

**PEMODELAN PERLINDUNGAN SAMBARAN PETIR
PADA TRANSFORMATOR DAYA DI GARDU INDUK
TEGANGAN TINGGI**

TESIS

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Magister Teknik
Dalam Bidang Teknik Elektro

Oleh:

FAUZI BRAMANTYO
NPM : 1920080009



UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2022**

PENGESAHAN TESIS

Nama : **Fauzi Bramantyo**
Nomor Induk Mahasiswa : **1920080009**
Program Studi Konsentrasi : **Manajemen Listrik**
Judul Tesis : **Pemodelan Perlindungan Sambaran Petir Pada Transformator Daya di Gardu Induk Tegangan Tinggi.**

Pengesahan Tesis
Medan, 8 Februari 2023

Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II


Assoc. Prof. Dr. Ir. Surya Hardi, M.Sc


Rohana, ST., MT

Diketahui

Direktur


Prof. Dr. Triono Eddy, SH.,M.Hum

Ketua Program Studi


Assoc. Prof. Dr. Ir. Suwarno., MT

Unggul | Cerdas | Terpercaya

PENGESAHAN

PEMODELAN PERLINDUNGAN SAMBARAN PETIR PADA TRANSFORMATOR DAYA DI GARDU INDUK TEGANGAN TINGGI

FAUZI BRAMANTYO

1920080009

Program Studi : Magister Teknik Elektro

Tesis ini telah dipertahankan di Hadapan Komisi Penguji yang dibentuk oleh Program Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Dinyatakan Lulus dalam Ujian Tesis dan Berhak Menyandang Gelar Magister Teknik Elektro (M.T)

Pada Hari Rabu, Tanggal 8 Februari 2023

Komisi Penguji

1. **Assoc. Prof. Dr. Ir. Suwarno., MT**

Ketua

1


2. **Assoc. Prof. Dr. Muhammad Fitra Zambak, M.Sc**

Sekretaris

2


3. **Dr. Josef Hadiprama**

Anggota

3


Unggul | Cerdas | Terpercaya

PERNYATAAN

PEMODELAN PERLINDUNGAN SAMBARAN PETIR PADA TRANSFORMATOR DAYA DI GARDU INDUK TEGANGAN TINGGI

Dengan ini peneliti menyatakan bahwa :

1. Tesis ini disusun sebagai syarat untuk memperoleh Gelar Magister Pada Program Magister Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara merupakan hasil karya peneliti sendiri.
2. Tesis ini adalah asli belum pernah diajukan untuk mendapatkan Gelar Akademik (Sarjana, Magister, dan/atau Doktor), baik di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara maupun di perguruan lain.
3. Tesis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Komite Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
4. Dalam Karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar Pustaka.
5. Pernyataan ini saya perbuat dengan sesungguhnya. Apabila di kemudian hari ternyata ditemukan seluruh atau Sebagian tesis ini bukan hasil karya peneliti sendiri atau adanya plagiat dalam bagian-bagian tertentu, peneliti bersedia menerima sanksi percabutan gelar akademik yang peneliti sandang dan sanksi-sanksi lainnya sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.

Medan, 8 Februari 2023

Peneliti



FAUZI BRAMANTYO

NPM : 1920080009

Unggul | Cerdas | Terpercaya

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT atas segala pemberian dan titipan-NYA di dunia ini. Shalawat dan salam untuk Nabi Muhammad SAW yang telah membawa kita dari alam kebodohan menuju alam yang penuh dengan ilmu pengetahuan.

Alhamdulillah berkat izin-NYA penulis dapat menyelesaikan penelitian tesis dengan judul **“Pemodelan perlindungan sambaran petir pada transformator daya di gardu induk tegangan tinggi”** dan penelitian tesis ini merupakan salah satu syarat dalam meraih gelar magister pada program studi Magister Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Selesainya penulisan proposal thesis ini tidak terlepas dari bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, oleh karena itu penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada

1. Bapak Assoc. Prof. Dr. Ir. Surya Hardi, M.Sc selaku Dosen Pembimbing I dalam penyusunan tesis ini.
2. Ibu Rohana, S.T., M.T. selaku Sekretaris Program Studi Magister Teknik Elektro sekaligus Dosen Pembimbing II dalam penyusunan tesis ini.
3. Bapak Assoc. Prof. Dr. Ir. Suwarno M.T, selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Bapak Prof. Dr. H. Triono Eddy, SH., M.Hum selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak dan Ibu Dosen di Program Pascasarjana Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

6. Istri dan keluarga tercinta yang selalu mensupport dalam penyusunan tesis ini
7. Karyawan biro Program Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Teman – teman sejawat dan seperjuangan di Program Pascasarjana Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Penulis telah berusaha untuk menyampaikan yang terbaik dalam tesis ini, namun penulis menyadari masih banyak terdapat kekurangan didalamnya. Oleh karena itu penulis senantiasa mengharapkan kritik dan saran membangun dari pembaca untuk kesempurnaan tesis ini. Akhir kata, semoga tesis ini bermanfaat bagi kita semua. Amin.

Medan, 9 September 2022

Penulis

Fauzi Bramantyo

ABSTRAK

Gangguan yang terjadi pada saluran transmisi salah satunya disebabkan oleh sambaran petir. Ketika terjadi sambaran petir pada saluran transmisi maka akan menimbulkan kenaikan tegangan serta menimbulkan tegangan lebih, yang kemudian akan merambat ke ujung jaringan dan akhirnya akan mencapai gardu induk, dimana pada Gardu Induk terdapat peralatan yang sensitif terhadap tegangan lebih yaitu transformator. Agar tegangan lebih ini tidak merusak transformator, maka sebelum terminal transformator dipasang arrester untuk memotong tegangan lebih yang terjadi, agar tegangan yang diteruskan tidak merusak isolasi transformator. Pada penelitian ini performa arrester akan dibandingkan menggunakan dua jenis pemodelan yaitu *IEEE*, dan Karbalaye. Arrester akan dimodelkan dan disimulasikan menggunakan *software Analysis Transient Program (ATP)*. Pemodelan dan simulasi sistem dilakukan dengan kondisi sambaran ke kawat tanah menara transmisi sebelum dan sesudah pemasangan arrester. Arrester dipasang dilokasi sebelum menara terakhir dan setelah menara terakhir, dekat dengan transformator daya. Hasil yang diperoleh yaitu, tegangan Maksimum pada sistem terjadi ketika sistem diinjeksikan arus petir IEC 100 kA dengan kondisi sistem belum terpasang Arrester, tegangan puncak yang terjadi pada masing-masing fasa berturut-turut, Fasa A, Fasa B dan Fasa C sebesar 3.649 kV, 2.836 KV, dan 3.473 kV, dan Tegangan Minimum yang terjadi pada sistem saat arus petir IEC 20 kA diinjeksikan kedalam sistem yang sudah terpasang Arrester, dan Arrester dipasang setelah menara terakhir dekat dengan transformator daya, serta Arrester dimodelkan dengan pemodelan IEEE, nilai tegangan puncak yang timbul pada Fasa A, Fasa B dan Fasa C berturut – turut sebesar 191 kV, 175 kV dan 175 kV. Setelah dilakukan pemodelan dan simulasi terbukti bahwa ketika sistem sudah dipasang arrester terjadi penurunan nilai puncak tegangan pada tiap fasa, dan lokasi pemasangan arrester yang paling sesuai untuk proteksi sistem tegangan tinggi dari tegangan lebih adalah setelah menara terakhir dekat dengan transformator daya.

**Kata kunci : Transformator, Pemodelan Arrester, Tegangan Lebih, ATP
(Analysis Transien Program)**

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	ii
ABSTRAK.....	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Landasan Teori.....	6
2.1.1 Proses Terjadinya Petir	6
2.1.2 Tegangan Impuls.....	7
2.1.3 Traveling Wave (Gelombang Berjalan).....	11
2.1.4 Komponen – Komponen Yang Ada Pada Saluran Transmisi	12
2.1.5 Lighting Arrester.....	17
2.1.6 Kemampuan Isolasi Dasar (Basic Isulation Level)	34
2.1.7 (<i>Margin Protection</i>) Faktor Perlindungan	35
2.1.8 Aplikasi ATP Draw 5.6	38
2.2 Kajian Penelitian yang Relevan	40
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	41
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	41
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	43
3.3 Populasi dan Sampel	43
3.4 Teknik Pengumpulan Data	44
3.5 Definisi Operasional Variabel.....	44
3.6 Pemodelan Dalam Analisis Data.....	49

3.6.1	Pemodelan Sumber Sambaran Petir	50
3.6.2	Pemodelan Sumber Tiga Fasa.....	50
3.6.3	Pemodelan Saluran Transmisi.....	51
3.6.4	Pemodelan Mendara dan Lengan Menara	51
3.6.5	Pemodelan Isolator.....	51
3.6.6	Pemodelan Transformator Daya	52
3.6.7	Pemodelan Arrester	52
BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		53
4.1	Gelombang Sistem Dalam Keadaan Normal	53
4.2	Sambaran Petir ke Kawat Tanah Menara Transmisi Saat Belum adanya Arrester	53
4.3	Sambaran ke Kawat Tanah Menara Transmisi dalam Kondisi Arrester dipasang Sebelum Menara Terakhir (IEEE).....	55
4.4	Sambaran Pada Kawat Tanah Menara Transmisi Ketika Arrester dipasang Setelah Menara Transmisi dan Dekat Dengan Transformator Daya Pemodelan IEEE.....	57
4.5	Sambaran ke Kawat Tanah Menara Transmisi ketika Arrester dipasang Sebelum Menara Terakhir (Pemodelan Karbalaye).....	59
4.6	Sambaran Pada Kawat Tanah Menara Transmisi Ketika Arrester dipasang Setelah Menara Transmisi dan Dekat Dengan Transformator Daya.....	61
4.7	Perbandingan Nilai Puncak Tegangan Pada Berbagai Cara Pemasangan Arrester.....	62
4.8	Margin Proteksi.....	63
BAB 5 PENUTUP		65
5.1	Kesimpulan	65
5.2	Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA		67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Proses Pelepasan Muatan dari Awan Menuju Bumi	7
Gambar 2. 2 Jenis – Jenis Tegangan Impuls.....	8
Gambar 2. 3 Gelombang Impuls Petir	9
Gambar 2. 4 Tegangan surja (lightning surge) akibat sambaran petir	10
Gambar 2. 5 Model Menara Transmisi.....	13
Gambar 2. 6 Skematik menara transmisi [4]	13
Gambar 2. 7 Rangkaian ekivalent menara transmisi.....	14
Gambar 2. 8 Pengaturan Sudut Kawat Tanah.....	16
Gambar 2. 9 Arrester Pada Gardu Induk Galang	17
Gambar 2. 10 Kontruksi Arrester.....	18
Gambar 2. 11 Varistor	19
Gambar 2. 12 Housing Arrester	20
Gambar 2. 13 Sealing dan Pressure Relief Sistem.....	21
Gambar 2. 14 Arrester Tegangan Tinggi Dengan Grading Ring	22
Gambar 2. 15 Isolator Arrester	22
Gambar 2. 16 Struktur Penyangga Arrester.....	23
Gambar 2. 17 Arrester Jenis Ekspulsi (Expulsion Type)	24
Gambar 2. 18 Arrester Jenis Katup (Valve Type).....	26
Gambar 2. 19 Arester Jenis Zinc Oxide Dengan Elemen Aktif.....	26
Gambar 2. 20 Rangkaian Ekivalen Model IEEE	29
Gambar 2. 21 Rangkaian Ekivalen Michaela	31
Gambar 2. 22 Rangkaian Ekivalen Model Karbalaye	32
Gambar 2. 23 Karakteristik BIL.....	35

Gambar 2. 24 Tampilan Awal Model Rangkaian Baru Pada ATP Draw .	39
Gambar 2. 25 Komponen – Komponen Pada ATp Draw.....	39
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	42
Gambar 3.2 Letak Pemasangan Arrester Sebelum Menara Terakhir	43
Gambar 3.3 Pemasangan Arrester Setelah Menara	44
Gambar 3.4 Menara Transmisi.....	45
Gambar 3.5 Sumber Petir dalam ATP	50
Gambar 3.6 Sumber Tiga Fasa dalam ATP	50
Gambar 3.7 Pemodelan Saluran Transmisi.....	51
Gambar 3.8 Pemodelan Menara dan Lengan Menara	51
Gambar 3.9 Rangkaian Isolator	51
Gambar 3.10 Transformator Daya	52
Gambar 3.11 Arrester dengan Model IEEE.....	52
Gambar 3.12 Arrester dengan Model Karbalaye	52
Gambar 4. 1 Gelombang Sistem Dalam Keadaan Normal	53
Gambar 4. 2 Rangkaian Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat tanah Menara Transmisi Saat belum Adanya Arrester	54
Gambar 4. 3 Gelombang Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat tanah Menara Transmisi Saat belum Adanya Arrester	55
Gambar 4. 4 Rangkaian Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat Tanah Menara Transmisi Saat Arrester dipasang sebelum Menara Terakhir (IEEE)	56

Gambar 4. 5 Gelombang Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat Tanah Menara Transmisi Saat Arrester dipasang sebelum Menara Terakhir (IEEE)	56
Gambar 4. 6 Rangkaian Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat Tanah Menara Transmisi Saat Arrester Dipasang Diposisi Setelah Menara Terakhir Dan Dekat Dengan Transformator Daya.....	58
Gambar 4. 7 Gelombang Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat Tanah Menara Transmisi Saat Arrester Dipasang Diposisi Setelah Menara Terakhir Dan Dekat Dengan Transformator Daya.....	58
Gambar 4. 8 Rangkaian Simulasi Sambaran Petir ke Kawat Tanah Menara Transmisi Saat arrester terpasang sebelum menara terakhir	59
Gambar 4. 9 Gelombang Simulasi Sambaran Petir ke Kawat Tanah Menara Transmisi Saat arrester terpasang sebelum menara terakhir	60
Gambar 4. 10 Rangkaian Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat Tanah Menara Transmisi saat Arrester dipasang Setelah Menara Terakhir dan dekat dengan Transformator daya.....	61
Gambar 4. 11 Gelombang Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat Tanah Menara Transmisi saat Arrester dipasang Setelah Menara Terakhir dan dekat dengan Transformator daya.....	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Standar Gelombang Impuls Beberapa Negara.....	12
Tabel 2. 2 Karakteristik kerja arrester	36
Tabel 2. 3 Tegangan Kerja Arrester (U_A).....	37
Tabel 3. 1 Data Penghantar dan Kawat Tanah.....	46
Tabel 3. 2 Data Isolator	46
Tabel 3. 3 Data Arrester	46
Tabel 3. 4 Transformator Daya	49
Tabel 4.1 Data perbandingan nilai puncak tegangan Arrester, dengan Pemodelan IEEE dan Karbalaye dan dalam beberapa kondisi .	63

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Petir merupakan salah satu proses pelepasan energi listrik dari awan bermuatan ke tanah atau antara awan bermuatan yang berbeda potensialnya. Sambaran petir adalah merupakan salah satu penyebab terjadinya gangguan yang sering terjadi dalam sistem transmisi tenaga listrik dan dapat menyebabkan kenaikan tegangan secara tiba – tiba dengan waktu cepat kemudian akan turun dalam waktu yang relatif lebih lama dalam orde mikro detik.

Terdapat dua jenis sambaran petir pada sistem transmisi tenaga listrik, yang pertama adalah sambaran langsung yaitu sambaran yang langsung mengenai kawat fasa dari sistem transmisi tenaga listrik dan yang kedua adalah sambaran tidak langsung atau sambaran induksi yaitu sistem tidak terkena langsung sambaran petir tetapi sistem terkena pengaruh dari sambaran petir. Ke dua jenis sambaran ini mempunyai efek gelombang berjalan pada saluran yang terhubung hingga mencapai suatu terminal transformator daya pada gardu induk. Oleh karena itu dibutuhkan suatu sistem perlindungan untuk mengamankan sistem jaringan transmisi agar sistem tidak mengalami kerusakan apabila terjadi gangguan sambaran petir terutama pada transformator daya.

Penggunaan surja arrester umumnya sebagai salah satu sistem perlindungan yang sering digunakan untuk melindungi dari bahaya gelombang berjalan akibat sambaran petir pada sistem transmisi. Metoda untuk mengurangi bahaya sambaran langsung petir pada saluran transmisi yaitu dengan pemasangan kawat tanah (ground wire) pada menara transmisi, dapat berupa kawat tanah tunggal atau ganda dan tergantung dari disain menaranya.

Surja Arrester yang dipasang pada menara saluran transmisi beroperasi dengan cara berbeda dari aplikasi lainnya. Ketika petir mengenai menara atau kawat tanah saluran transmisi, lonjakan tegangan lebih terjadi pada konduktor fasa akibat induksi dan arus surja dialirkan ke tanah melalui sistem pentanahan kaki menara. Jika tidak ada Arrester dan kawat tanah yang bekerja maka sambaran langsung ke kawat fasa dapat terjadi, gelombang petir akan merambat sepanjang kawat fasa hingga mencapai terminal transformator daya pada gardu induk. Sebaliknya bila sambaran petir mengenai kawat tanah, gelombang petir merambat sepanjang kawat tanah dan turun ke tanah menuju menara yang terdekat. Jika tegangan di isolator meningkat dan melebihi tingkat ketahanan isolator saluran maka terjadi flashover isolator, yang menyebabkan gangguan hubung singkat saluran ke tanah.

Penelitian sebelumnya telah dilakukan oleh Violeta[1], yang mana pada penelitian ini dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak (*software*) *ATP-EMTP* dan *PSCAD/ EMTDC* pada jaringan transmisi 150 kV. Penelitian yang dilakukan membandingkan kemampuan ke dua software tersebut untuk memodelkan tegangan lebih petir. Parameter yang diamati adalah tegangan pada puncak menara, tegangan pada lengan menara dan tegangan pada tahanan kaki menara. Pengaruh sambaran petir pada penampilan Arrester dari saluran udara transmisi 150 kV disebabkan oleh karakteristik yang berbeda telah dilaksanakan oleh Fri Murdiya dkk, 2019)[2]. Arester dimodelkan dalam dua model yaitu Picenti dan Giat Antoni dengan menggunakan ATP draw. Pemodelan dan simulasi dari sebuah arrester surja kilat Metal Oksida didiskusikan oleh Aziz Ulah Khan (2020)[3] untuk proteksi saluran transmisi 132 kV. Arrester yang digunakan dalam simulasi adalah model Pinceti.

Penelitian ini sambaran petir langsung ke kawat tanah menara transmisi akan disimulasikan, dengan menginjeksikan nilai arus petir yang berbeda ke sistem transmisi, kemudian proses tersebut akan menimbulkan tegangan lebih (*transient*) dan akan merambat ke gardu induk, tegangan yang timbul pada terminal transformator daya sebelum dan sesudah pemasangan arrester akan diamati. Model Arrester yang digunakan adalah model IEEE dan Model Arrester Karbalaye yang dipasang pada dua lokasi yang berbeda yaitu pada sebelum menara terakhir transmisi dan setelah menara terakhir transmisi dan sebelum transformator daya.

1.2 Identifikasi Masalah

Tegangan lebih (*transient*) petir yang terjadi pada sistem transmisi dapat melalui dua cara yaitu: 1. sambaran langsung mengenai saluran transmisi dan 2. sambaran tidak langsung (pengaruh induksi). Gelombang sambaran dapat membahayakan peralatan seperti isolator pada saluran transmisi & transformator daya pada gardu induk. Apabila tegangan lebih yang terjadi melebihi batas kekuatan isolasi dari peralatan tersebut. Efek tegangan lebih petir pada sistem transmisi dapat dikurangi dengan memasang arrester surja kilat sebagai pengamanan.

1.3 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah pada penelitian kali ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini menggunakan arrester jenis arrester Metal Okside.
2. Pemodelan arrester yang digunakan pada penelitian ini adalah pemodelan arrester IEEE dan pemodelan arrester Karbalaye.
3. Standard arus petir yang digunakan adalah standar IEC.
4. Software ATP yang digunakan adalah ATP EMTP V 5.6.

1.4 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana memodelkan dan mensimulasikan sistem saluran transmisi (menara, arrester, transformator) saluran udara tegangan tinggi kedalam ATP.
2. Bagaimana mengukur nilai tegangan peralihan (*transient*) sebelum dan sesudah pemasangan aresster pada terminal transformator daya.
3. Bagaimana mendapatkan lokasi dan letak pemasangan aresster yang paling sesuai untuk pengamanan transformator daya akibat gangguan sambaran petir.

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memodelkan sistem saluran transmisi untuk menentukan nilai tegangan lebih pada tiap fasa sebelum dan sesudah pemasangan aresster, yang diakibatkan sambaran Petir ke kawat tanah Menara Transmisi.
2. Membandingkan nilai tegangan peralihan (*transient*) dari arrester yang digunakan ketika arus petir diinjeksikan dari 20 kA sampai 100 kA dengan kenaikan 20 kA.
3. Menganalisis model arrester dan lokasi paling sesuai untuk perlindungan transformator daya dari gangguan sambaran petir ke kawat tanah menara transmisi.

1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penulisan tesis ini adalah :

- a. Bagi penulis dapat sebagai sarana pendalaman studi tentang pemodelan proteksi akibat sambaran petir pada transformator
- b. Bagi perguruan tinggi dapat sebagai bahan referensi untuk penelitian lanjutan.

- c. Bagi perusahaan dapat sebagai bahan analisis perancangan sistem transmisi dan perlindungan transformator gardu induk.

1.7 Sistematika Penulisan

Dalam penulisannya, tesis ini tersusun atas beberapa bab pembahasan sebagai berikut [4]:

BAB 1 : PENDAHULUAN

Pada bab ini diuraikan secara singkat tentang latar belakang, identifikasi, batasan, rumusan, tujuan, manfaat dan sistematika penelitian.

BAB 2 : TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memuat pembahasan umum tentang proses terjadinya petir, tegangan lebih akibat petir, gelombang berjalan, komponen utama pada saluran transmisi, lightning arrester, gardu induk, isolasi impuls dasar, faktor perlindungan dan software ATP Draw.

BAB 3 : METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjabarkan jalannya penelitian, mulai dari lokasi dan waktu penelitian, data penelitian, variabel penelitian dan diagram alir penelitian.

BAB 4 : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memaparkan hasil yang didapatkan serta membahas dan menganalisa hasil yang diperoleh dari simulasi yang telah dilakukan.

BAB 5 : PENUTP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari penelitian yang telah dilakukan.

BAB 2

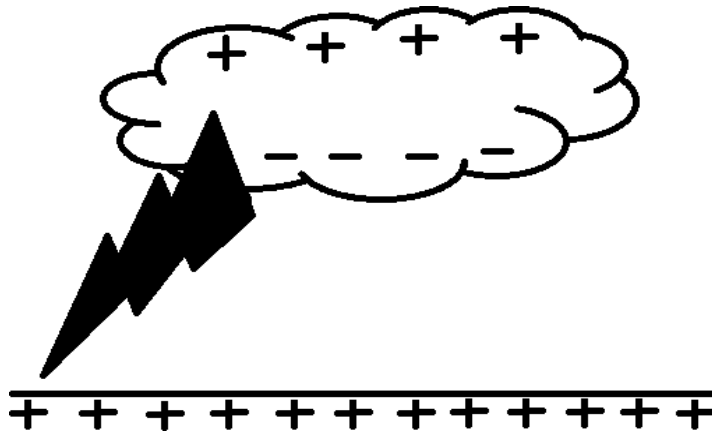
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Proses Terjadinya Petir

Proses terbentuknya sambaran petir ditimbulkan lantaran berkumpulnya awan bermuatan di atas permukaan bumi. Pembentukan awan disebabkan oleh adanya perbedaan kelembaban udara. Hal ini terjadi karena pengaruh sinar matahari, dan kemudian mengakibatkan penguapan air, uap air ini akan naik disebabkan gerakan udara naik (*up draft*). Proses ini akan terjadi berulang-ulang sehingga akan terbentuk awan yg bermuatan diatas permukaan bumi.

Setelah terbentuknya awan bermuatan, proses selanjutnya yang terjadi adalah akan terbentuknya kristal-kristal es dalam awan bermuatan, kristal es ini akan terkena angin dan tergesek satu sama lain, dan mengakibatkan muatan dalam kristal es tidak menjadi netral lagi, tetapi akan bernilai muatan positif (+), & negatif (-). Muatan positif yang terbentuk dalam awan akan berkumpul dibagian atas awan, sedangkan muatan negatif yang terbentuk akan berkumpul dibagian bawah awan. Permukaan bumi diyakini mempunyai nilai muatan positif, sebagai akibat adanya muatan-muatan negatif yg terletak dibawah awan akan tertarik kearah muatan positif yg terletak di bumi. Ketika terjadi proses pelepasan muatan dari bawah awan menuju ke permukaan bumi maka akan terjadi sambaran petir. Proses pelepasan muatan petir dapat dilihat pada Gambar 2.1[5].



Gambar 2.1 Proses Pelepasan Muatan dari Awan Menuju Bumi

Menurut kejadiannya sambaran petir terdiri dari dua jenis yaitu[5] :

1. Sambaran langsung

Sambaran langsung adalah sambaran yang terjadi saat petir menyambar secara langsung peralatan - peralatan listrik di gardu induk. Hal ini akan menyebabkan timbulnya tegangan lebih (*over voltage*) yang tinggi.

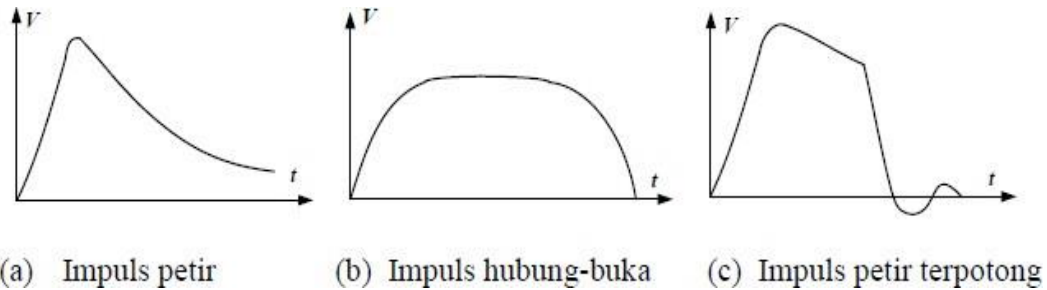
2. Sambaran tidak langsung

Sambaran tidak langsung (pengaruh induksi) adalah sambaran yang disebabkan oleh adanya sambaran petir ke tanah yang berlokasi dekat dengan peralatan, hal ini akan menimbulkan tegangan lebih, serta gelombang berjalan di sekitar lokasi terjadinya sambaran ini.

2.1.2 Tegangan Impuls

Tegangan impuls adalah tegangan yang waktu kenaikannya sangat cepat sekali dan waktu penurunannya relatif lambat menuju nol. Ada tiga bentuk tegangan impuls yang mungkin terjadi dalam sistem tenaga listrik yaitu: tegangan impuls petir yang disebabkan oleh sambaran petir, tegangan impuls hubung buka

yang disebabkan oleh adanya operasi hubung-buka, dan tegangan impuls petir terpotong, Gambar ketiga tegangan impuls ini dapat dilihat pada Gambar 2.2[6]



Gambar 2.2 Jenis – Jenis Tegangan Impuls

Tegangan impuls dapat didefinisikan sebagai suatu gelombang yang berbentuk eksponensial ganda yang dapat dinyatakan dengan persamaan 2.1 :

$$V = V_o (e^{-at} - e^{-bt}) \quad (2.1)$$

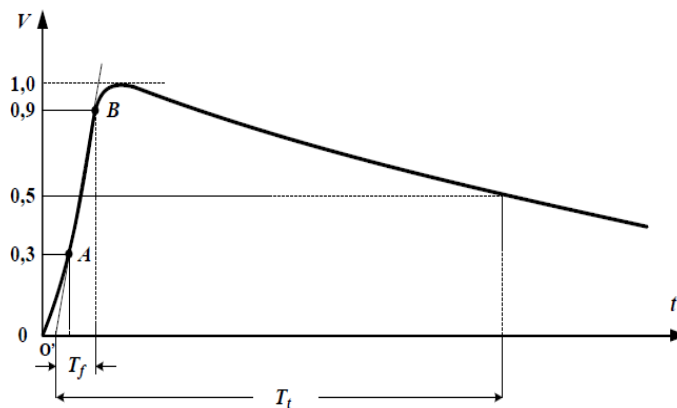
Dari Persamaan diatas dapat dilihat bahwa bentuk gelombang tegangan impuls dipengaruhi oleh konstanta a dan b, sedangkan nilai konstanta a dan b ditentukan oleh nilai komponen yang ada pada rangkaian.

Definisi bentuk gelombang impuls :

1. Bentuk dan waktu gelombang impuls dapat diatur dengan mengubah nilai komponen rangkaian generator impuls.
2. Nilai puncak tanganan (*peak value*) merupakan nilai maksimum yang dicapai oleh gelombang impuls.
3. Gelombang depan (*wave front*) didefinisikan sebagai bagian gelombang yang dimulai dari titik nol sampai titik puncak. Waktu muka (*Tf*) adalah waktu yang diperlukan gelombang dari titik nol sampai titik puncak gelombang.

4. Gelombang ekor (*wave tail*) didefinisikan sebagai bagian gelombang yang dimulai dari titik puncak sampai akhir gelombang. Waktu ekor gelombang (T_t) adalah waktu yang dimulai dari titik nol sampai dengan setengah puncak pada ekor gelombang.

Suatu tegangan impuls dapat dinyatakan dalam tiga besaran yaitu tegangan puncaknya (V_{maks}), waktu muka (T_f), dan waktu ekor (T_t). Menurut *IEC* waktu muka dan waktu ekor untuk tegangan impuls petir adalah $T_f \times T_t = 1,2 \times 50 \mu s$. Gambar gelombang impuls petir dengan standart *IEC* ditunjukkan oleh Gambar 2.3[6]



Gambar 2.3 Gelombang Impuls Petir

Berdasarkan Gambar 2.3 dapat disimpulkan bahwa waktu muka (T_f) dan waktu ekor (T_t) berdasarkan standar *IEC* dapat dituliskan sebagai berikut :

- Tegangan impuls petir : $T_f \times T_t = (1,2 \pm 30 \%) \times (50 \pm 20 \%) \mu s$
- Tegangan impuls hubung buka : $T_f \times T_t = (250 \pm 20 \%) \times (2500 \pm 60 \%) \mu s$

Apabila sambaran petir mengenai saluran transmisi maka akan sangat membahayakan sistem transmisi, bahaya ini dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Bahaya tegangan lebih sambaran langsung pada penghantar

$$V_L = Z_L I_S \quad (2.2)$$

Dimana:

V_L = Tegangan pada penghantar (kV)

Z_L = Impedansi pada penghantar (Ω)

I_S = Arus sambaran (kA)

Muatan listrik yang dilepaskan oleh petir pada konduktor akan mengalir pada penghantar melalui kedua arah dalam bentuk gelombang berjalan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4[7].



Gambar 2.4 Tegangan surja (lightning surge) akibat sambaran petir

2. Bahaya Sambaran Tidak Langsung (pengaruh Induksi)

Bahaya yang disebabkan oleh sambaran tidak langsung (pengaruh induksi) dapat terjadi karena pengaruh :

- Induksi arus elektromagnetik sebagai akibat adanya proses pelepasan muatan didekat sistem dan mempengaruhi sistem.
- Induksi elektrostatik yang diakibatkan oleh muatan awan yang berlokasi diatas hantaran udara dan mempengaruhi sistem.

2.1.3 Traveling Wave (Gelombang Berjalan)

Apabila sistem transmisi tenaga listrik yang digambarkan oleh dua buah kawat yang terhubung dengan sumber tegangan lebih (impuls transient) yang disebabkan oleh sambaran petir (surja petir) ke sistem, maka kawat penghantar ini tidak akan langsung bertegangan. Perlu beberapa waktu untuk dapat merasakan tegangan ini disuatu titik didalam system, dan mempunyai jarak tertentu dari sumber tegangan tersebut. Hal ini disebabkan oleh adanya nilai induktansi dan kapasitansi pada sistem yang tidak memiliki nilai rugi-rugi.

Efek yang timbul oleh adanya gelombang tegangan yang berjalan adalah didalam sistem adalah:

- a. Sambaran secara langsung pada kawat tanah menara transmisi.
- b. Sambaran secara tidak langsung (pengaruh *induksi*)
- c. *Switching operation* (operasi pemutusan)
- d. *Arching grounds*
- e. Gangguan-gangguan lain pada sistem sebagai akibat adanya berbagai kesalahan.

Beberapa penelitian menunjukkan tegangan lebih (*overvoltages*) akibat sambaran petir (surja petir) maupun oleh proses hubung buka (surja hubung), membutuhkan beberapa waktu untuk mencapai puncak gelombang dan waktu penurunan gelombang tegangan, hal ini sangat bervariasi. Sehingga ketika melakukan pengujian memerlukan penetapan bentuk tegangan tegangan impuls. Beberapa bentuk gelombang standar impuls dapat dilihat seperti pada Tabel 2.1[8].

Tabel 2.1 Standar Gelombang Impuls Beberapa Negara

Standar	T_f x T_t
CIGRE	3,3 x 77,5 μs
IEC	1,2 x 50 μs
Amerika	1,5 x 40 μs
Jerman dan Inggris	1 x 50 μs
Jepang	1 x 40 μs

Keterangan:

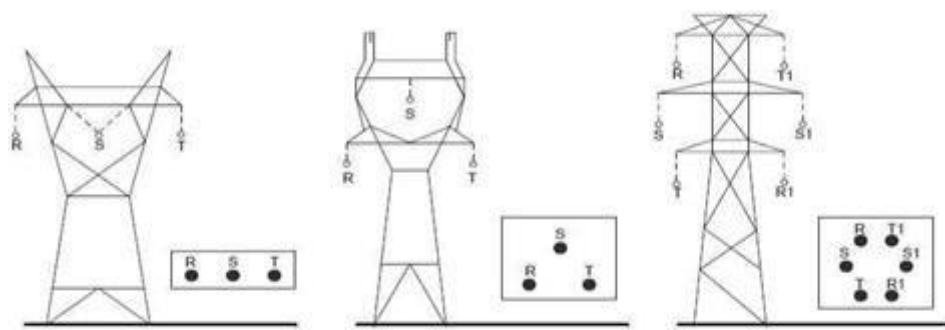
T_f : waktu muka gelombang (μs) dan T_t : waktu ekor gelombang (μs)

2.1.4 Komponen – Komponen Yang Ada Pada Saluran Transmisi

Saluran Transmisi tenaga listrik terdiri dari beberapa komponen utama yang terdiri atas:

1. Tiang Transmisi (Menara)

Menara transmisi atau tiang transmisi adalah suatu bangunan yang berfungsi sebagai penopang saluran transmisi, bangunan ini dapat berbentuk menara beton bertulang, menara baja atau menara kayu. Menara beton bertulang, maupun menara kayu umumnya dipakai pada saluran transmisi dengan tegangan kerja yang rendah (dibawah 70kV), sedangkan untuk saluran transmisi tegangan tinggi atau saluran transmisi tegangan ekstra tinggi digunakan menara baja. Pada Gambar 2.5[9] diperlihatkan bentuk & model menara transmisi.



(a) Menara Jenis A saluran tunggal

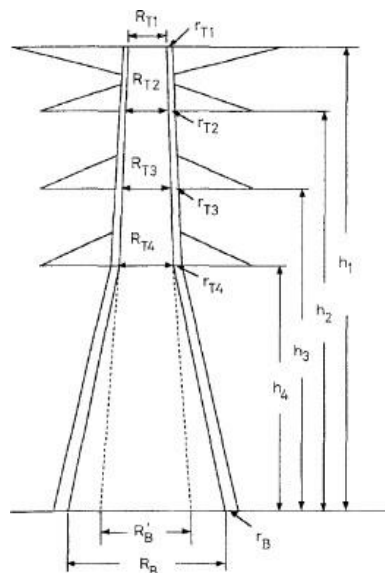
(b) Menara Jenis B konfigurasi delta

(c) Menara Jenis C konfigurasi vertical

Gambar 2.5 Model Menara Transmisi

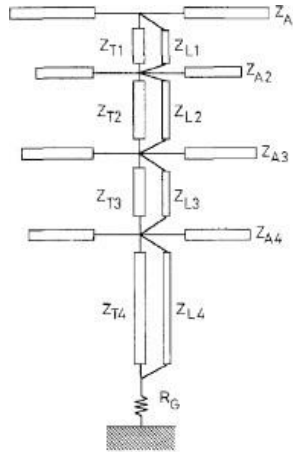
Pada penelitian ini menara yang digunakan adalah model menara sirkuit ganda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 bagian C.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan T.Hara dan O.Yamamoto[10], pemodelan dan perhitungan nilai impedansi surja menara dapat dilakukan, dengan menggunakan rangkaian pengganti. Gambar 2.6[10] menunjukkan skematik menara transmisi.



Gambar 2.6 Skematik menara transmisi.

Dari gambar skematik menara transmisi diatas dapat dimodelkan dengan rangkaian pengganti equivalent dari menara transmisi, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.7[10].



Gambar 2.7 Rangkaian ekivalent menara transmisi.

Berdasarkan Gambar 2.7 dapat dilihat bahwa pemodelan impedansi surja menara transmisi dibagi menjadi beberapa bagian yaitu, pemodelan kaki menara, pemodelan *bracket*, dan pemodelan lengan menara. Untuk mengetahui besar nilai masing-masing. Berikut adalah persamaan yang digunakan dalam pemodelan ini:

➤ Model kaki utama menara (Z_{Tk})

$$Z_{Tk} = 60 \ln \frac{2\sqrt{Z_{hk}}}{r_{ek}} \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (2.3)$$

Dimana :

$$r_{ek} = 2^{1/8} (r_{Tk}^{1/3} r_B^{2/3})^{1/4} (R_{Tk}^{1/3} R_B^{2/3})^{3/4} \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (2.4)$$

➤ Model *bracket* menara (Z_{Lk})

$$Z_{Lk} = 9Z_{Tk} \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (2.5)$$

➤ Model lengan menara (Z_{Ak})

$$Z_{Ak} = 60 \ln \frac{2k}{r_{Ak}} \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (2.6)$$

Dimana :

h_k = Tinggi lengan menara

r_{Ak} = Lebar menara.

2. Isolator

Isolator berfungsi untuk memisahkan bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan/ *ground*, baik dalam kondisi *normal continous operation* maupun ketika terjadi surja (termasuk surja petir) di dalam saluran transmisi. Isolator memiliki ketahanan tegangan impuls petir pengenalan, tegangan kerja, tegangan tembus minimum sesuai tegangan kerja[11]. Isolator merupakan bahan isolasi yang diapit oleh logam sehingga merupakan sebuah kapasitor. Kapasitansinya diperbesar oleh polutan maupun kelembaban udara di sekitarnya. Apabila nilai isolasi menurun akibat polutan yang ada maupun kerusakan pada Isolator, maka akan terjadi kegagalan isolasi yang akhirnya dapat menimbulkan gangguan sistem transmisi tenaga listrik.

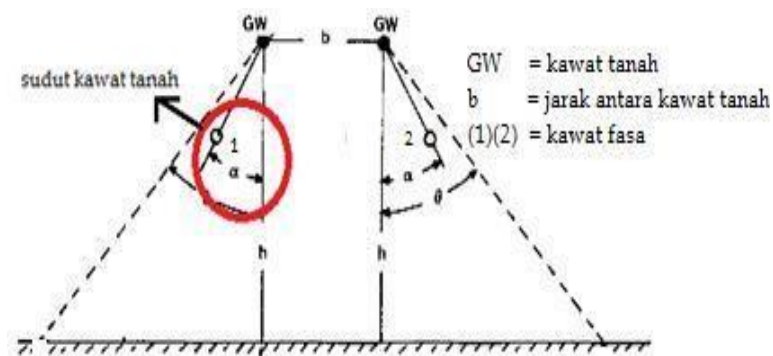
3. Kawat Penghantar

Kawat penghantar (konduktor) berfungsi mengalirkan listrik dari suatu tempat ketempat lainnya. Penghantar jenis tembaga memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan Penghantar berjenis aluminium, hal ini dikarenakan produktifitas dan ketahanan bahan yang tinggi. Kelemahan penghantar jenis tembaga adalah untuk nilai tahanan yang sama, penghantar tembaga memiliki bobot yang lebih berat dibandingkan penghantar aluminium, serta harga jualnya juga lebih mahal[11]. Karena hal tersebut penghanta aluminium telah digunakan untuk menggantikan penghantar tembaga. Untuk memperbesar nilai ketahanan pengahantar aluminium digunakanlah campuran bahan aluminium (*aluminium*

alloy). Pada saluran transmisi tegangan tinggi, jarak antara dua menara berkisar ratusan meter oleh karena itu dibutuhkan nilai kuat tarik (ketahanan) bahan yang lebih tinggi, dan oleh karena itu digunakanlah kawat jenis *Alluminium Conductor Steel Reinforced (ACSR)* yaitu kawat penghantar dengan jenis aluminium dan memiliki inti kawat baja. Pada saluran udara tegangan tinggi yang menggunakan udara sebagai bahan isolasi, maka kawat penghantar yang digunakan haruslah kawat-kawat berjenis campuran.

4. Kawat Tanah (Ground Wire)

Saat terjadi sambaran petir kekawat fasa menara transmisi, sistem penyaluran energi listrik kepada konsumen dapat terganggu bahkan pasokan energi listrik dapat terputus. Oleh sebab itu maka diperlukan pemasangan kawat tanah (ground wire) di atas kawat fasa. Hal ini berfungsi sebagai pelindung kawat fasa dari sambaran petir, agar dapat bekerja maksimal kawat tanah diatur agar memiliki nilai resistansi terkecil dan dengan jarak tertentu. Pengaturan sudut kawat tanah dapat dilihat pada Gambar 2.8[12].



Gambar 2.8 Pengaturan Sudut Kawat Tanah

2.1.5 Lighting Arrester

Usaha untuk memperkecil terjadinya gangguan pada saluran transmisi adalah dengan memasang arrester untuk mencegah kerusakan pada peralatan akibat sambaran petir yang mungkin terjadi. Arrester adalah salah satu peralatan pengamanan instalasi dari gangguan tegangan lebih akibat sambaran petir (*Lightning Surge*) maupun oleh surja hubung (*switching surge*).

Ketika sambaran petir melewati arrester, seketika itu arrester memiliki nilai karakteristik yang dibatasi oleh tegangan (*voltage limiting*). Karakteristik *voltage limiting* ini adalah tanda bahwa nilai tegangan yang ada pada terminal mampu ditahan oleh arrester ketika arrester sedang menyalurkan arus tertentu. Batasan termis yang dimiliki arrester berarti bahwa arrester mampu melewatkan nilai arus petir yang terjadi dalam durasi yang lama dan secara berulang-ulang. Gambar arrester yang ada di Gardu Induk 150 kV Binjai dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Arrester Pada Gardu Induk Binjai

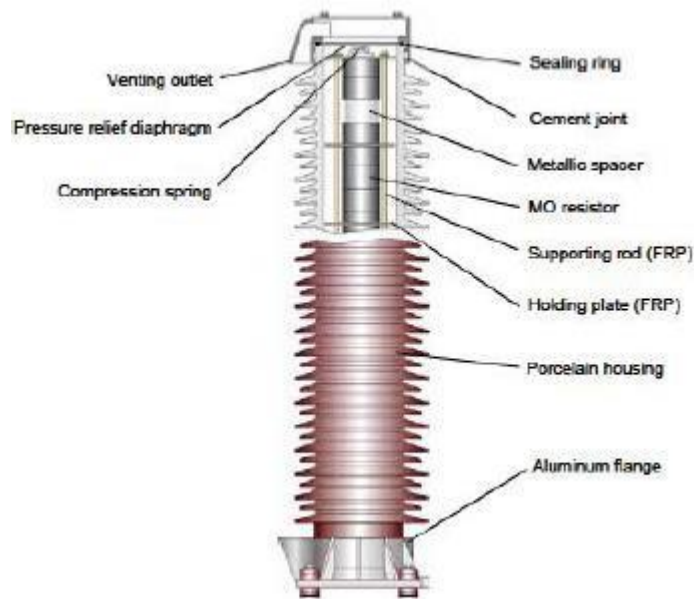
Sebagai salah satu peralatan pengamanan di gardu induk, arrester memiliki bentuk (konstruksi) serta jenis-jenis yang memiliki sifat tahan terhadap gangguan sambaran petir serta arrester berguna untuk melindungi komponen - komponen

penting yang terdapat di gardu induk seperti, melindungi transformator daya yang terpasang pada gardu induk.

Berikut ini beberapa model serta jenis-jenis arrester yang terdapat di gardu induk:

A. Model Arrester

Komponen utama yang terdapat pada Arrester terbentuk dari zinc oxide atau biasanya disebut komponen aktif. Komponen aktif merupakan bahan yang terbuat dari zinc oxide ini berbentuk seperti kepingan blok dan tersusun didalam housing, serta dibuat dari bahan porselen. Fungsi Housing adalah sebagai bahan penyangga serta mengisolasi bagian bertegangan dan tanah ketika arrester sedang beroperasi. Bagian - bagian dari sebuah arrester dapat dilihat pada Gambar 2.9 dibawah ini :



Gambar 2.10 Kontruksi Arrester

Arrester memiliki katup pressure relief di kedua ujungnya. Katup pressure relief ini berfungsi melepaskan tekanan internal yang berlebihan ketika arrester dilewati oleh arus surja. Selain itu model lain dari arrester terdiri dari struktur

penyangga, grading ring arrester pada transformator, grounding, dan juga alat monitoring berupa milimeter dan counter yang akan dijelaskan sebagai berikut:

1. Varistor

Varistor merupakan komponen yang terbentuk dari kolom varistor Zinc Oxide (ZnO). Komponen ini bentuk silinder serta memiliki ukuran diameter keping bergantung kepada nilai *discharge* arus yang dimiliki. Bentuk keping silinder tersebut terbentuk dari bahan aluminium dan berfungsi sebagai pendingin. Pada arrester jaringan distribusi, ukuran dari diameter keping arrester bervariasi mulai dari 30 mm hingga 100 mm. Pada Gambar 2.11[13] ditunjukkan kompoen aktif metal oxide varistor yang terdapat pada arrester sebagai berikut :



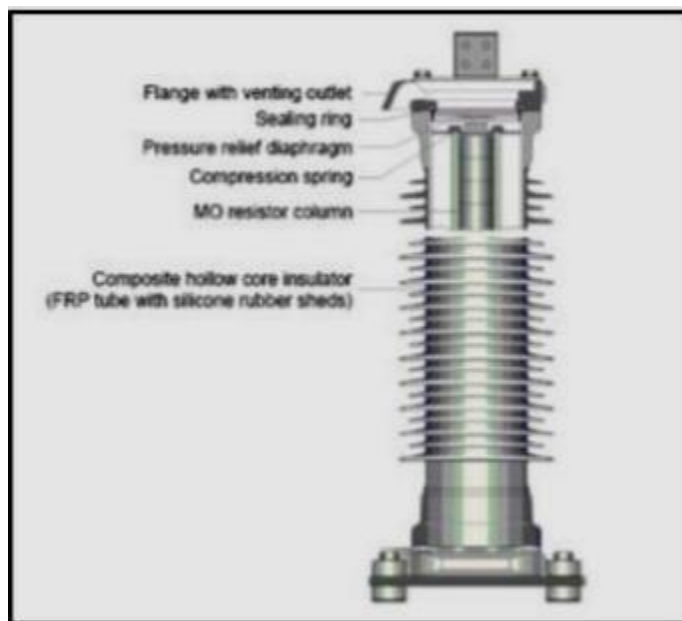
Gambar 2.11 Varistor

Setiap keping *Zinc Oxide* (ZnO) memiliki nilai residual yang bergantung pada besarnya diameter keping tersebut, hal ini sangat penting ketika untuk melewatkan arus surja petir. Keping yang memiliki nilai ukuran diameter 32 mm, maka nilai residual tegangan yang dimiliki hanya sebesar 450 V/ mm, sementara jika diameter keping sebesar 70 mm maka nilai residual tegangan yang dimiliki akan menurun menjadi 280 V/mm.

Artinya dalam satu keping ZnO dengan diameter 70 mm dan tinggi 45 mm mempunyai nilai residual tegangan sebesar 12.5 kV.

2. Housing arrester

Dalam sangkar rod terdapat tumpukan keping *Zinc Oxide* (ZnO) yang umumnya terbuat dari bahan fiber glass reinforced plastic (FRP). Pada kedua ujung kolom active part, compression spring dipasang untuk memastikan susunan keping ZnO memiliki ketahanan mekanis. Sementara kompartemen housing tersebut terbuat dari porselen maupun polymer. Kemudian aluminium flange direkatkan di kedua ujung housing dengan menggunakan semen. Pada gambar 2.12[13] dibawah ini merupakan gambar dari housing dan terminal arrester secara umum.

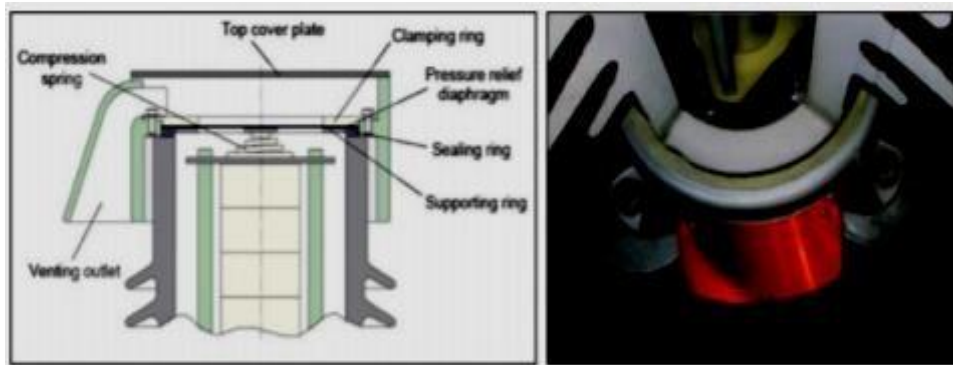


Gambar 2.12 Housing Arrester

3. Sealing dan Pressure Relief Sistem.

Sealing ring dan pressure relief terletak pada system dan dipasang di kedua ujung arrester. Sealing ring terbentuk dari material sintetis sementara pressure relief sistem terbentuk dari bahan steel/ nikel. Fungsi dari sealing adalah sebagai katup yang akan melepaskan tekanan internal yang terjadi, sedangkan pressure relief

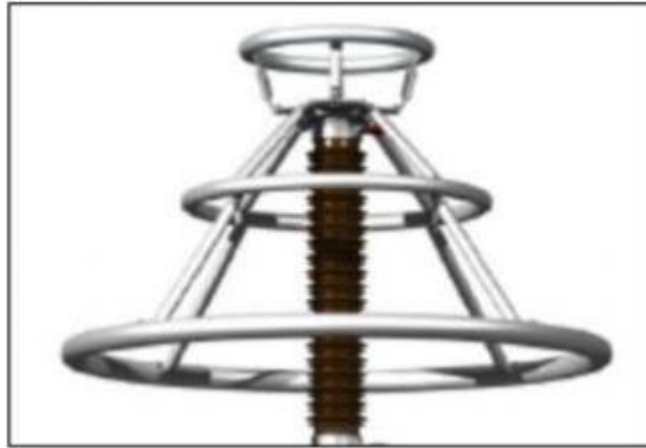
system akan bekerja ketika kondisi arrester sedang mengalirkan arus sambaran petir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13[13] berikut :



Gambar 2.13 Sealing dan Pressure Relief Sistem

4. Grading ring

Pada ketinggian lebih dari 1.5 meter maka arrester akan dipasang secara bertingkat, dan pemasangan ini memerlukan grading ring. Grading ring berfungsi sebagai control terhadap distribusi medan listrik yang ada disepanjang permukaan arrester. Semakin dekat dengan lokasi tegangan maka medan elektromagnetis yang terjadi akan semakin besar pula, sehingga pada bagian tegangan yang aktif nilai tegangan akan jauh lebih tinggi dibandingkan pada posisi di bawahnya. Tegangan tarik ini dapat menyebabkan degradasi pada bagian aktif. Ukuran grading ring perlu mempertimbangkan jarak antar fasa sehingga jarak aman antar konduktor harus sama dengan jarak antar grading ring dan fasa dari posisi arrester. Pada Gambar 2.14 ditunjukkan susunan arrester tegangan tinggi dengan grading ring.



Gambar 2.14 Arrester Tegangan Tinggi Dengan Grading Ring

5. Peralatan Monitoring dan Isolator Dudukan Arrester

Untuk peralatan monitoring, maka arrester perlu dilengkapi dengan discharge counter (mA)., pada kedua ujung peralatan monitor maupun pada dudukan arester, isolator dudukan perlu dipasang baik, agar ketika arus yang melewati arrester hanya melewati kawat pentanahan. Gambar 2.15 menunjukkan isolator dudukan yang ada pada arrester.



Gambar 2.15 Isolator Arrester

Struktur penyangga arrester terletak pada posisi tertentu dengan ketinggian tertentu juga dari permukaan tanah oleh karena itu diperlukan adanya struktur penyangga sebagai penahan dari arrester tersebut. Dengan adanya struktur

penyangga pada arrester, maka arrester semakin kuat dan kokoh. Gambar 2.16 menunjukkan penyangga yang berada di gardu induk.



Gambar 2.16 Struktur Penyangga Arrester

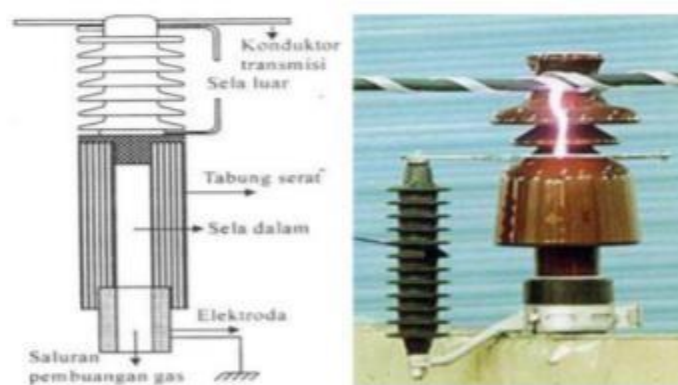
B. Jenis – Jenis Arrester

Sebagai salah satu peralatan pengamanan yang terdapat pada jaringan tegangan tinggi dan dipasang pada gardu induk, arrester dibedakan sesuai dengan prinsip kerjanya. Beberapa jenis arrester yang biasa dipasang pada gardu induk, yaitu :

1. Arrester Jenis Ekspulsi (expulsion type)

Prinsip kerja arrester jenis ekspulsi adalah ketika terjadi gangguan tegangan lebih (*transient*) yang bergerak sampai pada titik terminal arrester, maka pada serat dan sela percik batang yang terletak diluar akan terjadi spark over, hal tersebut juga akan terjadi pada sela percik yang terletak dibagian dalam. Ketika sambaran petir terjadi maka pada kedua sela yang terletak diujung arrester akan terjadi percikan, hal ini menyebabkan muatan listrik yang ada dapat langsung dibumikan. Arrester dapat bersifat sebagai konduktor yang baik serta berguna untuk mengalirkan arus discharge (*discharger current*) yang terjadi sebagai akibat dari tegangan lebih yang

terjadi. Sedangkan apabila tegangan telah lebih hilang, maka arrester akan bekerja sebagai pengalir arus (*flow current*) dari tegangan sistem. Apabila terjadi pemanasan sebagai akibat mengalirnya arus pada tabung arrester yang kemudian akan membangkitkan gas dari dinding fiber akibat tekanan udara yang ada dalam tabung naik dan menyebabkan gas keluar. Gambar 2.17 menunjukkan arrester jenis ekspulsi yang ada pada jaringan tegangan menengah.

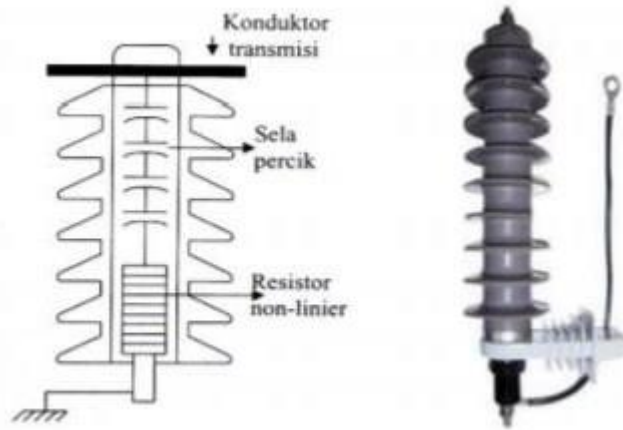


Gambar 2.17 Arrester Jenis Ekspulsi (Expulsion Type)

Pada arrester ini udara keluar melalui Saluran tabung ventilasi gas yang ada pada arrester. Aliran arus akan terputus dan seketika arrester akan berlaku sebagai isolator. Arrester berjenis ekspulsi ini terbagi menjadi dua jenis, yaitu pertama arrester ekspulsi bertipe transmisi berfungsi untuk pengamanan saluran transmisi dari besarnya tegangan surja petir yang berjalan ke gardu induk dan kedua arrester ekspulsi tipe distribusi yang berfungsi sebagai sistem pengamanan jaringan distribusi dari tegangan surja petir yang menyebabkan gelombang berjalan menuju beban. Arrester ekspulsi tipe distribusi biasanya digunakan untuk melindungi transformator distribusi yang nilai tegangannya berkisar antara 3-15 kV, namun belum optimal jika digunakan untuk melindungi transformator daya.

2. Jenis Katup (valve type)

Arrester jenis katup berharga lebih mahal dari tipe ekspulsi, dikarenakan ukurannya yang lebih besar. Arrester jenis katup memiliki beberapa sela percik yang terhubung secara seri, serta memiliki elemen tahanan yang berkarakteristik non linier. Sifat dari elemen tahanan ini adalah bernilai rendah ketika sedang dialiri arus yang tinggi dan nilai tahanannya akan berubah menjadi besar ketika arus yang mengalir bernilai kecil. Arrester jenis katup memiliki tahanan yang mengandung bahan silikon karbid (SiC). Tahanan non linier dan sela percik terletak didalam tabung isolasi tertutup, sehingga sistem kerja dari arrester tidak akan terpengaruh oleh keadaan udara disekitar. Sistem kerjanya ketika dalam kondisi normal arrester jenis katup akan bertindak sebagai isolator. Apabila terjadi gangguan tegangan lebih pada arrester akan terjadi spark over pada gap seri, dan pada saat itu, discharger current berupa tahanan non linier. Apabila tegangan terminal semakin besar maka nilai tahanannya juga akan semakin rendah. Maka tegangan jepitan antar arrester tetap ada nilai -nilai yang tidak membahayakan ketika discharger current yang cukup besar. Setelah tegangan turun atau mengecil, tahanan valve element menjadi naik. Oleh katup element arus yang makin kecil, pada akhirnya melewati titik nol perjalanan arus. Fungsi dari gap seri adalah sebagai tempat proses *discharger current*, sedangkan fungsi dari *valve element* adalah sebagai pengatur besarnya nilai *discharger current* aliran arus dapat diputus oleh gap seri. Ketika aliran arus sudah terputus, maka arrester akan Kembali berfungsi sebagai isolator. Gambar arrester jenis katup ditunjukkan pada Gambar 2.18.



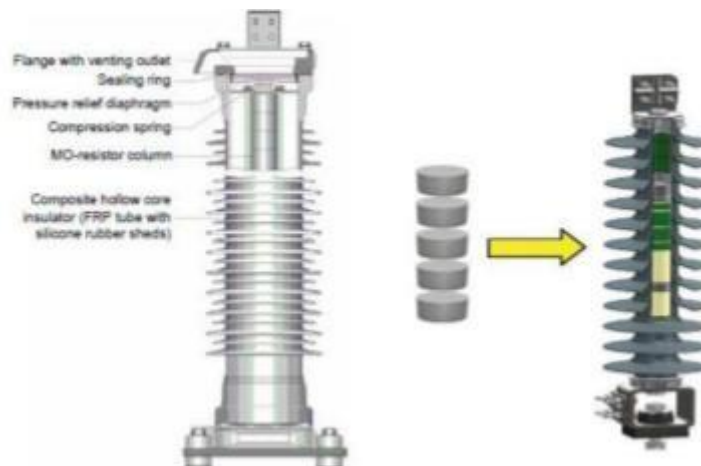
Gambar 2.18 Arrester Jenis Katup (Valve Type)

Berdasarkan jenis material tahanan katub/varistor (*valve resistor*) arrester ini dibedakan menjadi dua jenis, yaitu :

a. Arrester zinc oxide (ZnO)

Arrester jenis *Zink Okside* (ZnO) adalah jenis yang terbentuk tanpa memiliki sela seri serta memiliki satu/lebih unit kedap udara yang didalamnya terisi oleh blok-blok ZnO (*zinc oxide*) sebagai bahan aktif tahanan katup (*valve resistor*) [12].

Arrester jenis zinc oxide dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Arester Jenis Zinc Oxide Dengan Elemen Aktif

b. Jenis Silicon Carbide (SiC)

Arrester SiC (*Silicon Carbide*) merupakan jenis arrester yang memiliki beberapa celah (*spark gaps*) yang terhubung secara seri dengan bahan resistor SiC (*Silicon Carbide*). Arrester ini dihubungkan pada konduktor fasa, dalam keadaan normal celah (*spark gap*) antar material resistor SiC tidak melakukan pemisahan antara konduktor bertegangan tinggi dan sistem pentanahan. Saat tegangan lebih (*transient*) terjadi akibat sambaran petir (surja petir) secara langsung maupun akibat hubung singkat serta membahayakan bagi isolasi peralatan, maka celah (*spark gap*) akan bekerja untuk menyalurkan tegangan lebih ini melalui sistem pentanahan. Ketika nilai tegangan yang melewati resistor non linear besarnya dua kali lipat, maka arus yang terjadi akan meningkat kira-kira 10 kali lipat.

Kelebihan yang dimiliki adalah celah (*gaps*) jarak antar material cukup jauh. Dalam kondisi operasi normal nilai tegangan dan frekuensi dapat diabaikan. Apabila terjadi aliran arus bocor antara penghantar dan grounding efek yang timbul dapat diminimalisir oleh arrester SiC.

Arrester jenis SiC berdasarkan pemasangannya terbagi menjadi tiga jenis yaitu:

a. Arrester katup jenis gardu

Arrester ini umumnya dipakai untuk melindungi peralatan yang nilai ekonomisnya mahal, berkisar mulai dari 2.400 volt sampai 287 kV atau lebih tinggi.

b. Arrester katup jenis saluran

Arrester ini umumnya memiliki nilai ekonomis yang lebih murah dari arrester katup jenis gardu. Arrester ini umumnya digunakan pada sistem dengan range tegangan antara 15 kV sampai dengan 69 kV.

c. Arrester katup jenis Gardu untuk mesin – mesin

Arrester katup jenis Gardu untuk mesin – mesin memiliki sifat khusus untuk melindungi mesin – mesin berputar. Pemakaiannya untuk nilai tegangan 2,4 kV sampai 15 kV.

d. Arrester katup jenis distribusi untuk mesin – mesin

Arrester jenis distribusi ini berfungsi melindungi mesin – mesin berputar dan juga melindungi transformator dengan sistem pendingin udara tanpa minyak. Arrester jenis ini dipakai pada perlatan dengan tegangan 120 volt sampai 750 volt

C. Pemilihan Arrester

Arrester yang akan dipasang untuk sistem pengamanan tertentu, dalam pemilihannya harus memenuhi beberapa faktor yaitu [14] :

1. Kebutuhan perlindungan

Kebutuhan perlindungan berhubungan langsung dengan kekuatan isolasi peralatan yang harus dilindungi dan karakteristik impuls dari arrester.

2. Tegangan sistem

Tegangan sistem adalah tegangan pada terminal arrester.

3. Arus hubung singkat

Arus hubung diperlukan pada arrester jenis ekspulsi.

4. Jenis arrester

Jenis arrester berdasarkan penggunaannya yaitu : jenis arrester gardu, jenis saluran, atau jenis distribusi.

5. Faktor kondisi luar

Faktor kondisi luar, apakah normal atau tidak normal (200 meter atau lebih di atas permukaan laut), Suhu & kelembapan yang tinggi serta pengotoran.

6. Faktor ekonomi

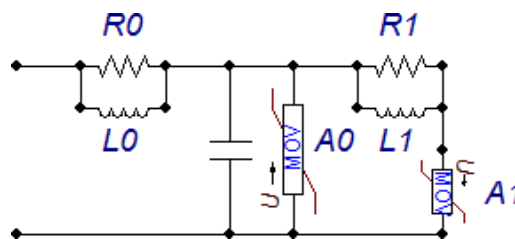
Faktor ini adalah perbandingan antara biaya pemeliharaan dan kerusakan apabila tidak ada arrester atau dipasang arrester yang lebih rendah nilainya. Untuk tegangan 69 kV dan lebih tinggi dipakai arrester jenis gardu, sedangkan untuk tegangan 23 kV sampai 69 kV salah satu

D. Pemodelan Arrester

Aplikasi ATP Draw 5.6 menggunakan rangkaian pengganti (Ekivalen) untuk menganalisis performa dari arrester. Pada penelitian ini arrester yang digunakan akan dimodelkan dalam rangkaian pengganti (ekivalen) sebelum disimulasikan. Pemodelan yang digunakan dalam penelitian ini adalah: Model IEEE, dan Model Karbalaye.

1. Model IEEE

Model IEEE ini direkomendasikan oleh W.G 3.4.11, Gambar rangkaian pengganti untuk arrester model IEEE dapat dilihat pada Gambar 2.20[15]



Gambar 2.20 Rangkaian Ekivalen Model IEEE

Dalam model IEEE ini karakteristik V-I diperoleh dengan menggunakan dua buah resistor non-linear (disebut A_0 dan A_1) dan dipisahkan oleh filter R-L. Lonjakan yang kecil disebabkan karena adanya impedansi filter sangat rendah. Pada model IEEE A_0 dan A_1 terhubung secara paralel, serta parameter yang harus dicari adalah L_1, R_1, L_0, R_0 dan C dengan mengetahui data arrester yang digunakan [13].

Untuk mengetahui nilai parameter pengganti maka dilakukan perhitungan dengan persamaan sebagai berikut:

$$L_1 = 15 \frac{d}{n} \quad (2.7)$$

$$R_1 = 65 \frac{d}{n} \quad (2.8)$$

$$L_0 = 0.2 \frac{d}{n} \quad (2.9)$$

$$R_0 = 100 \frac{d}{n} \quad (2.10)$$

$$C = 100 \frac{n}{d} \quad (2.11)$$

Dimana:

d : tinggi arrester (m)

n : jumlah kolom paralel dari arrester *metal oxide*

$L_{1,2}$: lilitan 1,2 (μH)

$R_{0,1}$: tahanan 0,1 (Ω)

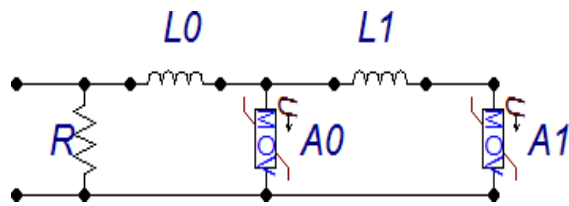
C : kapasitor (pF)

2. Model Micaela

Micaela Caserza Magro, Marco Giannettoni dan Paolo Pinceti merupakan orang pertama yang memperkenalkan model ini, model Michaela disusun berdasarkan penyederhanaan model IEEE. Beberapa perbedaan pada model Micaela dan model IEEE yaitu:

1. Nilai tegangan diperbesar menjadi level HV dan MV.
2. Rumus baru yang digunakan apabila tidak didapatkan data tegangan residu ketika lonjakan arus 10 kA dan waktu muka gelombangnya adalah $1/T_2 \mu\text{s}$ dan data pabrikasi,

Rangkaian ekivalen model Micaela dapat dilihat pada Gambar 2.25[16]



Gambar 2.21 Rangkaian Ekvivalen Michaela

Untuk mencari nilai L_0 dan L_1 diperlukanlah suatu konstanta yaitu "K". Nilai konstanta K dapat dicari menggunakan Persamaan 2.12 yaitu :

$$K = \frac{V_{1/T2}}{V_{8/20}} \quad (2.12)$$

Jika nilai $K < 1.18$ maka digunakan Persamaan 2.18 dan 2.19 berikut:

$$L_0 = \frac{1}{12} \frac{V_{r1/r} - V_{r8} / 20}{V_{r8} / 20} V_n \quad (2.13)$$

$$L_0 = \frac{1}{4} \frac{V_{r1/r} - V_{r8} / 20}{V_{r8} / 20} V_n$$

Dimana :

V_n = Tegangan pengenalan arester (kV)

$\frac{VR_1}{T_2}$ = Tegangan residu padalonjakan arus 10 kA dengan kecepatan lonjakan arus pada waktu muka gelombang $1/T_2 \mu s$ (kV)

$\frac{VR_8}{T_{20}}$ = Tegangan residu pada lonjakan arus 10 kA dengan bentuk $8/20 \mu s$ (kV)

Jika nilai $K > 1.18$ maka digunakan Persamaan 2.20 dan 2.21 berikut :

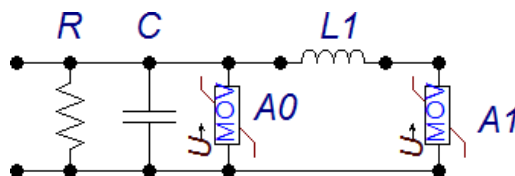
$$L_1 = 0.03 V_n \quad (2.14)$$

$$L_0 = 0.01 V_n \quad (2.15)$$

3. Model Karbalaye

Model Karbalaye diperkenalkan pertama kali oleh M. Karbalaye et al. model ini disusun berdasarkan penyederhanaan model IEEE. Pada model Karbalaye terdapat beberapa perbedaan dengan model IEEE yaitu:

1. Sebuah hambatan yang dirangkai secara paralel dengan induktansi digantikan oleh sebuah hambatan (sebesar 1 MΩ) dan terletak di antara terminal input.
2. Sebuah hambatan yang dirangkai secara paralel dengan induktansi digantikan dengan sebuah induktansi seperti diperlihatkan pada Gambar 2.22[17]



Gambar 2.22 Rangkaian Ekuivalen Model Karbalaye

Nilai induktansi dan kapasitansi dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.22 dan 2.23.

$$L_1 = \frac{1}{5} \left(\frac{V_{r8} - V_{ss}}{V_{r8/20}} \right) V_n \text{ (}\mu H\text{)} \quad (2.16)$$

$$C = \frac{1}{55} \left(\frac{V_{r8} - V_{ss}}{V_{r8/20}} \right) V_n \text{ (}pF\text{)} \quad (2.17)$$

dimana:

V_n = Tegangan pengenalan arester (kV)

V_{ss} = Tegangan residu ketika lonjakan arus 500 A dengan bentuk 30/60 μs (kV)

$V_{r8/20}$ = Tegangan residu pada lonjakan arus 10 kA dengan bentuk 8/20 μs (kV)

n = Jumlah kolom paralel

2.1.6 Gardu Induk

Tegangan yang dihasilkan oleh generator terbatas dalam orde belasan kilovolt, sedangkan dalam sistem transmisi membutuhkan tegangan dalam orde puluhan sampai orde ratusan kilovolt, untuk keperluan transmisi tegangan perlu dinaikkan menggunakan transformator daya *step up*. Ketika samapai kepada pelanggan tegangan transmisi dalam puluhan sampai ratusan kilovolt, sedangkan konsumen membutuhkan sampai dua puluhan kilovolt, sehingga di antara transmisi dan konsumen di butuhkan transformator daya *stepdown*. Semua perlengkapan yang terpasang di sisi sekunder dan primer saluran transmisi harus mampu memikul tegangan tinggi. Transformator daya beserta perlengkapannya yang disebut sebagai gardu induk.

Transformator daya yang terpasang, gardu induk dibagi menjadi dua yaitu gardu induk *step up* dan gardu induk *step down*. Gardu induk *step up* adalah gardu yang berfungsi sebagai gardu induk penaik tegangan, tegangan yang dihasilkan dari pembangkit kemudian dinaikkan menjadi tegangan yang lebih tinggi, kemudian akan disalurkan menuju saluran transmisi. Gardu induk *step down* adalah gardu induk yang berfungsi sebagai gardu induk penurun tegangan, tegangan yang disalurkan dari saluran transmisi akan diturunkan tegangannya, kemudian didistribusikan ke gardu distribusi. Gardu induk berdasarkan lokasi instalasinya terbagi menjadi, yaitu gardu induk pemasangan dalam dimana setiap peralatan tegangan tinggi terpasang di dalam, & gardu induk pemasangan luar dimana setiap peralatan tegangan tinggi terpasang di luar ruangan.

Pada gardu induk diperlukan sebuah sistem pentanahan sebagai bagian dari sistem pengamanan yang handal pada gardu induk. Fungsi dari sistem pentanahan

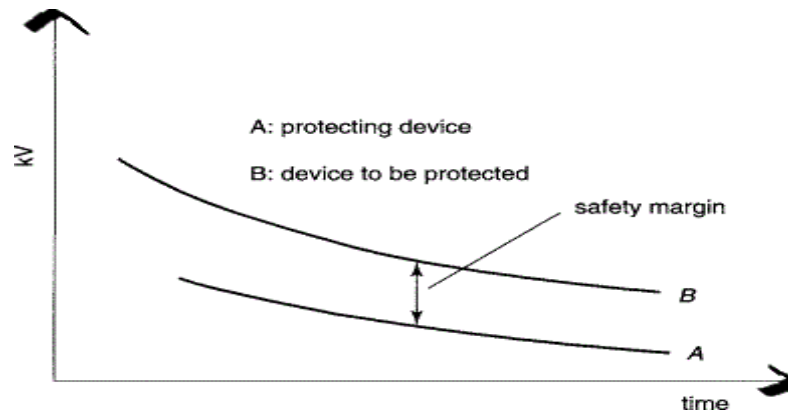
adalah ketika terjadi gangguan konduktor fasa ke tanah pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT), hal ini tidak akan membahayakan keselamatan manusia, dikarenakan gangguan yang terjadi akan langsung mengalir pada bagian peralatan menuju ke pentanahan. Hal ini akan menyebabkan timbulnya gradien tegangan antara (1) peralatan dengan peralatan, (2) peralatan dengan tanah dan, (3) gradien tegangan yang timbul pada permukaan tanah dan membahayakan bagi peralatan dan manusia yang berada di sekitar area gardu induk. Oleh karena itu sistem pentanahan yang baik dan efektif diperlukan untuk meratakan gradien tegangan yang timbul [13]. Tujuan dibuatnya sistem pentanahan yang baik dan efektif pada gardu induk adalah sebagai berikut:

- a. Memperbaiki keandalan (*performance*) sistem
- b. Mencegah terjadinya tegangan kejut listrik yang dapat membahayakan manusia.
- c. Memungkinkan timbulnya arus tertentu baik besarnya maupun lamanya dalam keadaan gangguan tanah tanpa menimbulkan kebakaran atau ledakan pada bangunan atau isinya.

2.1.6 Kemampuan Isolasi Dasar (Basic Insulation Level)

Basic Insulation Level atau kemampuan isolasi dasar memiliki peranan penting sebagai bagian dari sistem pengamanan transformator daya, dan merupakan komponen dasar dalam proses tranmisi tenaga listrik. Nilai dari *Basic Insulation Level* (BIL) diambil untuk mencegah kerusakan pada alat – alat listrik yang diakibatkan oleh tegangan lebih yang kemungkinan terjadi, pembatasan nilai lonjakan arus diperlukan untuk menghindari terjadinya kerusakan pada peralatan, sehingga kualitas pelayanan listrik kepada masyarakat dapat semakin baik serta

mencegah timbulnya biaya tambahan untuk perbaikan peralatan-peralatan yang mungkin terjadi akibat terkena dampak sambaran peir. Umumnya nilai *Basic Insulation Level* (BIL) berkisar 80% dari nilai tegangan sistem yang digunakan. Karakteristik dari *basic insulation level* dapat dilihat pada Gambar 2.23[18].



Gambar 2.23 Karakteristik BIL

2.1.7 (*Margin Protection*) Faktor Perlindungan

Margin protection (Faktor perlindungan) adalah besarnya tingkat perlindungan yang terdapat pada gardu induk. Faktor perlindungan (FP) umumnya harus bernilai diatas 20%[18]. Penentuan FP dapat dihitung berdasarkan persamaan-persamaan berikut:

1. Tegangan Pengenal Arrester (*Rating Arrester*)

Penentuan nilai besarnya tegangan pengenal yang ada pada arrester adalah dihitung menggunakan Persamaan 2.18 dan 2.19.

$$\text{Tegangan sistem maksimum} = V_{\text{nominal}} + 10 \% \quad (2.18)$$

Dimana 10 % merupakan faktor toleransi

$$\text{Tegangan pengenal arrester} = V_{\text{nominal}} \times \text{Koef Tanah} \times 1,1 \quad (2.19)$$

2. Tegangan Terminal Arrester (kV)

Nilai dari karakteristik kinerja arrester ditunjukkan oleh Tabel 2.2[19].

Tabel 2.2 Karakteristik kerja arrester

Tegangan Pengenal Arrester (kV)	Kecuraman surja/FOW(KV/ μ s)	Tegangan Kerja	
		STD (kV)	FOW (kV)
21	200	76	88
24	225	87	100
30	250	108	125
33	275	119	137
36	300	130	150
39	325	141	163
42	350	152	176
45	375	163	189
48	400	174	202

Keterangan:

FOW : *Front of wave protect level* (Tegangan percikan impuls muka gelombang, kV)

STD : *Sparkover Maximum Voltage* (Tegangan percikan impuls maksimum, kV)

3. Tegangan Kerja Arrester (U_A)

Nilai dari kinerja tegangan arrester dari beberapa tingkatan (*rating*) tegangan ditunjukkan oleh Tabel 2.3[20]

Tabel 2.3 Tegangan Kerja Arrester (U_A)

Rating Arrester (kV)	Tegangan Arrester 10 kA (kV)
102	343
108	363
120	400
126	420
138	460
150	500
174	570
186	610

4. Tingkat Perlindungan (TP) Arrester

Untuk memperoleh nilai faktor perlindungan (FP), maka perlu juga mengetahui nilai tingkat perlindungan (TP) Arrester. Besarnya nilai Tingkat Perlindungan (TP) Arrester dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.19.

$$TP \text{ Arrester} = \text{Tegangan Kerja Arrester} + 10\% \quad (2.19)$$

5. Faktor Perlindungan (FP) atau *Margin Protection* (MP)

Faktor perlindungan merupakan perbedaan antara nilai BIL peralatan yang dilindungi dengan tegangan kerja arrester. Faktor perlindungan untuk peralatan yang ada di gardu induk harus lebih dari 20 % agar dinyatakan aman. Besarnya nilai faktor perlindungan (FP) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.20 :

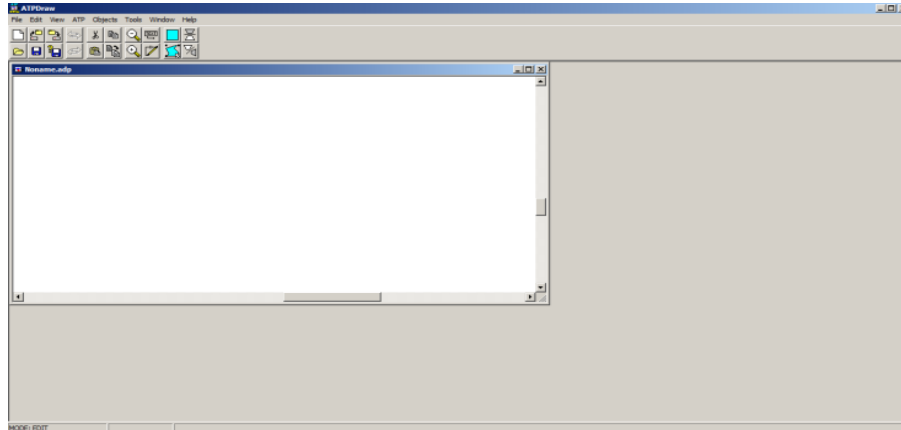
$$Margin \ Protection \ (MP) = \frac{BIL_{Peralatan} - TP_{Arrester}}{BIL_{Peralatan}} \times 100\% \quad (2.20)$$

2.1.8 Aplikasi ATP Draw 5.6

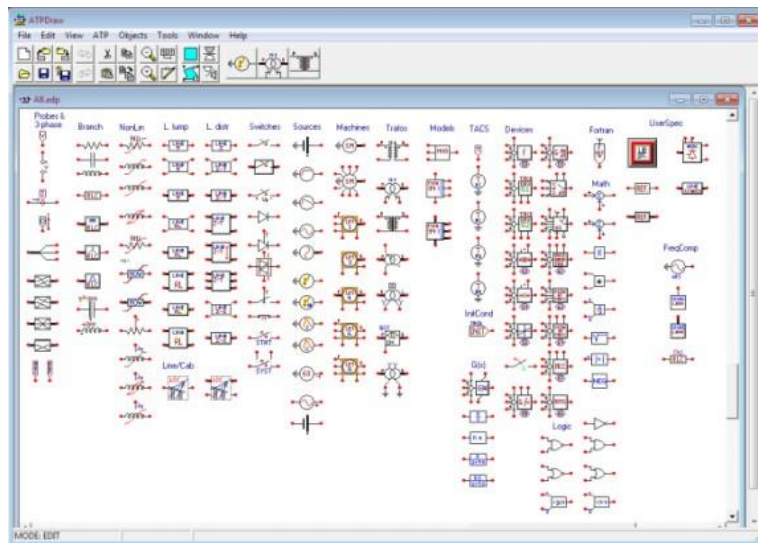
Pemodelan dan simulasi dari sistem transmisi dengan menara transmisi 150 kV, dilakukan dengan menggunakan aplikasi ATP (*Alternative Transients Program*) Draw 5.6 pada komputer[21]. ATP merupakan salah satu program yang digunakan secara luas untuk simulasi digital dari fenomena transien elektromagnetik, sebagaimana kejadian elektromagnetik sesungguhnya pada sistem tenaga. Pada Aplikasi ATP Draw 5.6 pengguna dapat merangkai dan menganalisa rangkaian elektronik dengan menggunakan komponen-komponen yang disediakan oleh aplikasi ini. Beberapa jenis penelitian yang dapat dilaksanakan menggunakan aplikasi ini adalah :

1. Simulasi tegangan lebih akibat sambaran petir (surja petir) serta mekanisme *switching* yang ada pada peralatan.
2. Estimasi nilai kualitas daya
3. Aplikasi (*Power Electronic*) elektronika daya
4. Kinerja peralatan FACTS, SVC (*Static VAR Compensator*) STATCOM (*Static Synchronous Compensator*), dan UPFC (*Unfield Power Flow Controller*)
5. Analisis nilai resonansi dan harmonisa.
6. Pengujian peralatan proteksi atau pengamanan, dan lain-lain

Tampilan lembar kerja halaman depan pada aplikasi ATP Draw 5.6 dapat dilihat pada Gambar 2.24[21]. Untuk membuka atau merancang rangkaian baru, maka tampilan awal dapat diakses dengan cara pilih menu *file* dan klik *New*.



Gambar 2.24 Tampilan Awal Model Rangkaian Baru Pada ATP Draw
 Seluruh komponen – komponen yang tersedia dalam aplikasi ATP Draw 5.6 dapat diakses dengan cara klik kanan pada mouse dan pilih komponen-komponen yang dibutuhkan, seluruh gambar komponen yang tersedia dalam aplikasi ATP Draw 5.6 dapat dilihat pada Gambar 2.25[21].



Gambar 2.25 Komponen – Komponen Pada ATP Draw

2.2 Kajian Penelitian yang Relevan

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan oleh Fri Murdiya dkk[2] pada tahun 2019 tentang pengaruh karakteristik impuls petir dan arester saluran terhadap kinerja proteksi sambaran petir pada saluran udara 150 kV dengan menggunakan *software* ATP-EMTP. Penelitian dilakukan di pulau Sumatera pada tahun 2011 sampai dengan tahun 2014, penelitian ini bertujuan untuk melihat bagaimana pengaruh dari waktu muka (t_f) dan Waktu ekor (t_t) terhadap performa saluran ketika terjadi sambaran petir, selain itu juga dilihat bagaimana pengaruh pemasangan arrester pada tiap menara ketika sambaran petir terjadi.

Penelitian juga telah dilakukan oleh Violeta[1] pada tahun 2000, yaitu Simulasi tegangan lebih (impuls petir) dengan menggunakan *Software* ATP dan PSCAD, pada penelitian ini dilakukan pemodelan dan simulasi sistem transmisi 220 kV , 100 MVA, sistem dimodelkan kedalam kedua aplikasi tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah melihat perbandingan kemampuan kedua aplikasi tersebut, dalam melakukan simulasi jaringan listrik ketika terjadi tegangan lebih akibat sambaran petir.

Aziz Ulah Khan[3] pada tahun 2020 melakukan penelitian yang berjudul *modeling and simulation of a metal oxide lightning surge arrester for 132 kV overhead transmission lines*. Penelitian ini dilakukan pada saluran udara tegangan 132 kV, tujuan dari penelitian ini adalah melihat bagaimana kinerja arrester yang dipasang pada saluran transmisi tegangan tinggi untuk mengamankan gardu serta peralatan lain.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Langkah – langkah dalam menyelesaikan penelitian ini adalah :

1. Studi Literatur

Penelitian dimulai dengan mengkaji beberapa teori yang berhubungan langsung dalam proses penyelesaian penelitian, serta mengkaji teori-teori yang mendukung dalam rangka penyelesaian penelitian. Adapun teori – teori tersebut diperoleh melalui sumber bacaan seperti buku cetak, jurnal ilmiah, dan *e-book*.

2. Pengumpulan Data

Langkah selanjutnya dalam penelitian ini adalah mengumpulkan data untuk membantu menyelesaikan penelitian, adapun data diperoleh langsung dari objek tempat penelitian dilakukan dengan cara menanyakan langsung kepada pegawai Gardu Induk Binjai 150 kV dan berdiskusi dengan pembimbing, data-data yang dikumpulkan adalah : menara transmisi, penghantar dan kawat tanah, isolator, arrester, dan transformator daya.

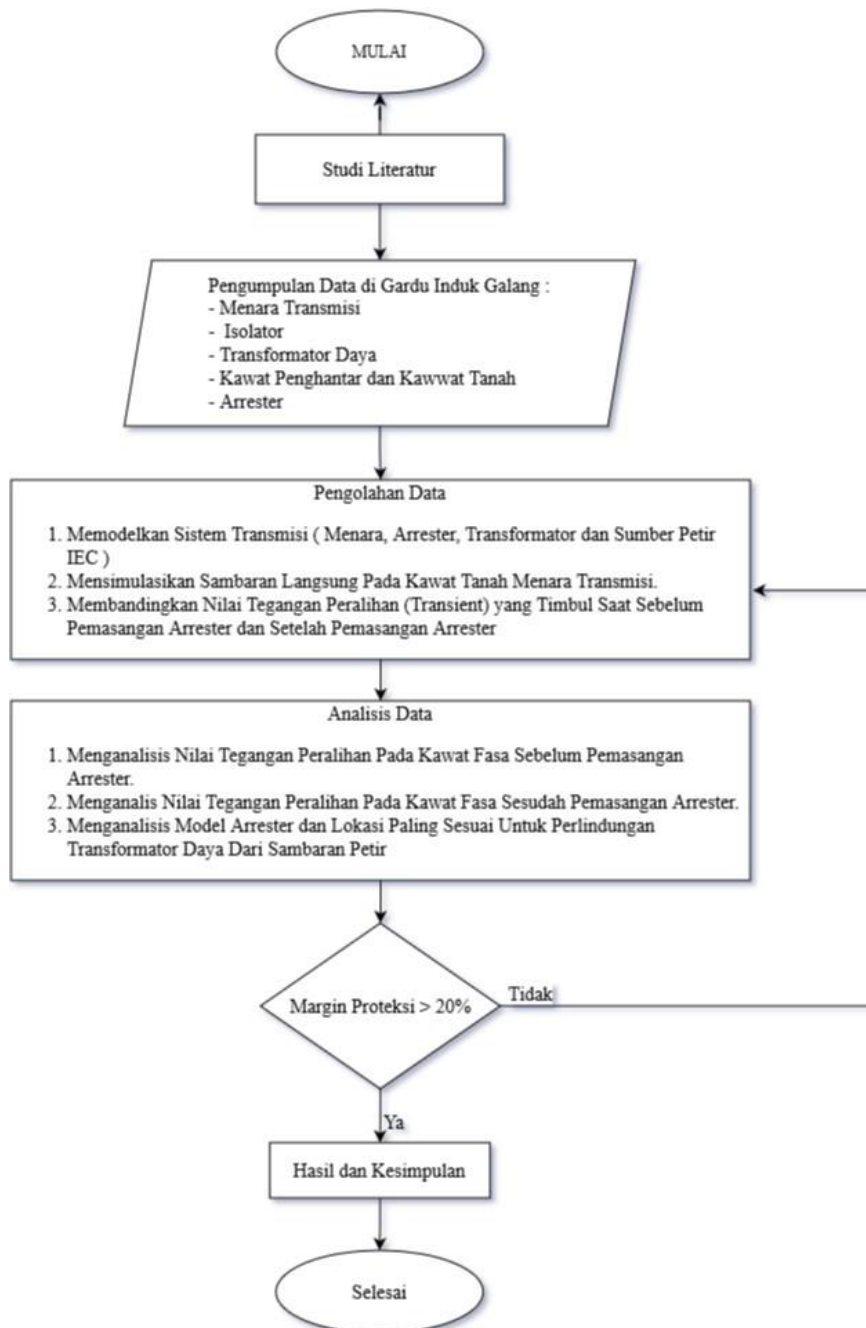
3. Analisis Data

Data -data yang sudah di kumpulkan, selanjutnya akan dimodelkan serta disimulasikan kedalam aplikasi ATP Draw 5.6. Pemodelan dan Simulasi diperlukan untuk memperoleh nilai puncak tegangan puncak pada tiap fasa dan gelombang tegangan yang dihasilkan, ketika dalam kondisi sebelum dan sesudah pemasangan Arrester.

4. Hasil dan Kesimpulan

Setelah semua prosedur penelitian dilakukan, maka hasil yang diperoleh akan dibahas, sehingga dapat ditarik kesimpulan dan menjadi akhir dari penelitian ini.

Gambar dari diagram alir pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

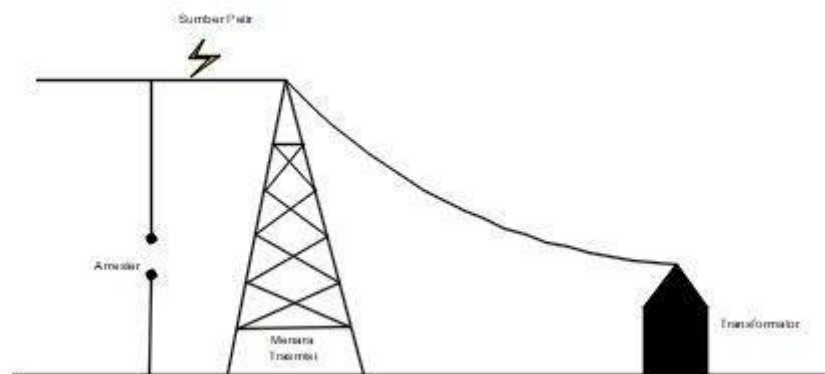
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun penelitian ini dilaksanakan pada : Bulan Juli sampai dengan September 2021 dan lokasi penelitian adalah Gardu Induk Binjai 150 kV, yang berlokasi di Jl. Jati Karya, Kec. Binjai Utara, Kota Binjai, Sumatera Utara.

3.3 Populasi dan Sampel

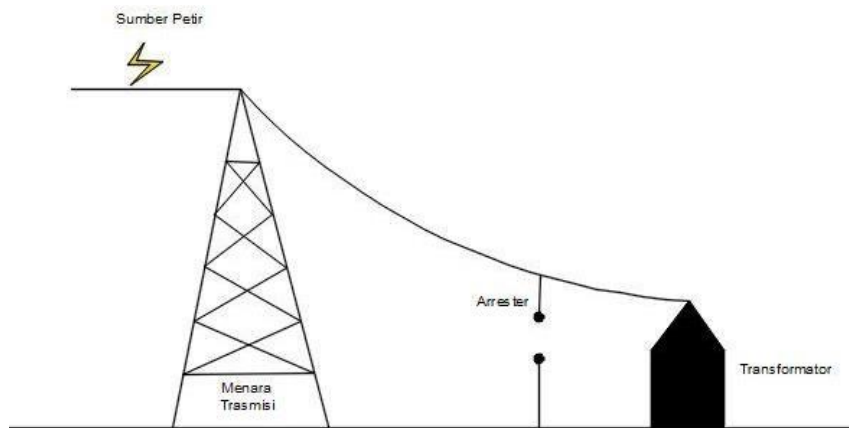
Adapun populasi dari penelitian ini adalah keseluruhan sistem transmisi tenaga listrik yang ada di Gardu Induk Binjai 150 kV, meliputi menara transmisi, penghantar fasa dan kawat tanah menara transmisi, isolator menara, transformator daya, arrester dimana seluruh komponen ini akan dimodelkan dan disimulasikan menggunakan aplikasi ATP/EMTP 5.6.

Sampel dalam penelitian ini adalah lokasi pemasangan arrester, pada penelitian ini arrester akan diletakkan pada sebelum menara terakhir dan sesudah menara terakhir dekat dengan transformator daya. Lokasi pemasangan arrester sebelum menara transmisi terakhir dapat dilihat pada gambar Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Letak Pemasangan Arrester Sebelum Menara Terakhir

Lokasi pemasangan arrester yang kedua adalah setelah menara terakhir dan dekat dengan transformator daya, hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Pemasangan Arrester Setelah Menara Transmisi Dekat Dengan Transformator Daya

3.4 Teknik Pengumpulan Data

Pada penelitian ini data didapatkan dengan dua metode yaitu studi literatur dan observasi. Kedua metode ini sangat penting dalam menunjang penyelesaian penelitian ini. Metode observasi dilakukan dengan menganati langsung dan memperoleh sumber data. Sumber data yang peneliti peroleh dari metode observasi adalah data karakteristik petir, sedangkan data yang peneliti peroleh dari metode studi literatur adalah data menara transmisi, data pengahatar menara dan kawat tanah menara, data arrester , dan data isolator.

3.5 Definisi Operasional Variabel

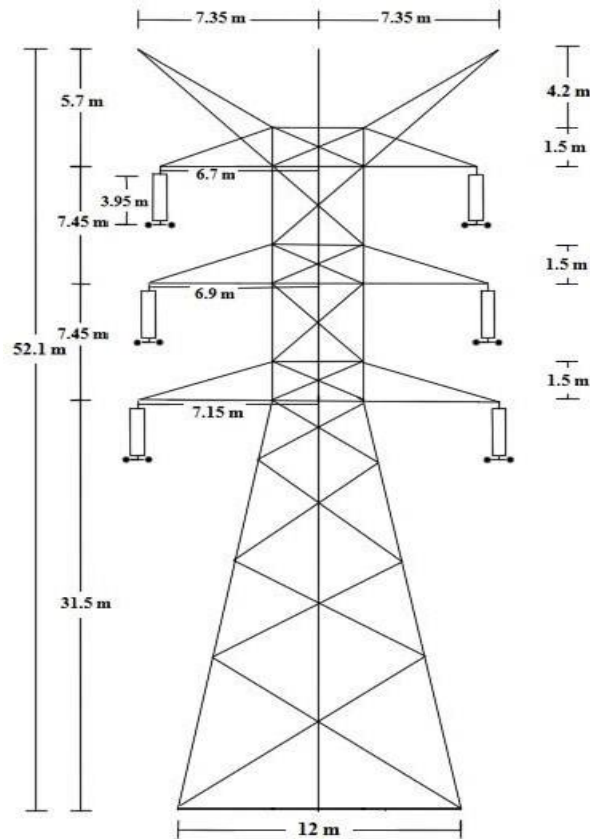
Beberapa hal yang diamati pada penelitian ini adalah :

1. Tegangan peralihan (*transient*) yang timbul pada tiap fasa akibat dari sambaran petir ke kawat tanah menara transmisi.
2. Letak pemasangan arrester yang paling sesuai untuk pengamanan transformator daya akibat sambaran petir.

Adapun data-data yang diperlukan untuk dapat memodelkan dan mensimulasikan sistem kedalam aplikasi adalah sebagai berikut :

1. Data Menara Transmisi

Data menara transmisi yang dipakai pada penelitian ini adalah menara sirkit ganda dan data diambil dari menara yang ada di Gardu induk Binjai, seperti diperlihatkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Menara Transmisi

2. Data Penghantar dan Kawat Tanah

Data penghantar dan kawat tanah menara transmisi yang digunakan pada penelitian ini diambil dari Gardu induk Binjai 150 kV, seperti diperlihatkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Penghantar dan Kawat Tanah

	Jenis Konduktor	Diameter (cm)	Resistansi (Ω/km)
Penghantar	ASCR	28.89	0.0642
Kawat Tanah	Galvanized Steel	1.22	0.364

3. Data Isolator

Data Isolator menara transmisi yang digunakan pada penelitian ini diambil dari data isolator pada Gardu induk Binjai 150 kV, seperti diperlihatkan pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Data Isolator

Tipe	Jumlah Keping	Panjang (m)
Gantung	11	1.606

4. Data Arrester

Data Arrester yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari data arrester menara 150 kV yang ada pada gardu induk Binjai dan dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Data Arrester

Tegangan maksimum system	Tegangan nominal	Panjang	Tegangan operasi	Koefisien pentanahan
170 kV	150 kV	1.61 m	106 kV	0.8

Pada penelitian ini arrester akan dimodelkan dalam 2 pemodelan yaitu Pemodelan IEEE dan Karbalaye, untuk memodelkan arrester kedalam aplikasi dibutuhkan nilai resistansi, induktansi dan kapasitansi. Perhitungan nilai Arrester dengan model IEEE dapat dilihat dibawah ini.

$$L1 = 15 \frac{d}{n}$$

$$L1 = 15 \frac{1,6}{1}$$

$$L1 = 104 \mu H$$

$$L0 = 0,2 \frac{d}{n}$$

$$L1 = 0,2 \frac{1,6}{1}$$

$$L1 = 0,32 \mu H$$

$$R1 = 65 \frac{d}{n}$$

$$R1 = 65 \frac{1,6}{1}$$

$$R1 = 104 \Omega$$

$$R0 = 100 \frac{d}{n}$$

$$R1 = 100 \frac{1,6}{1}$$

$$R1 = 160 \Omega$$

$$C = 100 \frac{n}{d}$$

$$C = 65 \frac{1}{1,6}$$

$$C = 62,5 \Omega$$

Sedangkan perhitungan untuk arrester yang dimodelkan dengan pemodelan Karbalaye dapat dilihat dibawan ini.

$$V_{ss} = \text{Tegangan Residu } 500 \text{ A, Ketika Gelombang } 30/60 \mu s$$

$$V_{ss} = 305 \text{ kV}$$

$$V(r_{8/20}) = \text{Tegangan Residu } 10 \text{ KA, Ketika Gelombang } 8/20 \mu s$$

$$V(r_{8/20}) = 379 \text{ KV}$$

$$V_n = 150 \text{ KV}$$

$$R = 1 \text{ M}\Omega$$

$$L1 = \frac{1}{5} \left(\frac{V(r_{8/20}) - V_{ss}}{V(r_{8/20})} \right) V_n$$

$$L1 = \frac{1}{5} \left(\frac{379 - 305}{379} \right) 150$$

$$L1 = 5,91 \mu H$$

$$C = \frac{1}{55} \left(\frac{V(r_{8/20}) - V_{ss}}{V(r_{8/20})} \right) V_n$$

$$C = \frac{1}{55} \left(\frac{379 - 305}{379} \right) 150$$

$$C = 0,54 \mu F$$

5. Data Transformator Daya

Data Tranformator Daya yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Transformator Daya

Daya Nominal	60 MVA
Frekuensi	50 Hz
Tegangan Sisi Primer	150 KV
Tegangan Sisi Sekunder	20 KV
Kapasitansi Hubung Singkat 150 KV	40
Impedansi Hubung Singkat 20 KV	25
Short Circuit Impedansi	12,69 %
Tingkat Isolasi Dasar	650 kV

6. Data Sambaran Petir

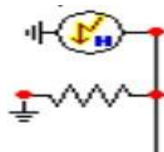
Pada penelitian ini digunakan nilai injeksi arus petir dengan standar IEC 62305, dengan waktu muka (tf) 1,2 μ s dan waktu ekot (tt) 50 μ s dan kenaikan arus injeksi secara bertahap dari 20 kA sampai dengan 100 kA, dengan kenaikan 20 kA.

3.6 Pemodelan Dalam Analisis Data

Untuk melaksanakan penelitian, seluruh data yang sudah diperoleh akan dimodelkan kedalam aplikasi ATP Draw v 5.6 dan selanjutnya akan disimulasikan. Pemodelan kedalam aplikasi membutuhkan rangkaian pengganti (ekivalen), hal ini diperlukan agar aplikasi dapat berjalan dengan baik.

3.6.1 Pemodelan Sumber Sambaran Petir

Untuk memodelkan sumber sambaran petir pada aplikasi ATP Draw 5.6 digunakan komponen *Heilder* dan dihubungkan dengan sebuah resistor, Sumber petir yang digunakan pada penelitian ini adalah IEC, dengan besaran 20 kA sampai dengan 100 kA. Sumber Petir didalam aplikasi dimodelkan seperti Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Sumber Petir dalam ATP

3.6.2 Pemodelan Sumber Tiga Fasa

Tegangan Transformator pada Gardu Induk adalah 150 kV_{L-L(rms)}, sedangkan pada aplikasi ATP Draw 5.6 digunakan tegangan puncak, sehingga diperlukan perhitungan untuk mendapatkan tegangan puncak. Besarnya tegangan puncak ditentukan melalui persamaan berikut.

$$V_{puncak} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V_{L-L(rms)}$$

$$V_{puncak} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 150.000$$

$$V_{puncak} = 122.474,87 \text{ Volt}$$

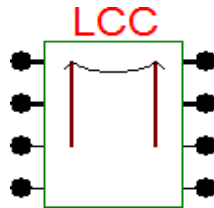
Pemodelan sumber tiga fasa dalam aplikasi ATP Draw dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Sumber Tiga Fasa dalam ATP

3.6.3 Pemodelan Saluran Transmisi

Pada program *ATP Draw* 5.6 pemodelan saluran transmisi, disediakan komponen dengan nama LCC (*Line Constant, Cable Constant*) seperti pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Pemodelan Saluran Transmisi

3.6.4 Pemodelan Mendara dan Lengan Menara

Untuk memodelkan menara dan lengan menara, dalam aplikasi *ATP Draw* digunakan komponen *LINEZT*, seperti pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Pemodelan Menara dan Lengan Menara

3.6.5 Pemodelan Isolator

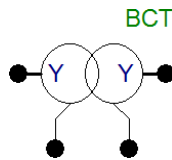
Pada aplikasi *ATP Draw* 5.6 Isolator dimodelkan dengan Sakelar dan kapasitor yang dirangkai secara paralel, rangkaian ekuivalen isolator dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Rangkaian Isolator

3.6.6 Pemodelan Transformator Daya

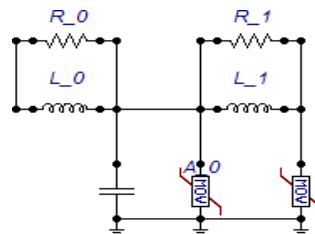
Aplikasi ATP Draw 5.6 menyediakan komponen *BCT* untuk memodelkan transformator daya, gambar dari pemodelan transformator daya yang digunakan pada aplikasi ini dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Transformator Daya

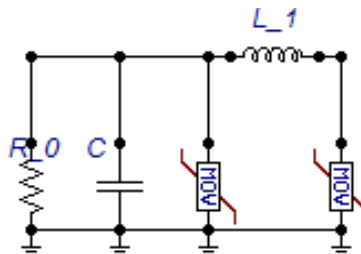
3.6.7 Pemodelan Arrester

Arrester yang digunakan dalam penelitian ini dimodelkan dalam dua jenis yaitu arrester dengan pemodelan IEEE & arrester dengan pemodelan Karbalaye. Gambar dari arrester dengan model IEEE dalam aplikasi ATP Draw dapat dilihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Arrester dengan Model IEEE

Sedangkan untuk arrester yang dimodelkan dengan pemodelan Karbalaye dalam aplikasi ATP Draw dapat dilihat pada Gambar 3.12.



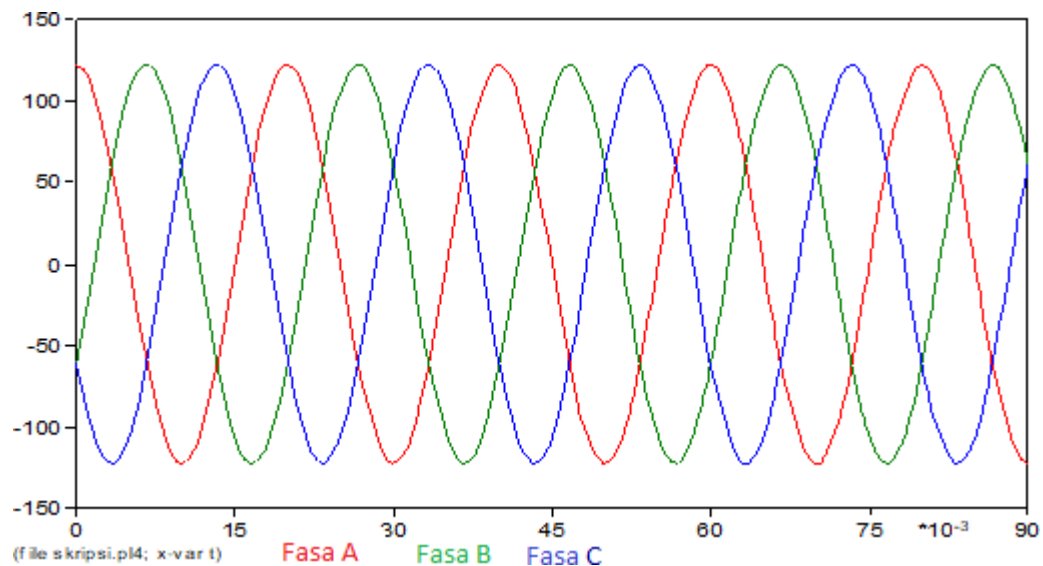
Gambar 3.12 Arrester dengan Model Karbalaye

BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Gelombang Sistem Dalam Keadaan Normal

Pada penelitian ini digunakan tegangan line to line 150 kV, sehingga harus didapatkan tegangan puncak sistem terlebih dahulu. Besarnya nilai tegangan puncak adalah 122.474,87 Volt.

Berdasarkan perhitungan didapatkanlah nilai tegangan puncak fasa maksimum sebesar 122,474 kV. Bentuk gelombang tegangan sistem pada kondisi normal dapat dilihat pada Gambar 4.1.

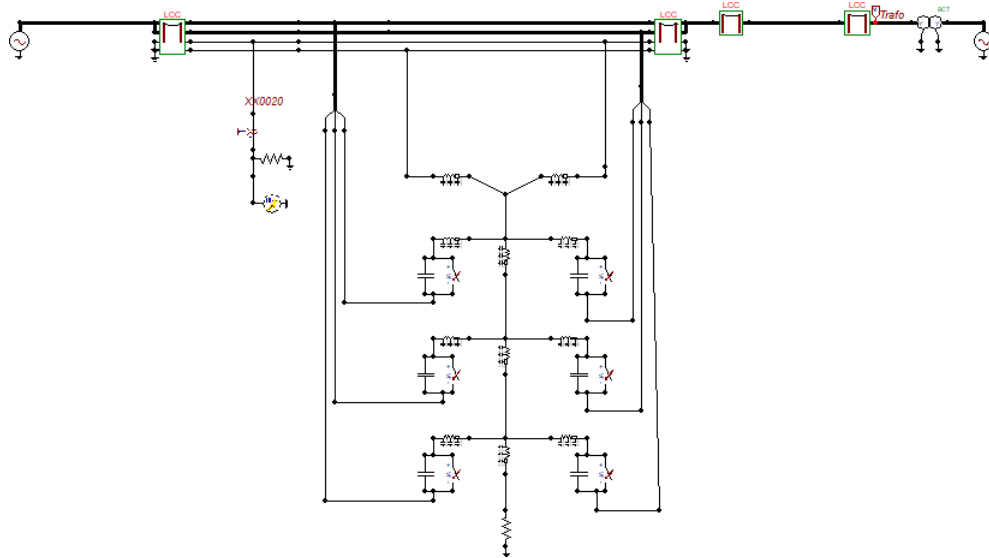


Gambar 4.1 Gelombang Sistem Dalam Keadaan Normal

4.2 Sambaran Petir ke Kawat Tanah Menara Transmisi Saat Belum adanya Arrester

Simulasi dilakukan dengan memodelkan sistem transmisi 150 kV Gardu induk Galang, menggunakan aplikasi ATP Draw 5.6. Arus petir sebesar 100 kA di injeksikan ke kawat tanah menara transmisi, dan gelombang yang dihasilkan diamati.

Rangkaian pemodelan dan simulasi sambaran petir ke kawat tanah menara transmisi pada saat belum adanya Arrester dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Rangkaian Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat tanah Menara Transmisi Saat belum Adanya Arrester

Tegangan yang dihasilkan pada Fasa A, Fasa B dan Fasa C adalah 3.649 kV, 2.836 kV, dan 3.473 kV. Bentuk Gelombang yang dihasilkan oleh sambaran arus petir pada kawat tanah menara dapat dilihat pada Gambar 4.3. Gambar ini menginformasikan bahwa tegangan fasa A adalah yang tertinggi hal ini dikarenakan pengaruh induksi dari kawat tanah. Kawat fasa A terletak pada bagian paling atas sehingga dekat dengan kawat tanah yang terkena sambaran petir. Sedangkan dua kawat fasa yang lain yaitu Fasa B dan Fasa C mempunyai nilai yang sama besar.

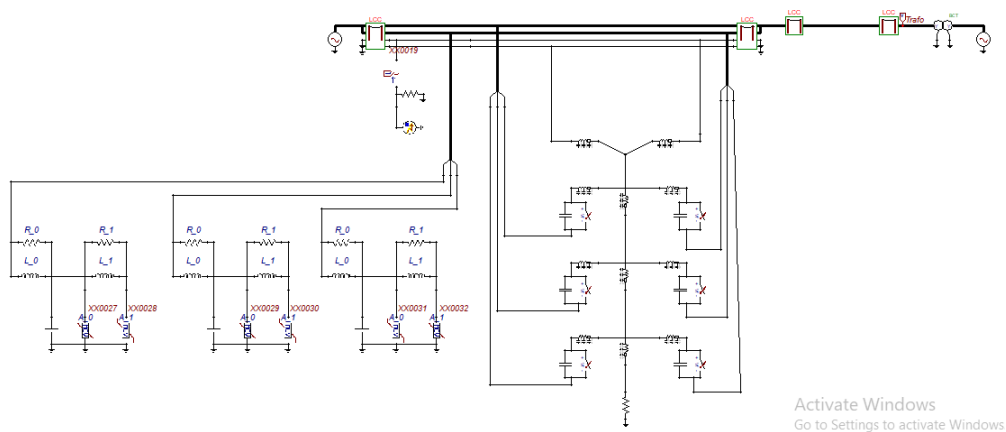
Gambar 4.3 Gelombang Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat tanah Menara Transmisi Saat belum Adanya Arrester

Saat belum adanya arrester pada sistem transmisi arus petir yang menyambar kawat tanah menara transmisi mengakibatkan nilai puncak tegangan (transient) yang besar, hal ini dikarenakan belum adanya sistem proteksi tegangan lebih yang mengamankan sistem dari gangguan sambaran petir yang terjadi.

4.3 Sambaran ke Kawat Tanah Menara Transmisi dalam Kondisi Arrester dipasang Sebelum Menara Terakhir (IEEE)

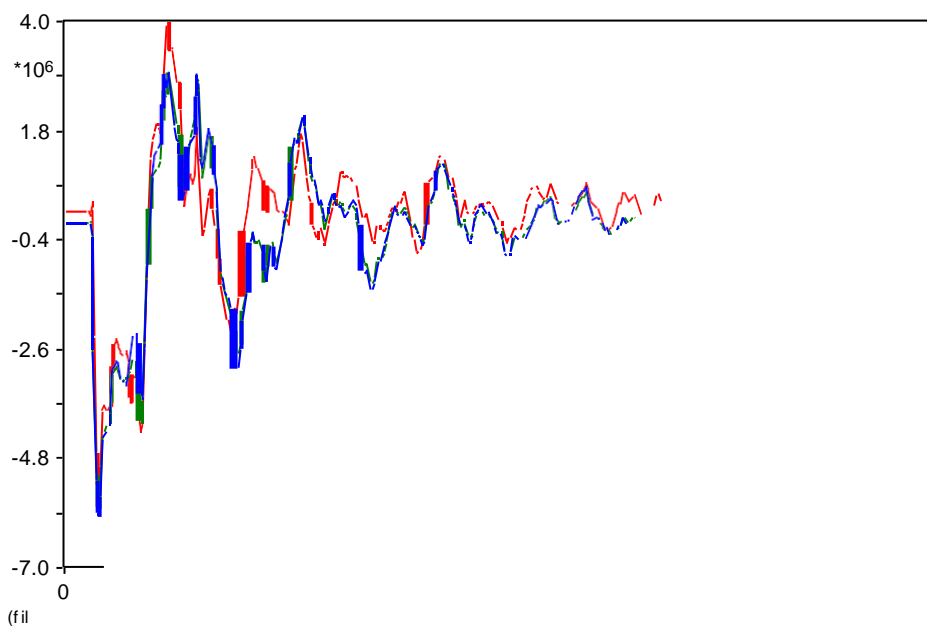
Simulasi dilakukan dengan memodelkan sistem transmisi 150 kV Gardu Induk Galang kedalam Aplikasi ATP Draw 5.6, kemudian maksimum model IEC 100 kA di injeksikan ke kawat tanah menara transmisi. Arrester dimodelkan dengan pemodelan **IEEE** dan dipasang dilokasi sebelum menara terakhir.

Rangkaian simulasi ketika Sambaran petir ke kawat tanah menara transmisi dan arrester dalam kondisi sudah terpasang diposisi sebelum menara dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Rangkaian Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat Tanah Menara Transmisi Saat Arrester dipasang sebelum Menara Terakhir (IEEE)

Tegangan yang dihasilkan pada Fasa A, Fasa B dan Fasa C berturut-berturut 4.087 kV, 3.074 kV, dan 3.188 kV. Gelombang yang dihasilkan oleh sambaran arus petir ke kawat tanah/menara transmisi dan arrester dimodelkan dengan pemodelan IEEE dipasang pada posisi sebelum menara dapat dilihat pada Gambar 4.5.

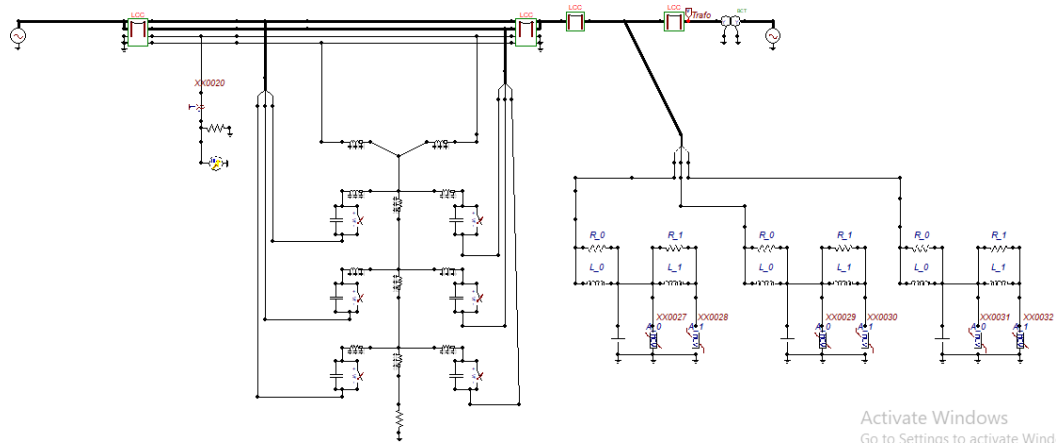


Gambar 4.5 Gelombang Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat Tanah Menara Transmisi Saat Arrester model IEEE dipasang sebelum Menara dekat ke Gardu

Ketika arrester dipasang sebelum menara terakhir dan dekat ke Gardu, tegangan yang timbul pada tiap – tiap fasa relatif besar dan berpotensi mengancam sistem transmisi. Hal ini berarti posisi pemasangan arrester pada lokasi sebelum menara terakhir belum dapat mengurangi gelombang tegangan yang terjadi. Tegangan fasa A sedikit lebih tinggi dari pada yang lainnya, karena Fasa A berada tepat dibawah kawat tanah. Ke tiga gelombang tegangan memberikan bentuk gelombang yang hampir sama.

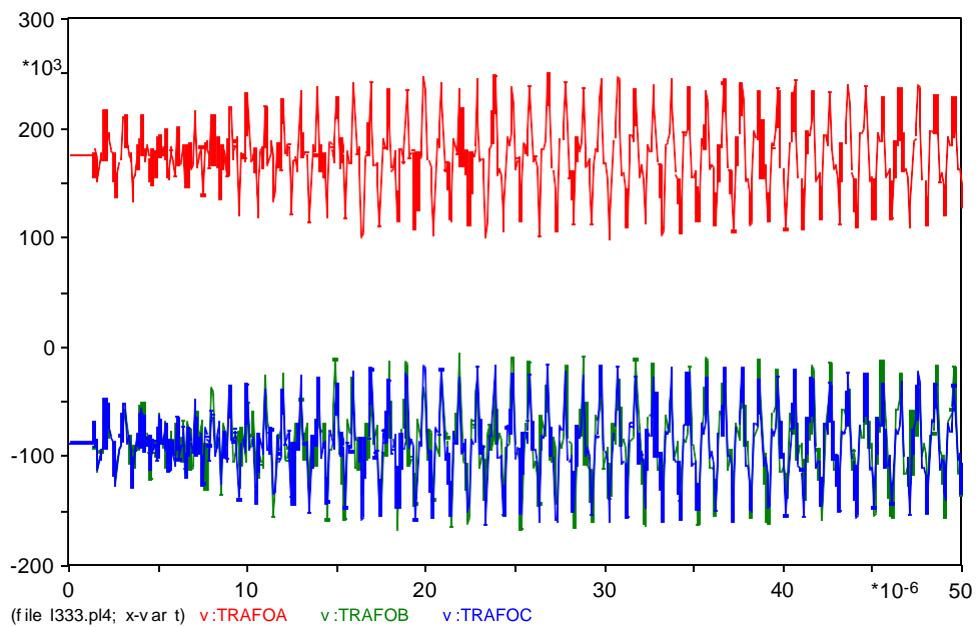
4.4 Sambaran Pada Kawat Tanah Menara Transmisi Ketika Arrester dipasang Setelah Menara Transmisi dan Dekat Dengan Transformator Daya Pemodelan IEEE.

Simulasi dilakukan dengan memodelkan sistem transmisi 150 kV, Gardu Induk Galang kedalam Aplikasi ATP Draw 5.6, kemudian sistem diberikan injeksi arus petir model IEC dengan magnitudo arus 100 kA ke kawat tanah Menara transmisi, Arrester dimodelkan dengan pemodelan IEEE dan dipasang dilokasi setelah menara terakhir dan dekat dengan transformator daya, gelombang yang timbul dari hasil simulasi akan diamati. Rangkaian Simulasi Sambaran petir pada kawat tanah menara transmisi dan Arrester dipasang pada lokasi setelah menara terakhir dan dekat dengan transformator daya dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Rangkaian Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat Tanah Menara Transmisi Saat Arrester Dipasang Diposisi Setelah Menara Terakhir Dan Dekat Dengan Transformator Daya

Tegangan yang dihasilkan pada Fasa A, Fasa B dan Fasa C adalah 216,375 kV, 175,265 kV, dan 175,007 kV. Gelombang yang dihasilkan akibat sambaran arus petir pada kawat tanah menara transmisi dengan kondisi Arrester dipasang antara menara dengan transformator daya dapat dilihat pada Gambar 4.7.



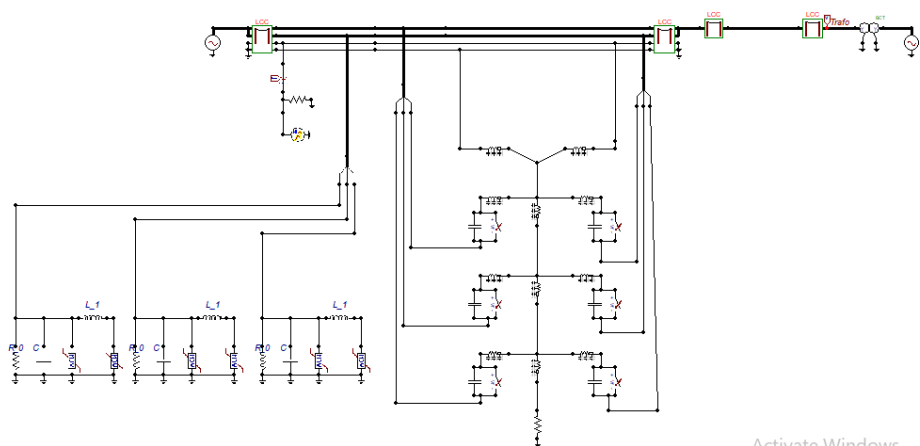
Gambar 4.7 Gelombang Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat Tanah Menara Transmisi Saat Arrester Dipasang Diposisi Setelah Menara Terakhir Dan Dekat Dengan Transformator Daya

Terlihat tegangan yang timbul pada tiap fasa menjadi lebih kecil, hal ini disebabkan karena sudah terpasangnya sistem proteksi arrester, sehingga arus sambaran petir dapat dialirkan ke tanah, dan tidak banyak berpengaruh pada sistem transmisi. Magnituda tegangan pada fasa A adalah yang tertinggi sedangkan dua fasa yang lain magnitudenya sama. Perbedaan tegangan antara fasa A dan fasa (B dan C) adalah signifikan dan mempunyai nilai sekitar sekitar 90 MV.

4.5 Sambaran ke Kawat Tanah Menara Transmisi ketika Arrester dipasang Sebelum Menara Terakhir (Pemodelan Karbalaye)

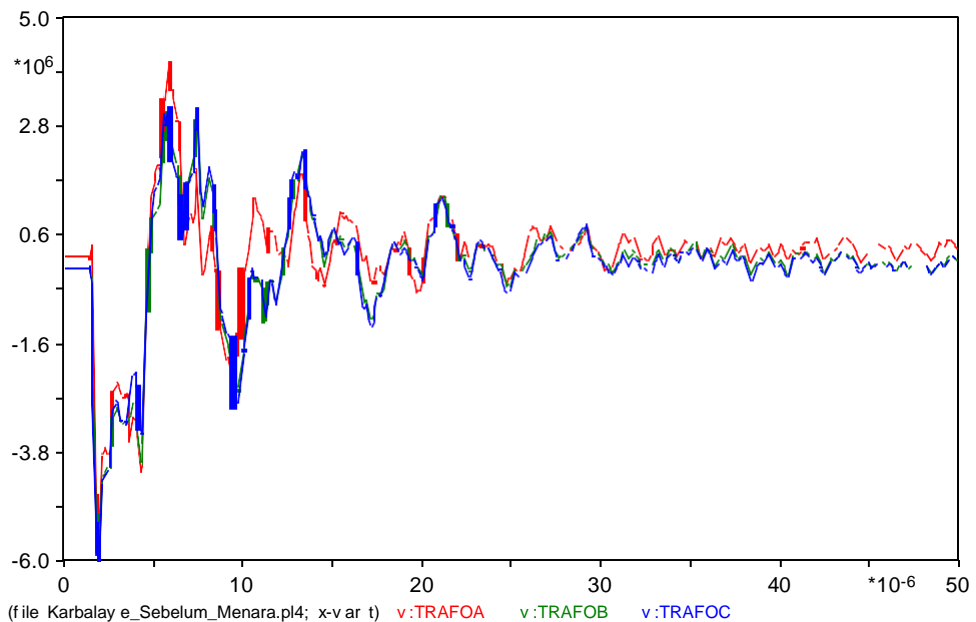
Simulasi dilakukan dengan memodelkan sistem transmisi 150 kV, Gardu Induk Galang kedalam Aplikasi ATP Draw 5.6, kemudian sistem diinjeksikan arus petir IEC sebesar 100 kA ke kawat tanah, Arrester dimodelkan dengan pemodelan **Karbalaye** dan dipasang dilokasi sebelum menara terakhir, gelombang yang timbul dari hasil simulasi akan diamati.

Rangkaian Simulasi ketika Sambaran petir ke kawat tanah menara transmisi dan arrester dimodelkan dengan pemodelan Karbalaye serta dipasang dilokasi sebelum menara terakhir dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Rangkaian Simulasi Sambaran Petir ke Kawat Tanah Menara Transmisi Saat arrester terpasang sebelum menara terakhir

Tegangan yang dihasilkan pada Fasa A, Fasa B dan Fasa C adalah 4.087 kV, 3.074 kV, dan 3.188 kV, dan Gelombang yang dihasilkan oleh sambaran arus petir pada kawat tanah Menara transmisi, dalam kondisi arrester di modelkan dengan pemodelan Karbalaye dan dipasang pada posisi sebelum Menara terakhir dapat dilihat pada Gambar 4.9.

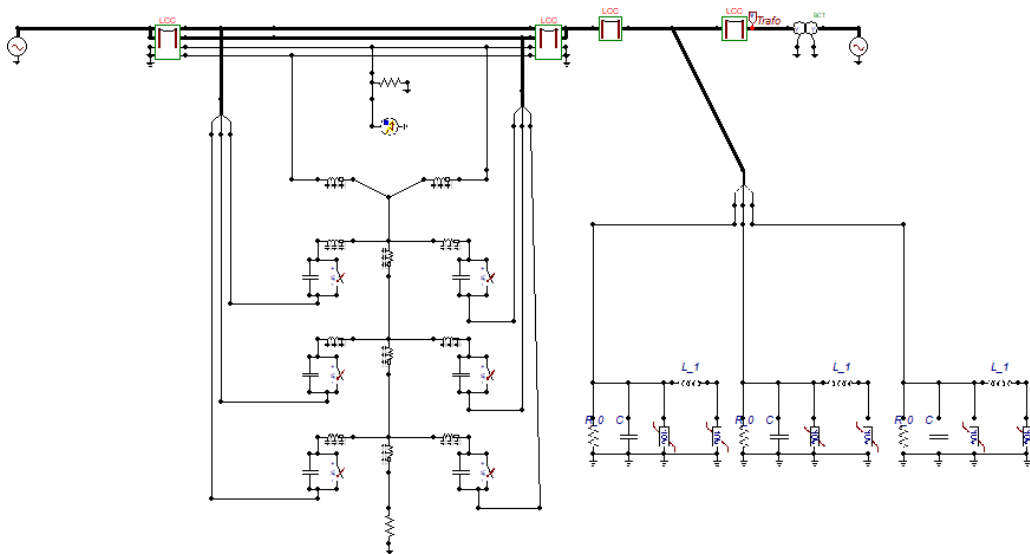


Gambar 4.9 Gelombang Simulasi Sambaran Petir ke Kawat Tanah Menara Transmisi Saat arrester terpasang sebelum menara terakhir

Sama pada saat pemodelan IEEE, dalam pemodelan Karbalaye ketika arrester dipasang sebelum menara terakhir, arus yang timbul pada tiap fasa masih cukup besar, hal ini menunjukkan bahwa pemasangan arrester dilokasi sebelum menara terakhir kurang efektif untuk melindungi sistem dari gangguan akibat sambaran petir.

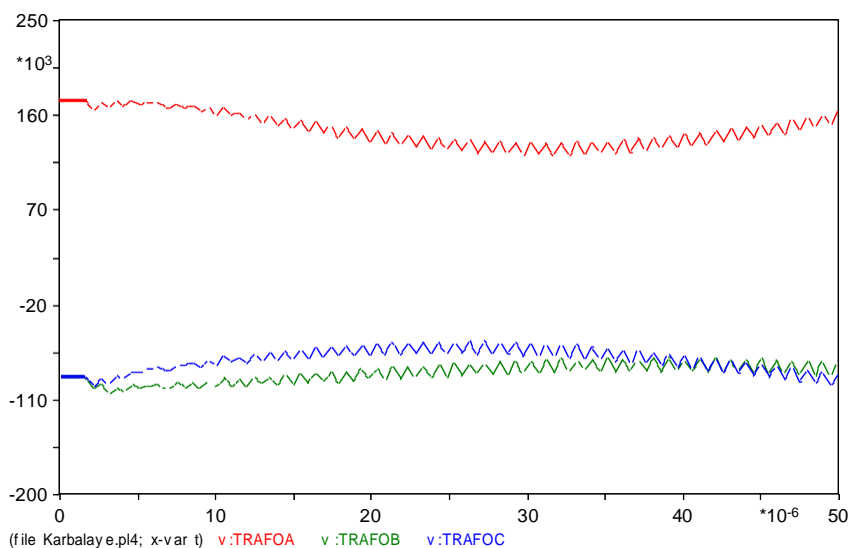
4.6 Sambaran Pada Kawat Tanah Menara Transmisi Ketika Arrester dipasang Setelah Menara Transmisi dan Dekat Dengan Transformator Daya.

Simulasi dilakukan dengan memodelkan sistem transmisi 150 kV Gardu Induk Galang kedalam Aplikasi ATP Draw 5.6, kemudian kawat tanah menara tranmisi diberikan injeksik arus petir IEC sebesar 100 kA, Arrester dimodelkan dengan pemodelan **Karbalaye** dan arrester dipasang dilokasi antara menara terakhir dengan transformator daya, gelombang yang timbul dari hasil simulasi akan diamati. Rangkaian Simulasi Sambaran petir pada kawat tanah menara transmisi dan Arrester dipasang pada lokasi setelah menara terakhir dan dekat dengan transformator daya dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Rangkaian Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat Tanah Menara Transmisi saat Arrester dipasng Setelah Menara Terakhir dan dekat dengan Transformator daya

Tegangan yang dihasilkan pada Fasa A, Fasa B dan Fasa C berturut -turut adalah 216,375 kV, 175,265 kV, dan 175,007 kV, dan Gelombang yang dihasilkan oleh sambaran arus petir ke kawat tanah menara transmisi dalam kondisi Arrester terpasang diantara Menara terakhir dan transformator daya dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Gelombang Simulasi Sambaran Petir Ke Kawat Tanah Menara Transmisi saat Arrester dipasang Setelah Menara Terakhir dan dekat dengan Transformator daya

Terlihat tegangan yang timbul pada terminal transformator menjadi berkurang dibandingkan ketika sistem belum terpasang arrester, hal ini disebabkan karena ketika arrester sudah terpasang kedalam sistem, tegangan lebih petir dialirkan langsung ke tanah melalui arrester, sehingga tidak terlalu mengganggu kinerja sistem.

4.7 Perbandingan Nilai Puncak Tegangan Pada Berbagai Cara Pemasangan Arrester.

Simulasi dilakukan dengan menginjeksikan arus petir secara bertahap dimulai dari 20 kA sampai dengan 100 kA, ke kawat tanah menara transmisi, dengan kenaikan 20 KA, simulasi dilakukan dalam beberapa kondisi yaitu saat tidak adanya arrester, arrester terletak diposisi sebelum Menara transmisi terakhir dan saat arrester terletak diposisi setelah Menara terakhir dan dekat dengan transformator daya, hasil tegangan yang timbul pada terminal tranformator daya akan dianalisa. Hasil dari simulasi ini dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Data Perbandingan Nilai Punvak Tegangan Arrester, Dengan Pemodelan IEEE dan Karbalaye Dalam Beberapa Kondisi

		Tidak Ada Arrester (kV)	Arrester dipasang Sebelum Menara (kV)		Arrester dipasang Setelah Menara	
			Karbalaye	IEEE	Karbalaye	IEEE
20	Fasa A	848	955	941	207	
	Fasa B	493	511	498		
	Fasa C	624	559	515		
40	Fasa A	1.548	1.736	1		
	Fasa B	1.079	1.151			
	Fasa C	1.336	1.201			
60	Fasa A	2.249	2.51			
	Fasa B	1.664				
	Fasa C	2.049				
80	Fasa A	2.				
	Fasa B					
	Fasa					
100						

Pada Tabel 4.1 diatas terlihat bahwa lokasi pemasangan Arrester yang paling sesuai untuk pengamanan peralatan dari gangguan tegangan lebih yang terjadi adalah dengan memasang arrester diposisi setelah menara terakhir dan dekat dengan transformator daya, agar arus petir yang mengalir disepanjang penghantar dapat segera dialirkan ke tanah.

4.8 Margin Proteksi

Langkah – langkah dalam menentukan faktror perlindungan:

1. Menentukan Tegangan Pengenal (U_C) Arrester

$$\text{Tegangan sistem maksimum} = 170 \text{ kV}$$

$$\text{Tegangan Pengenal } (U_C) = V_{\text{nominal}} \times \text{Koeff Tanah} \times 1,1$$

$$= 150 \times 0,8 \times 1,1 \text{ kV}$$

$$= 132 \text{ kV}$$

2. Tegangan Terminal (U_A) Arrester

Tegangan terminal arrester dapat dilihat pada Tabel 2.3, dan diketahui bahwa rating yang mendekati nilai perhitungan 135 kV adalah Arrester dengan rating 138 kV, dan tegangan kinerjanya adalah 460 kV.

3. Tingkat Perlindungan (TP) Arrester

$$\text{Tegangan Kerja (TP) Arrester} = U_A + 10\%$$

$$= 460 \text{ kV} + 46 \text{ kV}$$

$$= 506 \text{ kV}$$

4. Faktor Perlindungan (FP) $= \frac{BIL_{Peralatan} - TP_{Arrester}}{BIL_{Peralatan}} \times 100\%$

$$= \frac{(650 - 506) \text{ kV}}{650 \text{ kV}} \times 100\%$$

$$= 22,15 \% \text{ (dinyatakan aman)}$$

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini dilakukan dengan cara pemodelan dan simulasi sistem transmisi galang 150 kV dengan beberapa kondisi yaitu, saat sistem tidak terpasang Arrester, saat Arrester terpasang sebelum menara terakhir, dan saat Arrester terpasang setelah menara terakhir dan dekat dengan transformator daya. Adapun kesimpulan yang dapat diambil pada penelitian ini adalah :

1. Sebelum adanya pemasangan arrester tegangan maksimum pada terminal transformator ketika nilai injeksi 100 kA, pada masing – masing fasa adalah Fasa A, Fasa B dan Fasa C berturut-turut sebesar 3.649 kV, 2.836 KV, dan 3.473 kV
2. Setelah adanya pemasangan Arrester baik ketika pemodelan IEEE maupun Karbalaye terjadi penurunan puncak tegangan pada masing-masing fasa.
3. Pemodelan Arrester IEEE dan Karbalaye memberikan perlindungan dengan tegangan puncak yang tidak jauh berbeda.
4. Model Pemasangan Arrester yang paling tepat dipasang untuk perlindungan sistem dari sambaran Petir adalah setelah Menara terakhir dan dekat dengan transformator daya.

5.2 Saran

Penelitian dapat dikembangkan dan ditingkatkan lagi oleh peneliti lain, karena bidang kajian masih cukup luas. Untuk itu peneliti memberi saran untuk penelitian berikutnya :

1. Sebaiknya menggunakan jenis menara yang lebih beragam lagi, agar dapat melihat perbedaan karakteristik sambaran petir pada tiap menara.
2. Sebaiknya jenis arus injeksi di variasikan lagi ada dapt melihat karakteristik arus petir pada tiap jenis arus.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Chris, C. Bala, and M.-D. Cragiun, “SIMULATION OF LIGHTNING OVERVOLTAGES WITH ATP-EMTP AND PSCAD/EMTDC,” *ACTA Univ. APULENSIS*, pp. 453–460, 2000.
- [2] F. Murdiya, C. Stevany, and H. A. Sano, “Journal of Mechatronics , Electrical Power , The effect of lightning impulse characteristics and line arrester to the lightning protection performance on 150 kV overhead lines : ATP-EMTP computational approach,” vol. 10, pp. 49–59, 2019.
- [3] A. U. Khan and E. S. Peshawar, “Modeling and Simulation of a Metal Oxide Lightning Surge Arrester for 132kV Overhead Transmission Lines,” vol. 22, no. 4, pp. 389–394, 2020.
- [4] Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, *PEDOMAN PENYUSUNAN PROPOSAL DAN TESIS PASCASARJANA UMSU*. 2019.
- [5] A. S and M. A. Artono, *Teknik Tenaga Listrik Jilid 2*. Jakarta: PT Pradnya Paramitha, 2004.
- [6] *Dasar - dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*, Edisi Kedu. Jakarta: Erlangga.
- [7] B. L. Tobing, *Dasar- Dasar Pengujian Tegangan Tinggi*, Edisi Kedu. Jakarta: Erlangga, 2012.
- [8] A. S, *Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta: PT Pradya Paramitha, 1984.

- [9] A. S, *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid II Saluran Transmisi*. Jakarta: PT Pradya Paramitha, 2004.
- [10] T. Hara and O. Yamamoto, "Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 143, no. 3, pp. 283–289, 1996, doi: 10.1049/ip-gtd:19960289.
- [11] T. . Hutauruk, *Transmisi Daya Listrik*. Jakarta: Erlangga, 1985.
- [12] A. Bachtiar and R. Irwanto, "Studi Analisa Probabilitas Perlindungan Kawat Tanah Terhadap Gangguan Kilat Pada Kawat Fasa Berdasarkan Tipe Tower Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV," *J. Tek. Elektro ITP*, vol. 6, no. 2, pp. 189–198, 2017, doi: 10.21063/jte.2017.3133625.
- [13] P. P. (Persero)., *Buku Pedoman Pemeliharaan Lightning Arrester*. Jakarta, 2014.
- [14] T. . Hutauruk, *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*. Jakarta: Erlangga, 1988.
- [15] B. Alba, "OB3-05 BEHAVIOR OF METAL OXIDE SURGE ARRESTER FOR FAST," no. August 2013, 2015.
- [16] M. Giannettoni, "A simplified model for," vol. 14, no. 2, pp. 393–398, 1999.
- [17] V. Sít'ar and J. Veleba, "Modelling of Metal Oxide Surge Arresters in Simulation Software DYNAST," *Trans. Electr. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 21–27, 2020, doi: 10.14311/tee.2017.1.021.

- [18] B. A. R *et al.*, “Analisa Koordinasi Isolasi Peralatan di Gardu Induk Teling 70 kV,” *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 7, no. 2, p. 10, 2018.
- [19] Universitas Mercubuana, *Lighting Arrester*. Universitas Mercubuana, 2005.
- [20] M. Tasbir, “ANALISA PERALATAN LIGHTNING ARRESTER PADA GARDU INDUK BOLANGI 150 KV,” UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR, Makasar, 2020.
- [21] L. Prikler and H. K. Høidalen, “for Windows 9x / NT / 2000 / XP / Vista Users ’ Manual,” no. 1, 2009.