \frac{Z_0}{z_1})}{(1 + \frac{Z_0}{z_1})} \\
\Rightarrow e_1' &= e_1 \frac{(Z_0 - z_1)}{(Z_0 + z_1)}
\end{aligned}$$

#Jadi, besarnya gelombang pantulan: $e_1' = \left(\frac{Z_0 - z_1}{Z_0 + z_1} \right) e_1$ (2.22)

Dari $e_0 = e_1 + e_1'$, sehingga diperoleh

$$\begin{aligned}
\Rightarrow e_0 &= e_1 + e_1' = e_1 + e_1 \frac{(Z_0 - z_1)}{(Z_0 + z_1)} \\
\Rightarrow e_0 &= \frac{e_1(Z_0 + z_1) + e_1(Z_0 - z_1)}{(Z_0 + z_1)} \\
\Rightarrow e_0 &= \frac{e_1 Z_0 + e_1 z_1 + e_1 Z_0 - e_1 z_1}{(Z_0 + z_1)} \\
\Rightarrow e_0 &= \frac{2e_1 Z_0}{(Z_0 + z_1)} = 2e_1 \frac{Z_0}{Z_0 + z_1}
\end{aligned}$$

#Jadi, besarnya tegangan total: $e_0 = \left(2 \frac{Z_0}{Z_0 + z_1} \right) e_1$ (2.23)

$$\begin{aligned}
*i_1' &= -\frac{e_1'}{z_1} = -\frac{\left(\frac{Z_0 - z_1}{Z_0 + z_1} \right) e_1}{z_1} \\
\Rightarrow i_1' &= -\frac{(Z_0 - z_1)}{(Z_0 + z_1)} \cdot \frac{e_1}{z_1} \\
\Rightarrow i_1' &= -\frac{(Z_0 - z_1)}{(Z_0 + z_1)} \cdot i_1
\end{aligned}$$

#Jadi, besarnya arus pantulan: $i_1' = \left(-\frac{Z_0 - z_1}{Z_0 + z_1} \right) i_1$ (2.24)

* $i_0 = i_1 + i_1'$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow i_0 &= i_1 + \left(-\frac{Z_0 - z_1}{Z_0 + z_1} \right) i_1 \\
\Rightarrow i_0 &= i_1 - \left(\frac{Z_0 - z_1}{Z_0 + z_1} \right) i_1 \\
\Rightarrow i_0 &= i_1 - \left(\frac{Z_0 - z_1}{Z_0 + z_1} \right) i_1
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow i_0 &= i_1 \left(1 - \left(\frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1}\right)\right) \\ \Rightarrow i_0 &= i_1 \left(\frac{Z_0 + Z_1 - Z_0 + Z_1}{Z_0 + Z_1}\right) \\ \Rightarrow i_0 &= i_1 \left(\frac{2Z_1}{Z_0 + Z_1}\right) \\ \Rightarrow i_0 &= \left(2 \frac{Z_1}{Z_0 + Z_1}\right) i_1\end{aligned}$$

#Jadi, besarnya arus total: $i_0 = \left(2 \frac{Z_1}{Z_0 + Z_1}\right) i_1$(2.25)

Persamaan-persamaan umum untuk gelombang pantulan dan gelombang terusan sebagai berikut, bila,

$$\frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1} = k_1 \quad (\text{koefisien tegangan pantulan})$$

$$-\frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1} = k_2 \quad (\text{koefisien arus pantulan})$$

$$2 \frac{Z_0}{Z_0 + Z_1} = k_3 \quad (\text{koefisien tegangan terusan})$$

$$2 \frac{Z_1}{Z_0 + Z_1} = k_4 \quad (\text{koefisien arus terusan})$$

Sehingga,

$$1. \text{ Tegangan pantulan: } e_0 = \left(2 \frac{Z_0}{Z_1}\right) e_1$$

$$2. \text{ Arus pantulan : } i'_1 = \left(-\frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1}\right) i_1$$

$$3. \text{ Tegangan terusan : } e_0 = \left(2 \frac{Z_0}{Z_0 + Z_1}\right) e_1$$

$$4. \text{ Arus terusan : } i_0 = \left(2 \frac{Z_1}{Z_0 + Z_1}\right) i_1$$

#Impedansi di belakang titik peralihan:

$$Z_0 = Z_1 + Z = Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_g} + \sum_{k=2}^n \frac{1}{Z_k + Z_k}} \dots\dots\dots(2.26)$$

Eliminasi Z_0 antara persamaan (2.23) dan persamaan (2.25), sehingga dari persamaan (2.25) diperoleh:

$$\Rightarrow Z_0 = \frac{2z_1 i_1 - z_1 i_0}{i_0}$$

Substitusi dalam persamaan (2.19) diperoleh,

$$\Rightarrow e_0 = \left(2 \frac{Z_0}{Z_0 + z_1}\right) e_1 = \frac{4e_1 - 2z_1 i_0}{2e_1 - z_1 i_0 + z_1 i_0} e_1$$

$$e_0 = 2e_1 - z_1 i_0 \dots \dots \dots (2.27)$$

#Tegangan pada titik sambungan:

Dari persamaan (3.9), diperoleh,

$$e = Zi_0 = 2 \frac{Z}{Z_0 + z_1} e_1 \dots \dots \dots (2.28)$$

#Arus melalui impedansi shunt Z_g :

$$i_g = \frac{e}{Z_g} = \frac{2 \frac{Z}{Z_0 + z_1} e_1}{Z_g} = 2 \frac{Z}{Z_0 + z_1} \frac{e_1}{Z_g} \dots \dots \dots (2.29)$$

#Arus dan tegangan yang diteruskan pada kawat k , di mana $2 \leq k \leq n$:

Dari persamaan (1.12), diperoleh,

$$i_k'' = \frac{e}{Z_k + z_k} = 2 \frac{Z}{Z_0 + z_1} \cdot \frac{e_1}{Z_k + z_k} \dots \dots \dots (2.30)$$

$$e_k'' = z_k i_k'' = 2 \frac{Z}{Z_0 + z_1} \cdot \frac{z_k}{Z_k + z_k} e_1 \dots \dots \dots (2.31)$$

Asumsi $k=2$, dan $Z_1 = Z_2 = 0$, $Z_g = \infty$, Maka:

$$\Rightarrow Z_0 = Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_g} + \sum_{k=2}^n \frac{1}{Z_k + z_k}}$$

$$\Rightarrow Z_0 = 0 + \frac{1}{0 + \frac{1}{z_2}} = z_2$$

#Jadi,

$$\Rightarrow e_1' = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} e_1, \text{ dan}$$

$$\Rightarrow e_1'' = 2 \frac{z_2}{z_2 + z_1} e_1$$

#Jatuh tegangan pada impedansi seri:

$$E_1 = Z_1 i_0 = 2 \frac{z_1}{Z_0 + z_1} e_1, \dots \dots \dots (2.32)$$

$$E_k = Z_k i_k'' = 2 \frac{Z}{Z_0 + Z_1} \frac{Z_k}{Z_k + Z_k} e_1 \dots \dots \dots (2.33)$$

2.2.9 Koordinasi Isolasi

Penggunaan isolasi harus dilakukan secara rasional, yaitu tingkat isolasi yang diterapkan harus didasarkan pada kriteria dan tingkat tertentu yang telah ditetapkan. Di sisi lain, pemilihan isolasi juga harus mempertimbangkan aspek ekonomis tanpa mengurangi fungsinya sebagai bahan isolator. Oleh karena itu, diperlukan perangkat proteksi yang dipasang untuk melindungi peralatan dari bahaya tegangan lebih, baik yang berasal dari luar maupun yang timbul dari dalam peralatan itu sendiri. [17]

Oleh karena itu, untuk mengintegrasikan kedua aspek tersebut diperlukan analisis koordinasi isolasi, yang dapat didefinisikan sebagai hubungan antara tingkat ketahanan isolasi peralatan dan rangkaian listrik di satu sisi dengan karakteristik perangkat proteksi di sisi lainnya, sehingga isolasi dapat terlindungi dari bahaya tegangan lebih secara ekonomis. Koordinasi isolasi diwujudkan melalui langkah-langkah yang bertujuan mencegah kerusakan pada peralatan listrik akibat tegangan lebih serta membatasi terjadinya lompatan tegangan yang berpotensi menimbulkan kerusakan. Upaya ini dilakukan dengan menetapkan hubungan yang tepat antara tingkat ketahanan isolasi peralatan listrik dan karakteristik perangkat proteksi terhadap tegangan lebih, yang masing-masing dinyatakan melalui tingkat ketahanan impuls dan tingkat perlindungan impuls. [23]

Koordinasi isolasi memiliki dua tujuan utama [23], yaitu:

1. Perlindungan terhadap peralatan
2. Penghematan (ekonomis)

Dalam hal koordinasi isolasi, tujuan yang dicapai adalah sebuah sistem tenaga listrik yang bagian-bagiannya, masing-masing dan satu sama lain, mempunyai daya isolasi yang diatur sedemikian rupa, sehingga dalam setiap kondisi operasi, kualitas pelayanan (penyediaan) dicapai dengan biaya seminimum mungkin.

Dalam faktor biaya harus dimasukkan biaya pertama peralatan (*first cost*), biaya kerusakan, biaya pelayanan berhenti (*outages*), biaya peralatan cadangan (*spare*), dan biaya penurunan dan peningkatan kualitas pelayanan.

Rasionalisasi daripada daya isolasi suatu sistem dan implementasi koordinasi isolasi menyangkut prinsip-prinsip tertentu yang di dalam praktik berupa aturan-aturan sebagai berikut:

a) Arrester petir (*lightning arrester*) dipakai sebagai alat pelindung utama

Hal ini berakibat bahwa tegangan lebih harus ditentukan untuk peralatan yang harus ditentukan untuk peralatan yang harus dilindungi. Oleh

karena *Arrester* adalah alat yang peka terhadap tegangan, maka pemakaiannya harus disesuaikan dengan tegangan sistem.

b) Tegangan sistem memiliki tiga nilai:

1. Tegangan nominal, yakni tegangan kawat kira-kira yang membedakan sebuah sistem dengan yang lain.

2. Tegangan dasar (*rated*), tegangan perencanaan di mana alat tersebut dapat dipakai secara kontinu.

3. Tegangan maksimum, yaitu tegangan yang dapat ditahan oleh alat yang bersangkutan dan di mana *Arrester* dipasang.

c) Ada dua macam sistem.

Sistem pertama adalah sistem yang netralnya diisolasikan (*isolated neutral system*) dan yang dibumikan secara efektif (*effectively grounded system*). Pada kedua sistem ini, tegangan transmisi maksimumnya dapat mencapai 105% dari tegangan dasar.

d) Tegangan dasar (*rating*) yang dipakai pada *arrester* adalah tegangan maksimum frekuensi rendah (50 c/s).

Keadaan ini adalah di mana *Arrester* tersebut bekerja dengan baik. Pada sistem terisolasi, *Arrester* harus memiliki tegangan dasar maksimum tidak melebihi tegangan dasar maksimum dari sistem. *Arrester* demikian disebut dengan tegangan dasar penuh atau *Arrester* 100%. Pada sistem yang dibumikan, tegangan dasar maksimum dari *Arrester* dapat diturunkan menjadi 80% dari tegangan sistem maksimum. Cara dan aplikasi khusus memungkinkan pemakaian *Arrester* antara 75-80%.

e) Dalam penentuan isolasi trafo, dipakai isolasi yang dikurangi (*reduced isolation*)

Maksudnya ialah tingkat isolasi yang diterapkan lebih rendah dari apa yang telah ditetapkan dalam standar. Bila tingkat isolasi penuh sebagaimana dinyatakan oleh kolom 2 (BIL) dalam Tabel 2.3, maka tingkat isolasi yang dikurangi adalah semua tingkat yang kurang daripada harga-harga yang ditetapkan dalam kolom-kolom tersebut. Sebagai contoh dalam penerapan isolasi yang dikurangi pada trafo, maka pada kolom 3 tertera harga-harga yang besarnya 80% dari kolom 2. Jadi, bila sebuah sistem, 138 kV yang dibumikan dapat memakai *arrester* 80%, maka tentu saja dapat dipakai BIL 80%, yaitu 520 kV. Pada tegangan ekstra tinggi, pengurangan isolasi ini sangat penting artinya.

f) Terdapat dua unsur utama koordinasi isolasi.

Dua unsur yang penting adalah karakteristik volt-waktu (*volt-time curve*) dari isolasi yang harus dilindungi dan karakteristik pelindung dari *Arrester*. Aturan yang diterapkan adalah bahwa harus ada selisih cukup besar antara tingkat perlindungan dan tingkat daya isolasi yang harus dilindungi, di manapun keduanya ditempatkan dalam gardu, tanpa melupakan faktor penghematan yang menjadi salah satu tujuan koordinasi isolasi. Pada tegangan ekstra tinggi, terdapat dua pasang karakteristik yang perlu diperhatikan, yaitu surja petir dan surja hubung.

Tabel 2.3. Tingkat Reduced Isolation ^[23]

Kelas Referensi (kV)	BIL (kV)	80% BIL (kV)
1,2	30	24
8,7	75	60
12	95	76
23	150	120
34,5	200	160
66	250	200
79	350	280
92	450	360
115	550	440
138	650	520
161	750	600
180	825	660
196	900	720
230	1050	840
260	1175	940
287	1300	1040
345	1550	1240

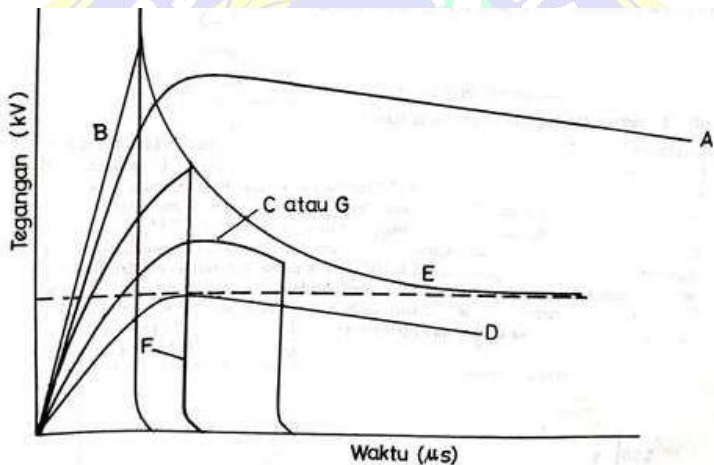
2.2.9.1 Karakteristik Isolasi

2.2.9.1.1 Kurva Volt-Waktu (*Volt-Time Curve*)

Terdapat beberapa jenis surja yang harus dilindungi oleh *Arrester*. Surja pada kawat transmisi dapat menyerupai Kurva A pada Gambar 2.20, bila ia sampai pada suatu gardu induk.

Tergantung pada besarnya surja yang datang, maka ia dapat datang ke gardu induk sebagai gelombang yang curam terpotong pada mukanya (Kurva B), atau sebagai gelombang curam yang terpotong kira-kira $3\mu s$ pada ekornya (Kurva C), atau dapat datang berbentuk gelombang penuh (Kurva D). Kurva E yang didapat dengan menghubungkan ketiga puncak dari tiga gelombang di atas, merupakan karakteristik volt-waktu dari isolasi yang harus menahan bermacam-macam gelombang tegangan yang datang pada gardu induk.

Kurva ini juga melalui titik-titik lompatan api pada puncak (Kurva F) dan lompatan api 50% (Kurva G). Jadi, kurva volt-waktu adalah kurva yang menghubungkan an puncak-puncak tegangan lompatan api bila sejumlah impuls dengan bentuk tertentu diterapkan pada isolasi. Dengan kata lain, kurva volt-waktu adalah tempat kedudukan titik-titik dengan koordinat (t_{lompatan} , V_{maks})



Gambar 2.23. Volt-Time Curve ^[13]

Keterangan:

- A: Gelombang impuls yang datang
- B: Gelombang cepat, terpotong

- C: Gelombang terpotong pada ekor dengan kemungkinan lompatan 50%
- D: Gelombang penuh
- E: Kurva Volt-Waktu
- F: Gelombang terpotong pada puncak pada muka
- G: Gelombang terpotong pada ekor

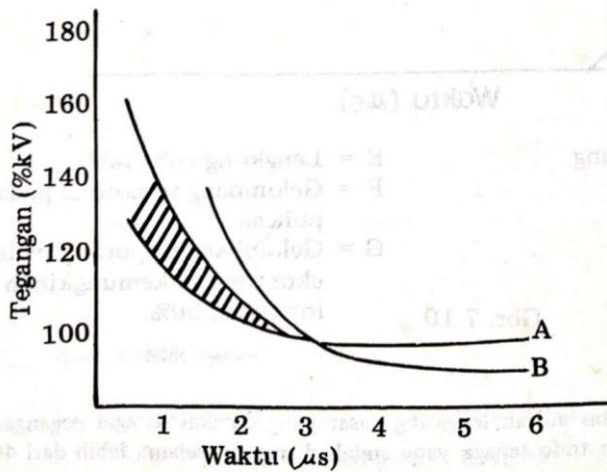
2.2.9.1.2 Karakteristik Trafo

Kurva volt-waktu di atas adalah kurva dasar yang digunakan sebagai pegangan dalam pengujian impuls terhadap trafo tenaga (Philip, 1957). Untuk saat ini hal yang diuji adalah semua trafo tenaga 138 kV ke atas. Dengan memakai dua macam bentuk gelombang saja, yakni gelombang cepat (Kurva B) dan gelombang penuh (Kurva D), oleh karena gelombang bentuk kurva C hanya menentukan satu titik saja pada kurva isolasi dari trafo.

Pengujian terhadap trafo dilakukan terutama karena trafo adalah alat yang paling mahal dalam sebuah gardu induk, sehingga kegagalannya mengakibatkan keluarnya dari pemakaian yang memakan waktu serta biaya. Tingkat impuls dapat ditentukan oleh:

- a) Tegangan gagal (breakdown voltage) dari isolasi utama (terhadap tanah)
- b) Tegangan gagal dari isolasi lainnya (antara lilitan dan gulungan)
- c) Tegangan lompatan api (sparkover voltage) dari bushing
- d) Kombinasi dari tegangan-tegangan di atas

Karakteristik impuls dari isolasi internal berbeda dengan isolasi di udara dalam dua hal. Pertama adalah perbandingan impuls (kegagalan minimum terhadap impuls dibagi kegagalan) terhadap 50 c/s untuk isolasi trafo adalah 2,1 – 2,2. Sedangkan sela-batang, isolator dan bushing kira-kira 1,5 atau kurang.

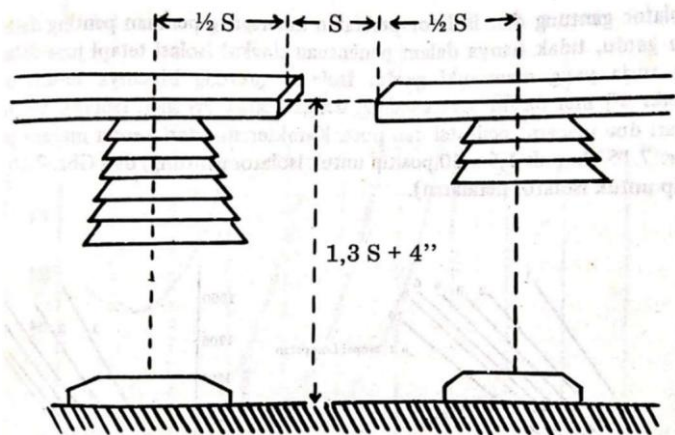


Gambar 2.24. Kurva Karakteristik Impuls pada Isolasi Transformator ^[13]

Kedua, tegangan gagal dari isolasi (utama) trafo tidak banyak berubah dengan waktu sesudah beberapa mikrodetik. Oleh karena *bushing* merupakan bagian yang vital dari trafo, lompatan api impulsnya harus diperhatikan ketika menetapkan tingkat isolasi trafo. Pada umumnya, *bushing* memiliki lompatan api lebih tinggi pada waktu-waktu pendek, sedang pada waktu-waktu panjang lompatan apinya mungkin lebih tinggi atau lebih rendah dari gulungan trafo, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.24.

2.2.9.1.3 Karakteristik Lompatan Api dari Sela-Batang dan Isolator

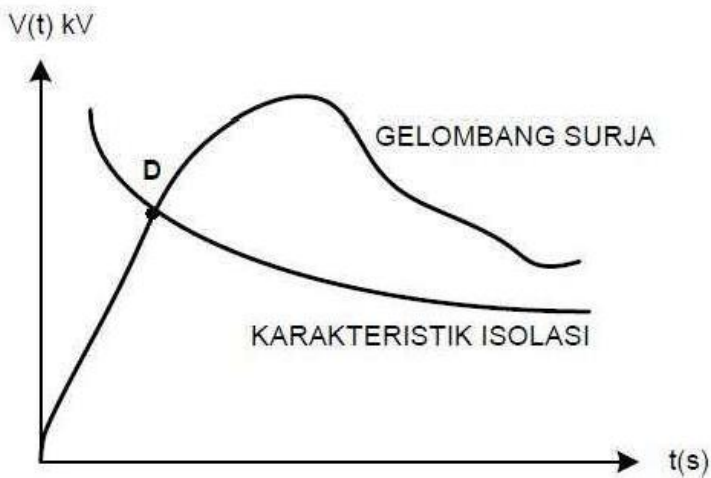
Dalam jurnal IEEE Vol.53, oleh karena sela yang berbeda memberikan hasil yang berlainan, maka ditentukanlah sela-batang standar, di mana sela –batang yang terdiri dari dua batang persegi empat dipotong rata (*square-cornered, square cut*), berukuran 0,5 inci, dipasang koaksial dan menggantung dari titik penyangganya setengah jarak sela. Kedua batang dipasang di atas isolator standar sehingga tinggi sela dari permukaan tanah 1,3 kali jarak sela ditambah 4 inci, dengan toleransi 10% (Gambar 2.25)



Gambar 2.25. Jarak Antara Sela-Batang dan Isolator^[13]

2.2.10 Basic Insulation Level (BIL)

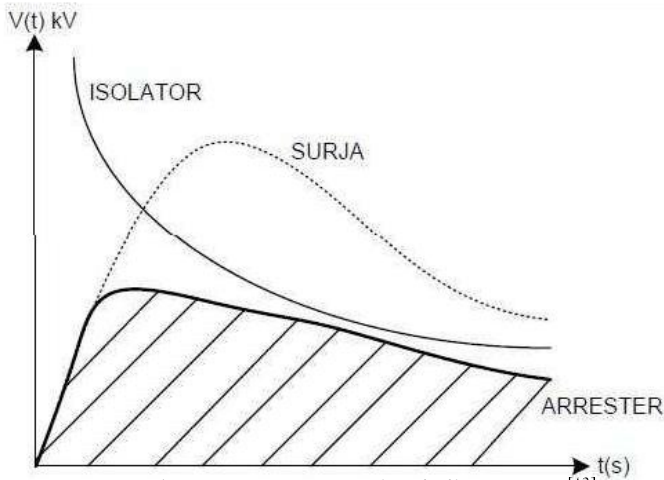
Level isolasi dirancang untuk menahan tegangan impuls, bukan hanya saat tegangan normal. BIL dirancang untuk menahan saat harga puncak dari tegangan impuls petir.



Gambar 2.26 Kurva Karakteristik Isolasi dan Gelombang Surja Petir^[13]

Seiring bertambahnya waktu, kemampuan isolasi dalam menahan tegangan cenderung mengalami penurunan. Oleh karena itu, untuk mencegah terjadinya kerusakan atau tembusnya isolasi, besarnya tegangan lebih harus dijaga tetap lebih rendah daripada tegangan tembus (breakdown) isolasi..

Bila $V_s(t)$ adalah amplitudo tegangan gelombang surja dan $V_i(t)$ kemampuan menahan tegangan isolasi, dengan visualisasi Gambar 2.26, titik D adalah amplitudo gelombang surja yang telah mencapai tegangan tembus isolasi pada waktu t_D ($V_s(t) = V_i(t)$).



Gambar 2.27 Kurva Karakteristik Arrester^[13]

Dengan karakteristik isolasi dan karakteristik arrester dapat disusun suatu sistem pengamanan yang terkoordinasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.27. Tegangan operasi proteksi harus lebih kecil dari tegangan tembus isolasi. Koordinasi antara kemampuan isolasi dan pengamanan sistem ditentukan dengan *Basic Insulation Level* (BIL).

2.2.11 Mekanisme Gelombang Surja Petir Masuk Gardu Induk

Gelombang surja petir dapat masuk ke dalam gardu induk oleh karena beberapa cara. Secara umum, maka dapat dibagi berdasarkan posisi sambaran petir menjadi dua, yaitu:

1. Sambaran petir langsung (*direct lightning strike*)
2. Sambaran petir tidak langsung (*indirect lightning strike*)

Pada umumnya, sambaran petir langsung akan menyebabkan besarnya tegangan transien yang lebih tinggi daripada tegangan induksi (*induced voltage*) yang disebabkan oleh sambaran petir tidak langsung. Akan tetapi, kejadian sambaran petir langsung pada gardu induk memiliki frekuensi kejadian yang lebih sedikit daripada sambaran petir tidak langsung [18].

Sambaran langsung yang mengenai rel (busbar) maupun peralatan di dalam gardu induk merupakan gangguan paling besar dibandingkan gelombang berjalan lain yang mencapai gardu induk. Sambaran ini menimbulkan tegangan lebih yang sangat tinggi sehingga umumnya melampaui kemampuan ketahanan isolasi yang tersedia. Upaya yang umum dilakukan untuk mencegah kondisi tersebut adalah dengan meningkatkan sistem perlindungan petir, antara lain melalui pemasangan kawat tanah (ground wire) di atas gardu induk serta pada saluran transmisi di sekitarnya.

Sambaran induksi dapat terjadi ketika awan bermuatan petir berada di atas peralatan yang berisolasi. Awan tersebut menginduksikan muatan listrik dalam jumlah besar dengan polaritas berlawanan, sehingga terbentuk muatan terikat pada peralatan. Ketika terjadi pelepasan muatan dari awan petir, muatan terikat tersebut kembali menjadi muatan bebas dan merambat sebagai gelombang berjalan yang besarnya bergantung pada karakteristik pelepasan. Besarnya tegangan induksi umumnya berada pada kisaran 100–200 kV, dengan waktu muka gelombang (wave front) lebih dari 10 μ s dan waktu ekor gelombang (wave tail) sekitar 50–100 μ s. Oleh karena itu, sambaran induksi relatif tidak terlalu berbahaya bagi peralatan tegangan tinggi, namun tetap berpotensi menimbulkan gangguan pada sistem distribusi.

Sambaran dekat merupakan gelombang berjalan yang mencapai gardu induk akibat sambaran petir pada saluran transmisi yang berjarak hanya beberapa kilometer dari gardu induk. Besarnya gelombang dibatasi oleh tegangan lompatan isolator saluran selama perambatannya melalui beberapa menara. Namun, peredaman terhadap kecuraman muka gelombang relatif kecil apabila jarak rambatannya pendek, sehingga gelombang tetap memiliki kecuraman yang tinggi. Dalam kondisi tertentu, nilai puncak gelombang dapat mencapai sekitar 120–130% dari Basic Insulation Level (BIL) peralatan gardu induk, dengan kecuraman muka gelombang hingga 500 kV/ μ s. Meskipun demikian, karena rel gardu induk tegangan tinggi memiliki kapasitansi statis yang besar, mencapai beberapa ribu hingga puluhan ribu pikofarad, kecuraman muka gelombang umumnya mengalami penurunan yang cukup signifikan.

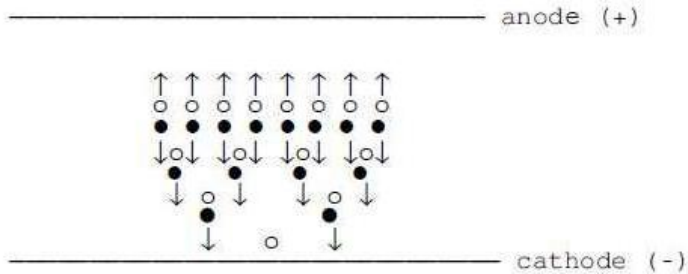
Apabila sistem perisai (shielding) pada gardu induk dan saluran transmisinya berfungsi dengan baik, maka gelombang tegangan yang mencapai gardu induk umumnya berasal dari sambaran petir jauh. Gelombang berjalan tersebut dapat disebabkan oleh sambaran langsung pada saluran, sambaran induksi, sambaran lompatan balik (back flashover) dari menara, maupun sambaran pada bagian tengah gawang (span). Dalam setiap kondisi tersebut, gelombang merambat sepanjang saluran dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya (sekitar 300 m/ μ s). Nilai puncak surja awal dibatasi oleh tegangan lompatan isolator saluran. Selama proses perambatan, nilai puncak dan kecuraman gelombang mengalami penurunan yang cukup besar akibat peredaman dan distorsi yang disebabkan oleh korona serta efek kulit (skin effect) pada penghantar. Perubahan karakteristik gelombang berlangsung secara kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain polaritas gelombang, nilai puncak, ukuran penghantar, keberadaan kawat tanah, serta bentuk gelombang. [1].

Tegangan induksi yang disebabkan oleh sambaran petir tidak langsung dipengaruhi oleh arus petir, resistifitas tanah, tinggi *line* transmisi, serta jarak di antara *line* transmisi dan lokasi sambaran petir. Gelombang berjalan yang jauh juga dapat disebabkan oleh *backflashover* dari tiang transmisi. Sambaran ini terjadi pada kawat tanah (*Overhead Ground Wire*), di mana hal ini terjadi akibat sambaran petir mengenai kawat tanah, kemudian merambat melalui impedansi surja tower ke tanah, namun karena resistansi tanah cukup tinggi, arus pantul akan kembali lagi merambat ke puncak tower. Apabila tegangan pantul tersebut nilainya melebihi nilai tegangan tembus isolator tiang transmisi, maka arus petir akan terinjeksi ke kawat fasa, yang kemudian dapat merambat masuk ke dalam gardu induk. [19]

2.2.12 Mekanisme Townsend

Salah satu mekanisme yang dipertimbangkan dalam proses kerusakan isolasi adalah mekanisme kerusakan Townsend. Mekanisme ini didasarkan pada terbentuknya longsor sekunder secara berurutan yang akhirnya menimbulkan kerusakan. Apabila terdapat elektron bebas di dalam gas, misalnya akibat aktivitas radioaktif atau radiasi kosmik, dan gas tersebut berada dalam medan listrik, maka pada kuat medan yang cukup tinggi elektron bebas dapat mengionisasi molekul gas melalui tumbukan sederhana sehingga menghasilkan dua elektron bebas dan satu ion positif. Elektron-elektron yang terbentuk selanjutnya dapat menyebabkan ionisasi lanjutan melalui tumbukan berikutnya, sehingga jumlah elektron bebas dan ion positif meningkat secara bertahap. Proses ini bersifat kumulatif, di mana jumlah

elektron bebas terus bertambah seiring pergerakannya di bawah pengaruh medan listrik. Kumpulan elektron dan ion positif yang terbentuk melalui proses tersebut dikenal sebagai longsor elektron (electron avalanche). Dalam jarak beberapa milimeter, jumlah elektron dalam longsor ini dapat berkembang hingga mencapai jutaan elektron. Ini ditunjukkan pada Gambar 2.28.



Gambar 2.28 Karakteristik Pergerakan Elektron ^[25]

2.2.13 Mekanisme Streamer

Ciri khas kegagalan streamer terlihat dari terjadinya fotoionisasi masif pada molekul gas di depan ujung streamer serta peningkatan medan listrik lokal akibat muatan ruang di ujung streamer. Muatan ruang ini menyebabkan distorsi medan listrik dalam sela. Ion-ion positif bergerak relatif lambat dibandingkan elektron yang bergerak cepat, sehingga terbentuk awan elektron yang mengelilingi muatan ruang ion positif. Medan E_r yang dihasilkan oleh muatan ruang ini pada jari jari R adalah:

$$E_r = \frac{Q \cdot 10^2}{4 \pi \epsilon_0 R^2} = \frac{\frac{4}{3} \pi R^3 Ne}{4 \pi \epsilon_0 R^2} = \frac{10^2 R Ne}{3 \epsilon_0} \quad V/cm$$

$$N = \frac{\alpha e^{E_r x}}{R^2 dx} = \frac{\alpha e^{E_r x}}{R^2}$$

$$\text{dan } E_r = \frac{10^2 \alpha e^{E_r x}}{3 \epsilon_0 R}$$

R adalah jari jari banjir setelah menempuh jarak x, dengan rumus diffusi $R = (2Dt)$.

$$E_r = \frac{10^2 \alpha e^{\gamma x} \cdot e}{3 q R \sqrt{2D \cdot x/V}}$$

Dimana $t = x/V$

Keterangan:

N: kerapatan ion per cm^2

e: muatan elektron (C)

γ_0 : permitivitas ruang bebas

R: jari jari (cm)

V: kecepatan banjir

D: koefisien diffuse

2.3 Alat Ukur Tahanan Pentanahan

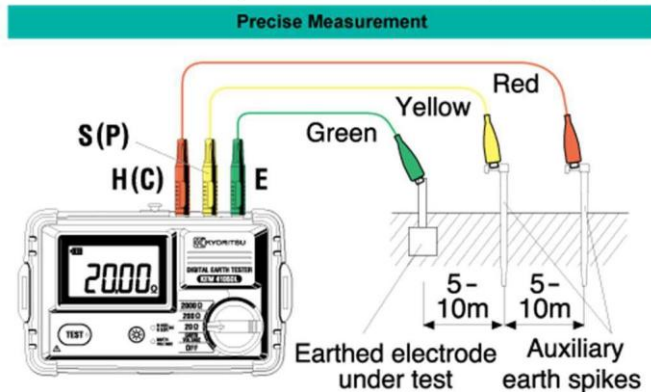
Pentanahan serandang adalah perlengkapan pembumian sistem transmisi yang berfungsi untuk meneruskan arus listrik dari tiang serandang ke tanah. Pentanahan tiang terdiri dari kawat tembaga atau kawat baja yang diklem pada pipa pentanahan yang ditanam di dekat pondasi tiang, atau dengan menanam plat aluminium/tembaga disekitar pondasi tiang yang berfungsi untuk mengalirkan arus dari kawat tanah akibat sambaran petir.

Alat ukur yang digunakan dalam mengukur tahanan pentanahan adalah *earth tester*. Terdapat beberapa merk yang beredar di pasaran, pada penelitian ini penulis menggunakan merk Kyoritsu dengan tipe 4105 DL.



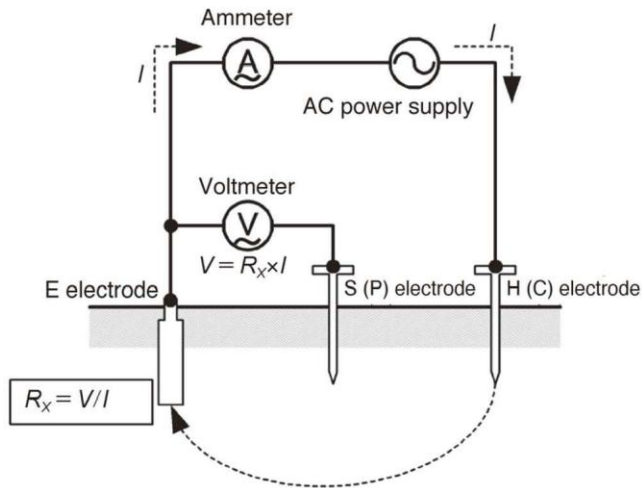
Gambar 2.29 Earth Tester Kyoritsu 4105 DL [20]

Metode yang digunakan dalam pengukuran tahanan pentanahan menggunakan alat ini adalah metode 3 pole seperti ditunjukkan gambar 2.30 berikut. Kabel warna hijau dipasang pada objek yang akan dilihat hasil tahananannya, yaitu dapat berupa baut atau kawat atau kabel yang diketanahkan. Sementara itu kabel warna kuning dan merah dipasang pada pasak tambahan dengan jarak 5 – 10 meter dari pole lainnya.



Gambar 2.30 Metode Pengukuran menggunakan 3-Pole Method ^[20]

Prinsip kerja *earth tester* ditunjukkan pada gambar 2.31 berikut. Tegangan catu daya AC diterapkan antara elektroda H (C) dan E, dan arus AC I yang mengalir sebagai hasilnya diukur dengan ammeter. Selain itu, tegangan V yang terjadi antara elektroda S (P) dan E ketika arus I mengalir diukur menggunakan voltmeter AC. Kemudian resistansi tanah R_X dari elektroda E dihitung dari arus yang diukur I dan tegangan V . Tidak mungkin untuk secara akurat mengukur tegangan antara elektroda H (C) dan E, atau tegangan antara H (C) dan S (P) elektroda.



Gambar 2.31 Prinsip Kerja Earth Tester menggunakan 3-Pole Method ^[21]

2.4 Standar dalam Koordinasi Isolasi Peralatan

2.2.1 Definisi dan Istilah Koordinasi Isolasi Menurut IEC 6071-1 [22]:

1. Koordinasi Isolasi

Koordinasi isolasi ialah pemilihan kekuatan dielektrik peralatan berkaitan dengan tegangan yang dapat muncul pada sistem tempat peralatan tersebut digunakan, dengan mempertimbangkan keadaan sistem serta karakteristik dari alat pelindung yang tersedia. Dengan "kekuatan dielektrik" dari peralatan, yang dimaksud di sini adalah tingkat isolasi yang terukur atau standar.

2. Isolasi Eksternal

Isolasi eksternal yang dimaksud ialah jarak di udara atmosfer dan permukaan yang bersentuhan dengan udara atmosfer dari isolasi padat pada peralatan yang terkena tegangan dielektrik serta pengaruh dari kondisi atmosfer dan eksternal lainnya, seperti polusi, kelembaban, hewan pengerat, dll

3. Isolasi Internal

Bagian internal dari isolasi berupa padatan, cairan, atau gas peralatan yang terlindungi dari pengaruh kondisi atmosfer dan eksternal lainnya.

4. Isolasi yang Dapat Memulihkan Diri Sendiri (*Self-Restoring Insulation*)

Isolasi yang dapat mengembalikan sifat isolatifnya setelah terjadinya loncatan listrik (*disruptive discharge*).

5. Isolasi yang Tidak Dapat Memulihkan Diri Sendiri (*Non-Self-Restoring Insulation*)

Isolasi yang kehilangan sifat isolatifnya, atau tidak memulihkannya secara penuh, setelah terjadinya loncatan listrik. Definisi poin 4 dan 5 hanya berlaku saat loncatan terjadi karena penerapan tegangan uji selama pengujian dielektrik. Namun, loncatan yang terjadi dalam layanan sebenarnya dapat menyebabkan isolasi *self-restoring* kehilangan sebagian atau seluruh sifat isolatif aslinya.

6. Terminal Konfigurasi Isolasi

Setiap elektroda antara dua terminal yang diberi tegangan sehingga menimbulkan tekanan pada isolasi. Jenis-jenis terminal meliputi:

- a) Terminal fasa, antara terminal ini dan terminal netral diterapkan tegangan fasa-ke-netral sistem
- b) Terminal netral, mewakili atau terhubung ke titik netral sistem (misalnya terminal netral pada transformator)
- c) Terminal tanah (*earth terminal*), selalu terhubung dengan tanah secara permanen dalam layanan (misalnya pada tangki transformator, struktur pemutus, menara, bidang tanah, dll.)

7. Konfigurasi Isolasi

Konfigurasi geometris lengkap dari isolasi saat beroperasi, terdiri dari isolasi dan semua terminal. Termasuk semua elemen (baik isolatif maupun konduktif) yang memengaruhi sifat dielektriknya. Konfigurasi berikut diidentifikasi:

- a) Tiga fasa (*three-phase*): Memiliki tiga terminal fasa, satu terminal netral, dan satu terminal tanah.
- b) Fasa-ke-tanah (*phase-to-earth*): Konfigurasi isolasi tiga fasa di mana dua terminal fasa diabaikan dan, kecuali dalam kasus khusus, terminal netral dibumikan.

8. Tegangan nominal suatu sistem
Nilai perkiraan tegangan yang sesuai yang digunakan untuk menunjuk atau mengidentifikasi suatu sistem.
9. Tegangan tertinggi suatu sistem
Nilai tegangan operasi tertinggi yang terjadi dalam kondisi operasi normal pada setiap waktu dan titik mana pun dalam sistem.
10. Tegangan tertinggi untuk peralatan (Um)
Nilai r.m.s. tertinggi dari tegangan antarfasa yang dirancang untuk peralatan tersebut, dengan mempertimbangkan insulasinya serta karakteristik lainnya yang berkaitan dengan tegangan ini dalam Standar peralatan yang relevan.
11. Sistem netral terisolasi
Sistem di mana titik netral tidak sengaja dihubungkan ke bumi, kecuali untuk sambungan impedansi tinggi untuk keperluan proteksi atau pengukuran
12. Sistem netral yang dibumikan secara kokoh
Sistem yang titik netralnya dibumikan secara langsung.
13. Sistem pembumihan impedansi (netral)
Sistem yang titik netralnya dibumikan melalui impedansi untuk membatasi arus gangguan tanah.
14. Sistem pentanahan resonansi (netral)
Sistem dengan satu atau lebih titik netral terhubung ke bumi melalui reaktansi yang kira-kira mengkompensasi komponen kapasitif arus gangguan satu fasa ke bumi.
15. Faktor gangguan tanah
Pada lokasi tertentu dari sistem tiga fasa, dan untuk konfigurasi sistem tertentu, rasio tegangan frekuensi daya r.m.s. fasa-ke-bumi tertinggi pada fase sehat selama gangguan ke bumi yang memengaruhi satu atau lebih fase pada titik mana pun pada sistem terhadap tegangan frekuensi daya r.m.s. fasa-ke-bumi yang akan diperoleh di lokasi tertentu tanpa adanya gangguan tersebut.
16. Faktor gangguan tanah
Pada lokasi tertentu dari sistem tiga fasa, dan untuk konfigurasi sistem tertentu, rasio tegangan frekuensi daya r.m.s. fasa-ke-bumi tertinggi pada fase sehat selama gangguan ke bumi yang memengaruhi satu atau lebih fase pada titik mana pun pada sistem terhadap tegangan frekuensi daya r.m.s. fasa-ke-bumi

yang akan diperoleh di lokasi tertentu tanpa adanya gangguan tersebut.

Catatan: Kecuali dinyatakan lain dengan jelas, seperti untuk arrester surja, nilai tegangan lebih yang dinyatakan dalam P.U. harus dirujuk sebagai $U_m \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$. Untuk konfigurasi insulasi apa pun, tegangan lebih adalah tegangan apa pun yang melintasi terminalnya lebih tinggi daripada puncak tegangan frekuensi daya yang ada di antara keduanya ketika semua terminal fasa peralatan dialiri tegangan tertinggi untuk peralatan tersebut.

17. Berdasarkan bentuk dan durasinya, tegangan dan tegangan lebih dibagi ke dalam kelas berikut (lihat juga table 1):

a) tegangan kontinu (frekuensi daya): Tegangan frekuensi daya, yang dianggap memiliki nilai r.m.s. konstan, diterapkan secara kontinu pada setiap pasangan terminal dengan konfigurasi isolasi.

b) tegangan lebih sementara: Tegangan lebih frekuensi daya dengan durasi yang relatif lama.

Catatan: Tegangan lebih dapat tidak teredam atau teredam lemah. Dalam beberapa kasus, frekuensinya dapat beberapa kali lebih kecil atau lebih tinggi daripada frekuensi daya.

c) tegangan lebih transien: Tegangan lebih berdurasi pendek beberapa milidetik atau kurang, berosilasi atau tidak berosilasi, biasanya teredam tinggi.

Catatan: Tegangan lebih transien dapat segera diikuti oleh tegangan lebih sementara. Dalam kasus tersebut, kedua tegangan lebih tersebut dianggap sebagai peristiwa terpisah.

18. Tegangan lebih transien dibagi menjadi:

a) tegangan lebih muka lambat: Tegangan lebih transien, biasanya searah, dengan waktu hingga puncak 20 ps c Tp l 5 000 ps, dan durasi ekor T2 l 20 ms.

b) tegangan lebih muka cepat: Tegangan lebih transien, biasanya searah, dengan waktu hingga puncak 0,1 ps C Tl l 20 ps, dan durasi ekor T2 c 300 ps.

c) tegangan lebih muka sangat cepat: Tegangan lebih transien, biasanya searah dengan waktu hingga puncak T, l 0,1 ps, durasi total C 3 ms, dan dengan osilasi tumpang tindih pada frekuensi $30 \text{ kHz} < f < 100 \text{ MHz}$.