

**STUDI PENGARUH PENEMPATAN ARRESTER TERHADAP
EFEKTIVITAS PROTEKSI TRANSFORMATOR DISTRIBUSI
20 kV PADA GARDU TRANSFORMATOR TIANG**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

MUHAMMAD RUDIANTO
NIM. 0410632029-63

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2007

**STUDI PENGARUH PENEMPATAN ARRESTER TERHADAP
EFEKTIVITAS PROTEKSI TRANSFORMATOR DISTRIBUSI
20 kV PADA GARDU TRANSFORMATOR TIANG**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

MUHAMMAD RUDIANTO
NIM. 0410632029-63

DOSEN PEMBIMBING:

Drs.Ir. Moch. Dhofir, MT
NIP. 131 879 031

Ir. Mahfudz Shidiq, MT
NIP. 131 699 002

**STUDI PENGARUH PENEMPATAN ARRESTER TERHADAP
EFEKTIVITAS PROTEKSI TRANSFORMATOR DISTRIBUSI
20 kV PADA GARDU TRANSFORMATOR TIANG**

Disusun oleh :
MUHAMMAD RUDIANTO
NIM. 0410632029-63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 12 Juli 2007

DOSEN PENGUJI

Dr. Ir. Harry Soekotjo D, M.Sc
NIP. 131 586 562

Ir. Sutrisno
NIP. 131 653 479

Ir. Hari Santoso, MS
NIP. 131 470 477

Ir. Teguh Utomo, MT
NIP. 131 960 444

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ir. Heru Nurwarsito, M.Kom
NIP. 131 879 033



*Teriring Ucapan Terima Kasih kepada:
Ayahanda dan Ibunda tercinta*

PENGANTAR

Puji syukur dipanjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga skripsi yang berjudul **“PENGARUH PENEMPATAN ARRESTER TERHADAP EFEKTIVITAS PROTEKSI TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 20 kV PADA GARDU TRANSFORMATOR TIANG”** dapat diselesaikan.

Skripsi ini dibuat untuk memenuhi salah satu persyaratan mendapatkan gelar Sarjana Teknik Elektro di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu hingga dapat diselesaikannya skripsi ini. Khususnya diucapkan kepada:

1. Bapak Ir. Heru Nurwarsito, M.kom. selaku ketua Jurusan Teknik Elektro dan Bapak Rudy Yuwono, ST, MSc. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
2. Bapak Ir. H. Choiri selaku KKDK Teknik Energi Elektrik Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Drs.Ir. Moch Dhofir, MT. dan Ir. Mahfudz Shidiq, MT. atas bimbingan, arahan dan motivasi yang diberikan guna terselesaikannya skripsi ini.
4. Seluruh dosen dan staf karyawan di lingkungan Fakultas Teknik, khususnya Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
5. Bapak Radar selaku pegawai PLN, atas segala masukan dan arahnya.
6. Seluruh teman-teman mahasiswa Jurusan Teknik Elektro khususnya dari paket A yang namanya tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan banyak masukan, saran dan kritik yang sangat berguna demi kesempurnaan skripsi ini.

Disadari sepenuhnya bahwa skripsi ini mungkin masih banyak kekurangan, untuk itu segala masukan, saran dan kritik yang berguna demi kesempurnaan skripsi ini sangat diharapkan.

Semoga skripsi ini bermanfaat bagi semua pihak di Universitas Brawijaya maupun pihak di luar Universitas Brawijaya demi kemajuan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi.

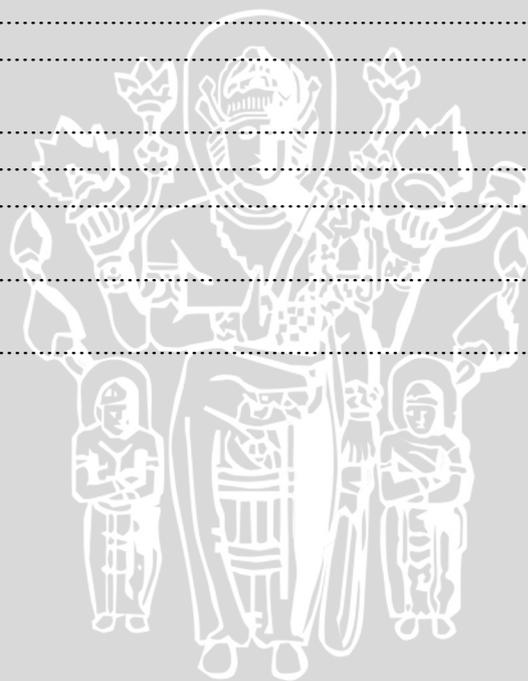
Malang, Juli 2007

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR GRAFIK	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN	ix
I. PENDAHULUAN	1
Latar Belakang	1
Rumusan Masalah	2
Batasan Masalah	2
Ruang Lingkup	2
Tujuan Penulisan	3
Sistematika Pembahasan	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
Surja Petir pada Transformator Distribusi	4
Sambaran petir langsung	4
Sambaran petir tidak langsung	5
Bentuk dan Spesifikasi Gelombang Surja	5
Gelombang Surja Petir	6
Kecepatan Rambat Gelombang Surja	7
Penyaluran dan Pemantulan Gelombang Surja	8
Hubungan atau sambungan dari dua saluran	8
Resistansi paralel yang dihubungkan pada titik sambungan	12
Metode Pantulan Berulang Gelombang Surja Berjalan	13
Arrester atau Penangkap Petir	20
Arester katup	20
Data pengenalan arrester	21
Tegangan pengenalan	22
Tegangan percikan impuls maksimal	22
Tegangan pelepasan	24
Arus pelepasan	24
Fuse Cut Out (CO)	24
III. METODE PENELITIAN	27
Studi literatur	27
Pengambilan Data	27
Analisis Data	27
Menarik kesimpulan	28
IV. DATA DAN ANALISIS	31
Sistem Pengawatan Arrester	31
Sistem-1	31
Sistem-2	32
Sistem-3	32

Sistem-4	33
Tegangan dan Arus Surja Sistem Penempatan Arrester	33
Sistem-1	34
Tegangan surja pada arrester di titik A	35
Tegangan surja pada trafo di titik T	39
Nilai arus surja pada saluran-3	42
Sistem-2	49
Tegangan surja pada arrester di titik A	49
Tegangan surja pada trafo di titik T	52
Arus surja pada saluran-1	54
Sistem-3	58
Arus surja pada saluran-1	58
Sistem-4	61
Tegangan surja pada arrester dan trafo	62
Arus surja pada saluran-1	64
Tegangan Kerja Arrester sebagai Alat Proteksi Transformator	66
Sistem-1	67
Sistem-2	67
Sistem-3	68
Sistem-4	68
V. PENUTUP	73
Kesimpulan	73
Saran	74
DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN	76



DAFTAR TABEL

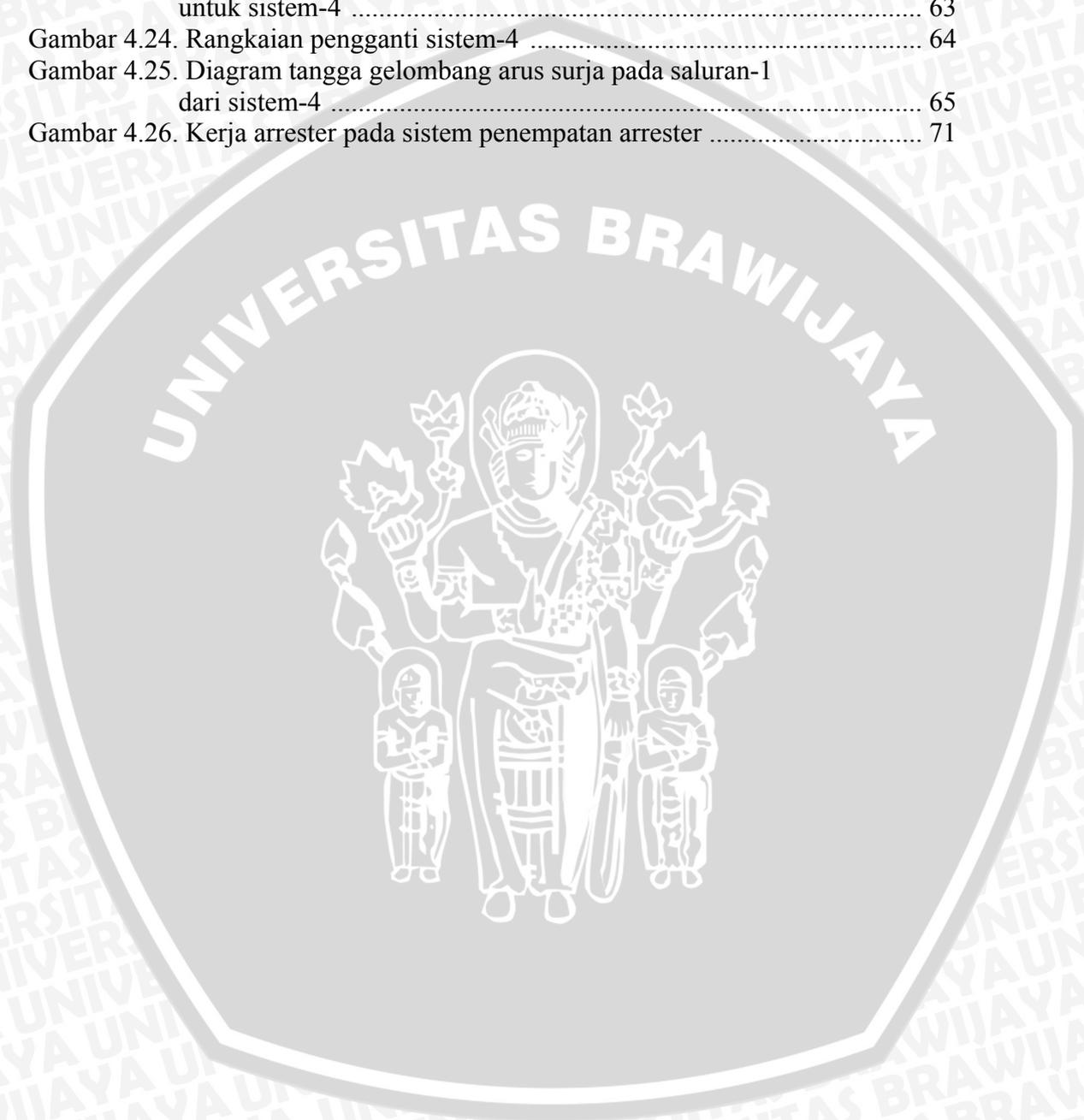
No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1.	Arus leleh kawat lebur Tipe K (cepat)	26
Tabel 4.1.	Energi pemutusan minimum kawat lebur pada 0,1 sekon	43
Tabel 4.2.	Nilai minimal puncak gelombang tegangan surja datang yang membuat arrester terpercik	69
Tabel 4.3.	Tegangan surja tertinggi pada Arrester (titik A)	70
Tabel 4.4.	Tegangan surja tertinggi pada Transformator (titik T)	70
Tabel 4.5.	Arus surja tertinggi pada kawat lebur	71
Tabel 4.6.	Energi kawat lebur	72



DAFTAR GAMBAR

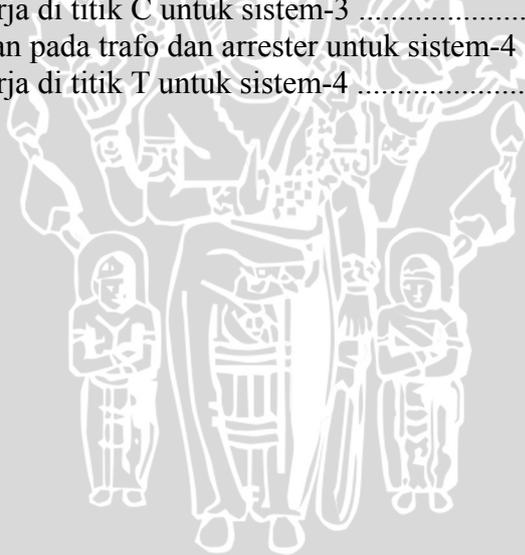
No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Spesifikasi gelombang surja	5
Gambar 2.2.	Bentuk gelombang double eksponensial untuk gelombang tegangan surja sebagai fungsi waktu	6
Gambar 2.3.	Bentuk gelombang eksponensial untuk gelombang arus surja sebagai fungsi waktu	7
Gambar 2.4.	Hubungan dua saluran dengan impedansi berbeda	9
Gambar 2.5.	Dua percabangan saluran dengan struktur seragam	11
Gambar 2.6.	Tiga percabangan saluran dengan struktur seragam	12
Gambar 2.7.	Resistansi paralel yang dihubungkan pada titik sambungan dua saluran	12
Gambar 2.8.	Rangkaian sederhana satu saluran	13
Gambar 2.9.	Diagram tangga gelombang tegangan surja pada saluran-1	15
Gambar 2.10.	Diagram tangga gelombang arus surja pada saluran-1	18
Gambar 2.11.	Bentuk nyata arrester katup	20
Gambar 2.12.	Konstruksi arrester katup	21
Gambar 2.13.	Karakteristik impuls arrester katup	21
Gambar 2.14.	Kerja arrester	22
Gambar 2.15.	Kerja arrester pada kecuraman gelombang tegangan surja yang berbeda	23
Gambar 2.16.	Pelebur jenis letupan (<i>expulsion</i>)	24
Gambar 2.17.	Bagian-bagian pelebur jenis letupan	25
Gambar 2.18.	Kurva-kurva karakteristik waktu-arus minimum dan maksimum kawat-kawat lebur Tipe K EEI-NEMA	26
Gambar 3.1.	Diagram alur langkah-langkah penelitian	29
Gambar 4.1.	Pengawatan sistem-1	31
Gambar 4.2.	Pengawatan sistem-2	31
Gambar 4.3.	Pengawatan sistem-3	32
Gambar 4.4.	Pengawatan sistem-4	33
Gambar 4.5.	Rangkaian sederhana sistem-1	34
Gambar 4.6.	Rangkaian pengganti sistem-1	35
Gambar 4.7.	Gelombang tegangan surja datang e_2 pada saluran-2 untuk sistem-1	35
Gambar 4.8.	Diagram Tangga Gelombang tegangan titik C dan A untuk sistem-1	36
Gambar 4.9.	Rangkaian pengganti sistem-1	39
Gambar 4.10.	Diagram tangga gelombang tegangan surja titik C dan T untuk sistem-1	40
Gambar 4.11.	Diagram tangga gelombang arus di titik C dan T untuk sistem-1 ...	45
Gambar 4.12.	Rangkaian sederhana sistem-2	49
Gambar 4.13.	Rangkaian pengganti sistem-2	49
Gambar 4.14.	Gelombang tegangan surja datang e_2 pada saluran-2 untuk sistem-2	50
Gambar 4.15.	Diagram tangga gelombang tegangan surja e_2 pada saluran-2	51
Gambar 4.16.	Rangkaian pengganti sistem-2	54
Gambar 4.17.	Diagram tangga gelombang arus surja pada saluran-1	

untuk sistem-2	55
Gambar 4.18. Rangkaian sistem-3	58
Gambar 4.19. Rangkaian pengganti sistem-3	59
Gambar 4.20. Diagram tangga gelombang i_1 pada saluran-1 dari sistem-3	60
Gambar 4.21. Rangkaian sistem-4	61
Gambar 4.22. Rangkaian pengganti sistem-4	62
Gambar 4.23. Diagram tangga gelombang tegangan surja pada saluran-1 untuk sistem-4	63
Gambar 4.24. Rangkaian pengganti sistem-4	64
Gambar 4.25. Diagram tangga gelombang arus surja pada saluran-1 dari sistem-4	65
Gambar 4.26. Kerja arrester pada sistem penempatan arrester	71



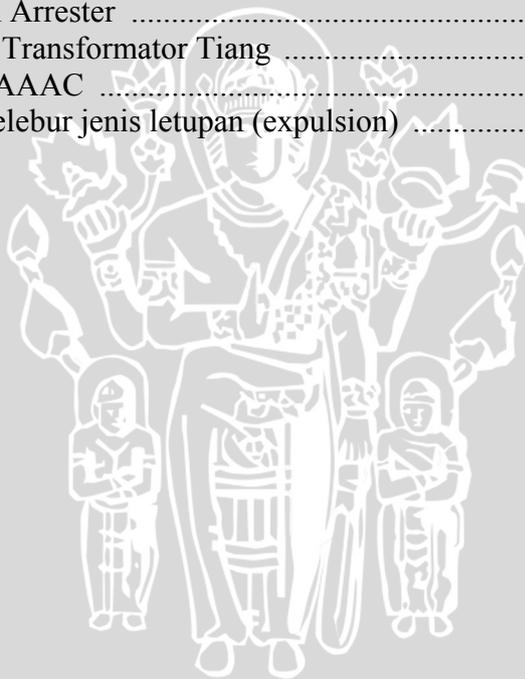
DAFTAR GRAFIK

No.	Judul	Halaman
Grafik 4.1.	Distribusi tegangan surja pada arrester di titik A pada waktu $t = 0$ sampai $t = 0,017 \mu\text{s}$ untuk sistem-1	37
Grafik 4.2.	Total tegangan surja pada arrester di titik A untuk sistem-1	39
Grafik 4.3.	Distribusi tegangan surja di titik T pada waktu $t = 0$ hingga $t = 0,077 \mu\text{s}$ untuk sistem-1	41
Grafik 4.4.	Total tegangan pada trafo di titik T untuk sistem-1	42
Grafik 4.5.	Distribusi arus saluran-3 pada $t = 0$ sampai $t = 0,042 \mu\text{s}$ untuk sistem-1	46
Grafik 4.6.	Total arus surja di titik C untuk sistem-1	48
Grafik 4.7.	Total tegangan pada arrester di titik A untuk sistem-2	51
Grafik 4.8.	Distribusi tegangan surja pada trafo di titik T pada waktu $t = 0$ sampai $t = 0,0136 \mu\text{s}$ untuk sistem-2	52
Grafik 4.9.	Total tegangan surja pada trafo di titik T untuk sistem-2	54
Grafik 4.10.	Distribusi arus surja di titik T sebagai tempat terhubungnya kawat lebur dari $t = 0$ sampai $t = 0,0664 \mu\text{s}$ untuk sistem-2	56
Grafik 4.11.	Total arus surja di titik T untuk sistem-2	57
Grafik 4.12.	Total arus surja di titik C untuk sistem-3	60
Grafik 4.13.	Total tegangan pada trafo dan arrester untuk sistem-4	63
Grafik 4.14.	Total arus surja di titik T untuk sistem-4	65



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Total tegangan pada arrester di titik A untuk sistem-1 dan 3	76
Lampiran 2.	Total tegangan pada trafo di titik T untuk sistem-1 dan 3	77
Lampiran 3.	Total tegangan pada arrester di titik A untuk sistem-2	78
Lampiran 4.	Total tegangan pada trafo di titik T untuk sistem-2	79
Lampiran 5.	Total tegangan pada arrester dan trafo di titik T dan A untuk sistem-4	80
Lampiran 6.	Total arus surja pada kawat lebur (titik C) untuk sistem-1	81
Lampiran 7.	Total arus surja pada kawat lebur (titik T) untuk sistem-2	82
Lampiran 8.	Total arus surja pada kawat lebur (titik C) untuk sistem-3	83
Lampiran 9.	Total arus surja pada kawat lebur (titik T) untuk sistem-4	84
Lampiran 10.	Data lapangan	85
Lampiran 11.	Konstruksi trafo 2 tiang	86
Lampiran 12.	Konstruksi trafo 1 tiang	87
Lampiran 13.	Pengawatan Arrester	88
Lampiran 14.	Foto Gardu Transformator Tiang	89
Lampiran 15.	Data kabel AAAC	90
Lampiran 16.	Pasangan pelebur jenis letupan (expulsion)	91



RINGKASAN

MUHAMMAD RUDIANTO, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2007, *Pengaruh Penempatan Arrester Terhadap Efektivitas Proteksi Transformator Distribusi 20 kV Pada Gardu Transformator Tiang*, Dosen Pembimbing: Drs.Ir. Moch Dhofir, MT. dan Ir. Mahfudz Shidiq, MT.

Diterapkannya empat sistem penempatan arrester pada gardu trafo tiang (GTT) yang mempunyai tujuan dan fungsi yang sama tetapi memiliki cara pengawatan yang berbeda, menimbulkan ketidakpastian tentang efektivitasnya dalam melindungi trafo dari tegangan lebih yang disebabkan surja petir. Suatu sistem penempatan arrester yang efektif diharapkan untuk diterapkan pada GTT. Dengan demikian perlu dilakukan analisis lebih lanjut mengenai sistem penempatan arrester tersebut.

Analisis terhadap empat sistem penempatan arrester bertujuan untuk mendapatkan suatu sistem penempatan arrester yang efektif sebagai proteksi trafo distribusi pada GTT.

Metode pantulan berulang gelombang surja yang biasa diwujudkan dalam bentuk diagram tangga sebagai analisisnya sangat sesuai untuk mengamati jejak dari pemantulan gelombang surja pada saluran dari sistem penempatan arrester, dengan metode ini selanjutnya akan didapatkan nilai tegangan surja petir tertinggi yang terjadi pada arrester dan trafo serta arus surja petir tertinggi yang mengalir pada kawat lebur dari pelebur/CO pada masing-masing sistem penempatan arrester.

Hasil analisis menunjukkan bahwa: sistem-1 dan 3 memiliki nilai tegangan surja yang sama dan lebih rendah dari sistem-2 dan 4, yaitu sebesar 99,98 % pada arrester dan 95,3 % pada trafo sedangkan sistem-2 sebesar 182,07 % dan sistem-4 sebesar 116,94 % baik pada arrester maupun pada trafo. Tegangan surja yang tinggi pada arrester dapat memperpendek umur kerja dari arrester tersebut, karena pada kondisi ini arrester akan bekerja lebih berat untuk melindungi trafo dari tegangan surja tersebut. Arus surja yang terjadi pada kawat lebur untuk sistem-1 bernilai paling kecil dibandingkan sistem yang lain, yaitu sebesar 0,0189 % sedangkan sistem-2 sebesar 0,2236 %, sistem-3 sebesar 0,4058 %, dan sistem-4 sebesar 0,0233 %. Arus surja ini menimbulkan energi petir yang tidak sampai memutuskan kawat lebur dari CO pada sistem-1 dan 4 tetapi memutuskan kawat lebur dari CO pada sistem-2 dan 3.

Akhirnya dari hasil analisis tersebut didapatkanlah sistem-1 sebagai sistem penempatan arrester yang efektif pada GTT sebagai proteksi trafo dari tegangan lebih yang disebabkan surja petir.

Kata kunci: penempatan arrester, proteksi, trafo distribusi.

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Gardu Transformator Tiang (GTT) merupakan salah satu bagian penting dalam suatu sistem distribusi daya listrik. GTT digunakan sebagai tempat peletakan transformator sistem 20 kV atau transformator distribusi 20 kV tipe pemasangan luar (outdoor). Transformator atau trafo tersebut berfungsi sebagai penurun tegangan (*step down transformer*), yang menurunkan tegangan 20 kV (tegangan menengah) menjadi 400/230 V (tegangan rendah). Karena trafo terhubung dengan saluran udara 20 kV dengan kawat telanjang (over head open wire) dan penempatannya yang di tempat terbuka sehingga pada trafo dapat terjadi gangguan tegangan lebih akibat sambaran petir secara langsung atau sambaran petir tidak langsung (induksi). Sambaran petir akan menimbulkan tegangan lebih yang tinggi melebihi kemampuan isolasi trafo hingga menyebabkan kerusakan isolasi yang fatal. Untuk mencegah terjadinya hal tersebut maka setiap pemasangan trafo distribusi 20 kV pada GTT selalu dilengkapi dengan arrester.

Saat ini telah diterapkan 4 sistem penempatan arrester pada GTT khususnya di Area Malang yang memiliki tujuan dan fungsi yang sama tetapi memiliki cara pengawatan dan peletakan arrester yang berbeda. Sistem penempatan arrester adalah sistem yang berhubungan dengan cara pengawatan arrester dengan trafo dan pelebur/CO yang memiliki tujuan untuk memberikan proteksi pada trafo dari tegangan lebih. Pada akhirnya keempat sistem penempatan arrester ini perlu dikaji kembali tentang efektivitas proteksinya pada trafo tersebut. Efektivitas proteksi pada trafo yang dimaksud adalah keberhasilan perlindungan yang diberikan pada trafo dengan memperkecil tegangan lebih yang terjadi pada trafo tersebut. Dengan cara mempertimbangkan faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya tegangan surja dan arus surja yang terjadi pada masing-masing sistem, seperti pengawatan arrester, panjang kawat yang dipergunakan dalam sistem penempatan arrester, kecuraman gelombang datang, dan kecepatan merambat gelombang surja. Sehingga pada akhirnya didapatkan satu sistem penempatan arrester yang efektif sebagai proteksi trafo distribusi 20 kV pada GTT.

1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang didapatkan permasalahan sebagai berikut:

- Bagaimana pengaruh penempatan arrester terhadap tegangan surja yang terjadi pada trafo dan arrester?
- Bagaimana pengaruh penempatan arrester terhadap kemampuan kerja arrester sebagai proteksi trafo distribusi?
- Bagaimana pengaruh arus surja terhadap kemampuan pemutusan kawat lebur untuk setiap sistem penempatan arrester?

1.3. Batasan Masalah

Agar pembahasan tidak terlalu luas dan tujuan penulisan dapat tercapai, maka diberikan batasan masalah dalam skripsi ini, yaitu:

- Arrester yang digunakan adalah arrester katup jenis saluran.
- Kabel yang digunakan sebagai pengawatan adalah AAAC 70 mm².
- Sistem penempatan arrester didasarkan pada standar PLN yang berlaku.
- Fuse cut out beserta kawat leburnya didasarkan pada standar PLN yang berlaku.
- Jenis gelombang surja petir yang digunakan untuk gelombang tegangan surja adalah 1,2/50 μ s dengan puncak 100%.
- Jenis gelombang surja petir yang digunakan untuk gelombang arus surja adalah 8/20 μ s.

1.4. Ruang Lingkup

Pembahasan dalam skripsi ini mempunyai ruang lingkup, yaitu:

- Menghitung impedansi surja dari saluran.
- Menghitung besarnya gelombang tegangan surja yang terjadi pada arrester dan trafo.
- Menghitung besarnya gelombang arus surja yang terjadi pada kawat lebur dari CO/ pelebur.
- Menentukan energi pemutusan kawat lebur dari CO.
- Menghitung energi petir yang timbul pada kawat lebur dari CO.

1.5. Tujuan Penulisan

Tujuan penelitian dalam skripsi ini adalah untuk mendapatkan sistem penempatan arrester yang efektif sebagai proteksi transformator distribusi 20 kV pada gardu trafo tiang (GTT).

1.6. Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan dalam penulisan skripsi ini, disusun sebagaimana berikut ini:

- BAB I Pendahuluan berisikan uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, ruang lingkup, tujuan dan sistematika pembahasan.
- BAB II Tinjauan pustaka berisikan tentang pengertian gelombang surja petir, pengaruh hubungan atau sambungan dari saluran, metode pantulan berulang gelombang surja, Arrester, dan Fuse cut out (CO).
- BAB III Metode penelitian yang menjelaskan tentang langkah-langkah yang diambil untuk menyelesaikan skripsi ini.
- BAB IV Menganalisis dan memperhitungkan besarnya tegangan surja dan arus surja yang terjadi pada masing-masing sistem penempatan arrester yang memiliki bentuk pengawatan yang berbeda.
- BAB V Memberikan kesimpulan dan saran dari hasil analisis dan perhitungan yang telah dilakukan pada skripsi ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Transformator distribusi 20 kV yang terpasang pada Gardu Transformator Tiang (GTT) merupakan peralatan yang dapat mengalami gangguan tegangan lebih akibat surja petir. Oleh karena itu, dalam setiap pemasangannya, transformator / trafo pada GTT selalu dilengkapi dengan arrester sebagai proteksi trafo dari tegangan lebih tersebut. Selain itu, trafo ini juga dilengkapi alat proteksi arus lebih berupa Fuse cut out (CO).

Trafo dan peralatan proteksi yang berfungsi sebagai pelindungnya, dirangkai sedemikian rupa dalam suatu sistem penempatan arrester.

2.1. Surja Petir pada Transformator Distribusi

Salah satu bentuk gangguan tegangan lebih yang tidak dapat dihindari oleh transformator distribusi adalah gangguan tegangan lebih akibat surja petir. Gelombang surja petir yang terjadi karena adanya petir yang menyambar saluran distribusi atau saluran udara tegangan menengah (SUTM) merambat hingga sampai pada gardu transformator tiang (GTT) merupakan persoalan yang tidak dapat dihindari dan membahayakan isolasi dari transformator pada gardu tersebut.

Gelombang surja petir disebabkan oleh sambaran petir yang mengenai saluran atau kawat dengan dua cara, yaitu:

- a. Sambaran petir langsung pada kawat,
- b. Sambaran petir tidak langsung pada kawat (induksi).

2.1.1. Sambaran Petir Langsung

Yang dimaksud sambaran petir langsung adalah apabila petir menyambar langsung pada kawat fasa (untuk saluran tanpa kawat tanah) atau pada kawat tanah (untuk saluran dengan kawat tanah).

Pada waktu petir menyambar kawat tanah atau kawat fasa akan timbul arus besar dan sepasang gelombang berjalan (gelombang tegangan dan arus) yang merambat pada kawat dan dapat membahayakan peralatan-peralatan yang terhubung dengan saluran

tersebut. Karena saluran tegangan menengah tidak begitu tinggi di atas tanah ($\pm 9-10$ meter), maka jumlah sambaran langsung pun rendah.

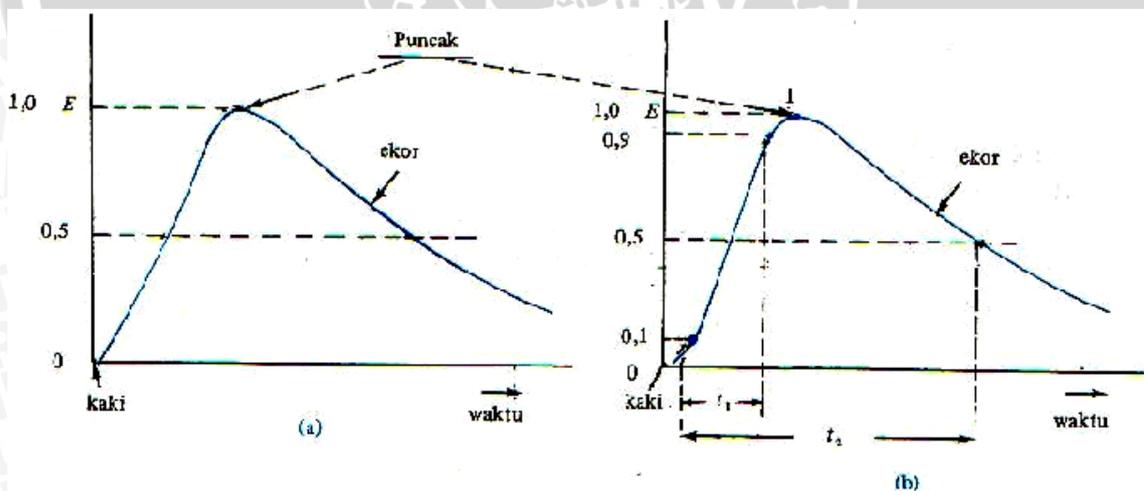
2.1.2. Sambaran petir tidak langsung

Bila terjadi sambaran petir ke tanah didekat saluran maka akan terjadi fenomena transien yang diakibatkan oleh medan elektromagnetis dari kanal kilat pada saluran atau kawat penghantar. Akibat dari kejadian ini timbul tegangan lebih dan gelombang berjalan yang merambat pada kawat di tempat sambaran berlangsung (Hutauruk, 1991:171).

Penelitian menunjukkan bahwa sekitar 80% gangguan tegangan lebih karena petir disebabkan oleh sambaran tidak langsung pada saluran-saluran distribusi (Pabla, 1994:234). Tegangan lebih akibat sambaran ini masih memiliki nilai yang cukup besar hingga dapat melampaui tingkat isolasi dasar (TID) trafo terhadap tegangan surja/impuls atau biasa disebut dengan BIL (*Basic Impuls Insulation Level*). Untuk menanggulangi gangguan tersebut maka digunakan arrester sebagai pengaman utama.

2.2. Bentuk dan Spesifikasi Gelombang Surja

Secara umum suatu gelombang surja dapat digambarkan sebagai berikut, Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Spesifikasi gelombang surja
Sumber: Hutauruk,1991: 4

Suatu gelombang surja memiliki spesifikasi sebagai berikut (Hutauruk,1991:5):

- Puncak (crest) gelombang (E), yaitu amplitudo maksimum dari gelombang.
- Muka gelombang, t_1 (mikrosekon), yaitu waktu dari permulaan sampai puncak.

Diambil dari 10 % sampai 90 % E , lihat Gambar 2.1b.

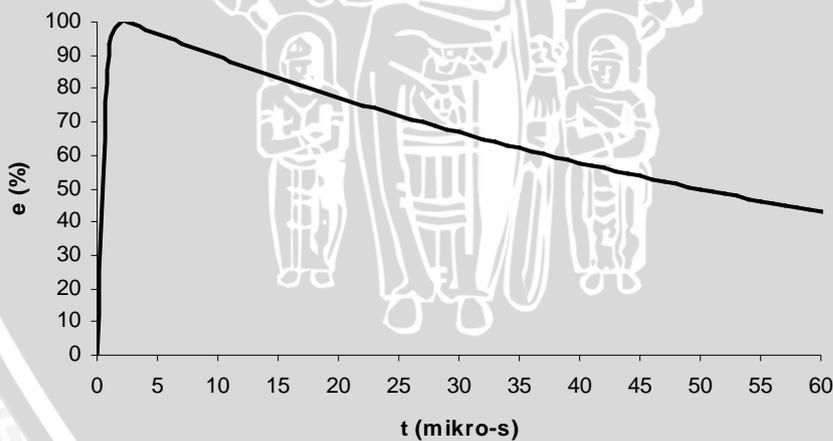
- c. Ekor gelombang, yaitu bagian di belakang puncak. Dalam spesifikasi gelombang surja, ekor gelombang ditunjukkan sebagai panjang gelombang dalam t_2 (mikrosekon), yaitu waktu dari permulaan sampai titik 50 %E pada ekor gelombang.

Suatu gelombang tegangan surja akhirnya dapat dinyatakan sebagai $E, t_1 \times t_2$ atau $E, t_1/t_2 \mu s$. Dan untuk gelombang arus surja dapat dinyatakan sebagai $I, t_1 \times t_2$ atau $I, t_1/t_2 \mu s$.

2.3. Gelombang Surja Petir

Gelombang surja petir terdiri dari gelombang tegangan surja dan gelombang arus surja. Untuk gelombang tegangan surja dalam hal ini adalah gelombang surja bentuk eksponensial ganda (dobel eksponensial) yang berdasarkan standar IEC merupakan model gelombang tegangan lebih tipe 1,2/50 μs .

Gelombang bentuk eksponensial ganda seperti diperlihatkan Gambar 2.2. Gelombang ini mencapai puncak dalam waktu yang sangat singkat (orde μs) dan turun secara perlahan di bawah punggung gelombang. Waktu naik hingga puncak dan waktu turun pada punggung gelombang ditentukan oleh dua konstanta waktu pada ke dua fungsi eksponensial.



Gambar 2.2. Bentuk gelombang dobel eksponensial untuk gelombang tegangan surja sebagai fungsi waktu

Sumber: Penulis

Bentuk gelombang eksponensial ganda sebagai fungsi waktu dinyatakan secara matematis sebagai berikut:

$$e_i(t) = Av.E_m \left(1 - e^{-t/t_a}\right) e^{-t/t_b} \tag{2-1}$$

dimana: $Av = 1,037$



E_m = amplitudo atau puncak gelombang tegangan surja (%)

$t_a = 0,4074 \mu\text{s}$

$t_b = 68,22 \mu\text{s}$

Sedangkan gelombang arus surja adalah gelombang surja bentuk eksponensial yang berdasarkan standar ANSI/IEEE merupakan gelombang surja tipe 8/20 μs . Dan dapat dituliskan dengan:

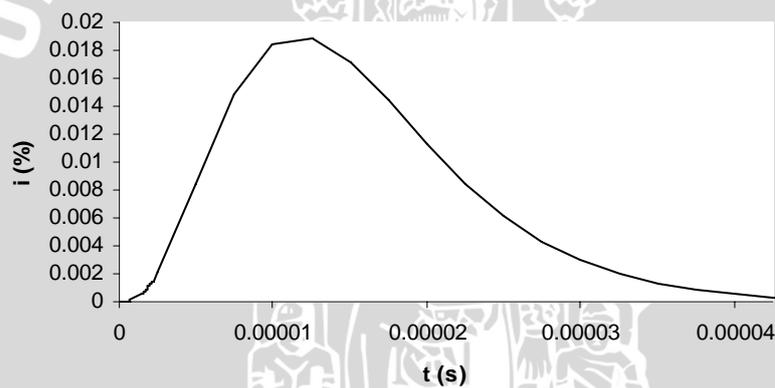
$$i_i(t) = A_I \cdot I_m \cdot t^3 e^{-t/t_c} \tag{2-2}$$

dimana $A_I = 0,01247 \cdot 10^{18} \text{ s}$

I_m = amplitudo gelombang arus surja (%)

$t_c = 3,911 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

Bentuk gelombang arus surja fungsi waktu diperlihatkan pada Gambar 2.3 di bawah ini:



Gambar 2.3. Bentuk gelombang eksponensial untuk gelombang arus surja sebagai fungsi waktu
 Sumber: Penulis

2.4. Kecepatan Rambat Gelombang Surja

Kecepatan merambat gelombang berjalan tergantung dari konstanta induktif (L) dan kapasitif (C) dari saluran atau kawat.

Apabila suatu gelombang energi listrik merambat sepanjang kawat dengan konstanta-konstanta L dan C, maka gelombang tegangan dan arus merambat dengan kecepatan yang sama (Hutauruk, 1991:2).

Nilai konstanta L dan C dari kawat udara dipengaruhi oleh jari-jari (r) dan tinggi (h) kawat di atas tanah. Sehingga konstanta L dan C yang dirumuskan oleh (Hutauruk,1991:3) adalah:

$$L = 2 \left\{ \frac{\ln 2h}{r} \right\} \times 10^{-9} \text{ henry/cm} \quad (2-3)$$

dan

$$C = \frac{10^{-11}}{18 \ln \left(\frac{2h}{r} \right)} \text{ farad/cm} \quad (2-4)$$

Kecepatan rambat gelombang pada kawat udara dapat dirumuskan sebagai berikut (Hutauruk, 1991:3):

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{18 \ln \frac{2h}{r} \cdot 10^{-11}}{2 \ln \frac{2h}{r} \cdot 10^{-9}} \quad (2-5)$$

$$v = 3 \times 10^{10} \text{ cm/s} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Jadi kecepatan merambat gelombang berjalan yang merupakan gelombang surja yang merambat pada kawat udara adalah sama dengan kecepatan cahaya dalam hampa udara.

Dan impedansi surja dari saluran udara dirumuskan oleh (Hutauruk, 1991:4) dengan:

$$z = \sqrt{\frac{L}{C}} = 60 \ln \frac{2h}{r} \text{ ohm} \quad (2-6)$$

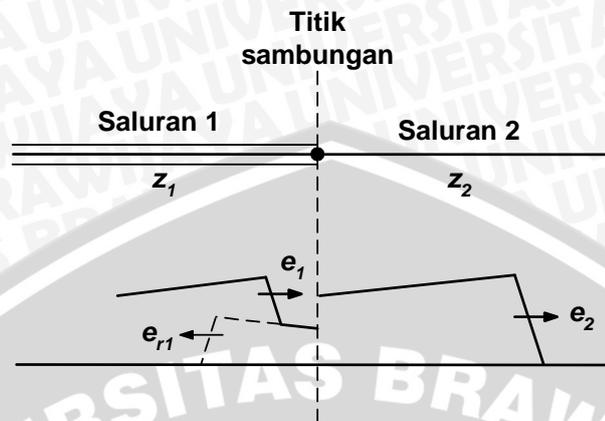
2.5. Penyaluran dan Pemantulan Gelombang Surja

Besarnya tegangan dan arus dari suatu gelombang surja adalah ditentukan oleh impedansi surja dari saluran. Gelombang surja yang sampai pada sebuah sambungan antara dua saluran dengan impedansi surja yang berbeda akan menimbulkan gelombang surja baru sebagai gelombang surja pantul dan gelombang surja terusan setelah melintasi atau saat sampai pada sambungan tersebut. Berikut ini akan dijelaskan perubahan besar gelombang surja pada beberapa variasi hubungan atau sambungan.

2.5.1. Hubungan atau sambungan dari dua saluran

Pada Gambar 2.4 ditunjukkan hubungan sederhana antara dua saluran yang masing-masing memiliki impedansi surja yang berbeda. Saluran-1 dengan impedansi surja z_1 dan saluran-2 dengan impedansi surja z_2 . Dimisalkan z_1 lebih kecil dari z_2 , bila gelombang tegangan surja e_1 diberikan dalam saluran-1, jika saluran-2 bebas tegangan,

lalu setelah sampainya gelombang ini pada titik sambungan, saluran-2 hanya akan berisi gelombang tegangan surja e_2 sebagai gelombang surja yang diteruskan dan saluran-1 akan terdapat gelombang tegangan surja yang dipantulkan e_{r1} .



Gambar 2.4. Hubungan dua saluran dengan impedansi berbeda
Sumber: Reinhold,1968:43

Kejadian ini dianggap pada waktu $t = 0$. Jadi pemecahan total tegangan surja berdasarkan Reinhold (1968:43) adalah:

$$e_1 + e_{r1} = e_2 \quad (2-7)$$

sedangkan pemecahan untuk arus adalah:

$$\frac{e_1}{z_1} - \frac{e_{r1}}{z_1} = \frac{e_2}{z_2} \quad (2-8)$$

Dari kedua persamaan ini akan dihasilkan gelombang surja yang dipantulkan dan disalurkan. Perkalian Persamaan (2-8) oleh z_1 dan menjumlahkan Persamaan (2-7) untuk menghasilkan:

$$2e_1 = e_2 \left(1 + \frac{z_1}{z_2} \right) \quad (2-9)$$

Ini memberikan secara langsung e_2 sebagai fungsi e_1 :

$$e_2 = \frac{2z_2}{z_1 + z_2} e_1 \quad (2-10)$$

Persesuaian gelombang arus surja bisa didapatkan dari pembagian kedua bagian dari impedansi surja:

$$i_2 = \frac{2z_1}{z_1 + z_2} i_1 \quad (2-11)$$

atau secara lebih sederhana menjadi:

$$i_2 = \frac{e_2}{z_2} \quad (2-12)$$

Gelombang tegangan surja yang dipantulkan e_{r1} yang dibangkitkan pada titik sambungan dihasilkan dari Persamaan (2-7) dengan mesubstitusikan dalam persamaan (2-10) sehingga menghasilkan:

$$e_{r1} = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2} e_1 \quad (2-13)$$

Dari Persamaan (2-13) di atas terlihat bahwa besarnya gelombang tegangan surja yang dipantulkan dipengaruhi oleh pembagian dari dua impedansi surja yang dihubungkan oleh titik sambungan, yaitu:

$$\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$$

selanjutnya pembagian impedansi surja ini kita sebut sebagai koefisien pantulan tegangan atau gamma (Γ) untuk titik sambungan tersebut. Dengan begitu koefisien pantulan tegangan adalah

$$\Gamma = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (2-14)$$

Persamaan (2-13) dapat dituliskan kembali menjadi:

$$e_{r1} = e_1 \cdot \Gamma \quad (2-15)$$

Persesuaian gelombang arus surja yang dipantulkan dihasilkan oleh pembagian impedansi surja seperti dituliskan di bawah ini:

$$i_{r1} = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} i_1 \quad (2-16)$$

Dari Persamaan (2-16), nilai pembagian impedansi surja untuk gelombang arus yang dipantulkan atau kita sebut sebagai koefisien pantulan arus dapat dirumuskan menjadi:

$$\Gamma = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} = -\Gamma \quad (2-17)$$

Koefisien pantulan arus ini akan menghasilkan nilai dengan polaritas yang berlawanan dengan nilai koefisien pantulan tegangan. Bila koefisien pantulan tegangan (Γ) adalah positif maka koefisien pantulan arus adalah negatif ($-\Gamma$). Sehingga Persamaan (2-16) dapat ditulis kembali menjadi:

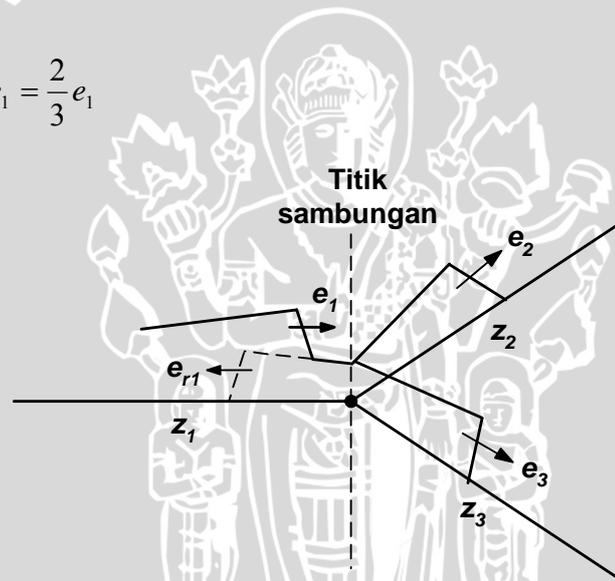
$$i_{r1} = -i_1 \cdot \Gamma \quad (2-18)$$

Persamaan (2-10) sampai (2-13) dan (2-16) yang dirumuskan oleh Reinhold (1968) serta Persamaan (2-15) dan (2-18) yang dirumuskan Clayton (1987) memberi aturan penyaluran dan pemantulan dari gelombang berjalan yang sampai pada titik

sambungan antara dua saluran saat $t = 0$. Bila diamati proses penyaluran dan pemantulan yang terjadi semata-mata diatur oleh besarnya impedansi surja dari saluran. Gelombang surja yang disalurkan selalu memiliki polaritas sama seperti gelombang yang datang, tapi gelombang pantulan akan mengalami perubahan polaritas pada tegangan atau arusnya.

Pada Gambar 2.5 ditunjukkan dua percabangan dalam saluran pada struktur yang seragam dalam 3 bagian ($z_1 = z_2 = z_3$). Sebuah gelombang surja yang sampai pada titik sambungan dibagi dalam beberapa bagian. Perjalanan gelombang surja yang disalurkan dalam hubungan paralel pada saluran dengan impedansi surja bernilai sama ($z_2 = z_3$), sehingga nilai impedansi surja pada hubungan paralel ini setengahnya. Dalam hubungan dua percabangan sederhana sebagaimana Gambar 2.5, tegangan adalah dikurangi/ diperkecil, dirumuskan oleh Reinhold (1968:45) sesuai dengan Persamaan (2-10), yaitu:

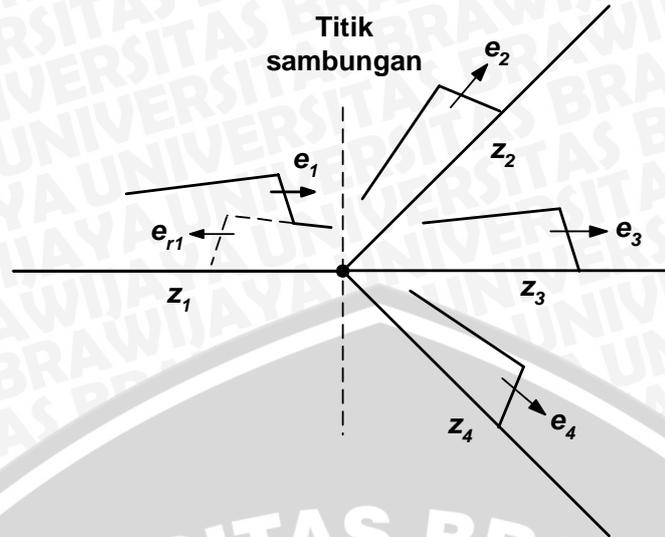
$$e_2 = e_3 = \frac{2\frac{1}{2}}{1+\frac{1}{2}}e_1 = \frac{2}{3}e_1 \quad (2-19)$$



Gambar 2.5. Dua percabangan saluran dengan struktur seragam
Sumber: Reinhold, 1968:45

Untuk pembagian dari n saluran yang sama, dihubungkan sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 2.6 untuk $n = 4$, dan Gambar 2.5 untuk $n = 3$, kombinasi impedansi surja keluaran saluran adalah:

$$z_2 = \frac{z}{n-1} \quad (2-20)$$



Gambar 2.6. Tiga percabangan saluran dengan struktur seragam
 Sumber:Reinhold, 1968:45

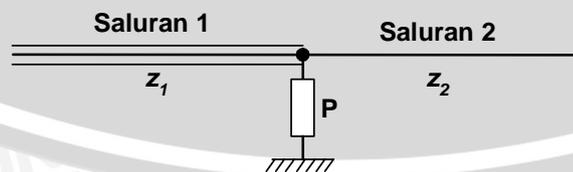
Dimana semua saluran mempunyai impedansi z , dan $z_1 = z$. Gelombang tegangan surja yang disalurkan berdasarkan Persamaan (2-10) adalah:

$$e_2 = \frac{2}{1 + \frac{z_1}{z_2}} e_1 = \frac{2}{n} e_1 \quad (2-21)$$

2.5.2. Resistansi paralel yang dihubungkan pada titik sambungan

Resistansi paralel dapat berupa tahanan atau impedansi surja peralatan atau saluran yang memiliki nilai yang berbeda dengan impedansi surja z_1 dan z_2 . Resistansi paralel yang dihubungkan pada titik sambungan seperti diperlihatkan Gambar 2.7. Persamaan tegangannya diberikan pada Persamaan (2-7), sedangkan persamaan arusnya adalah:

$$\frac{e_1}{z_1} - \frac{e_{r1}}{z_1} = \frac{e_2}{z_2} + \frac{e_2}{P} \quad (2-22)$$



Gambar 2.7. Resistansi paralel yang dihubungkan pada titik sambungan dua saluran
 Sumber: Reinhold, 1968:48

Jika kita mengalikan Persamaan (2-22) dengan z_1 dan menjumlahkan Persamaan (2-7) maka akan didapatkan gelombang tegangan surja yang diteruskan pada saluran-2 sebagai berikut (Reinhold,1968:48):

$$e_2 = \frac{2 \frac{1}{z_1}}{\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \frac{1}{P}} e_1 \quad (2-23)$$

dan gelombang tegangan surja yang dipantulkan dalam saluran-1 berdasarkan Persamaan (2-13) menjadi:

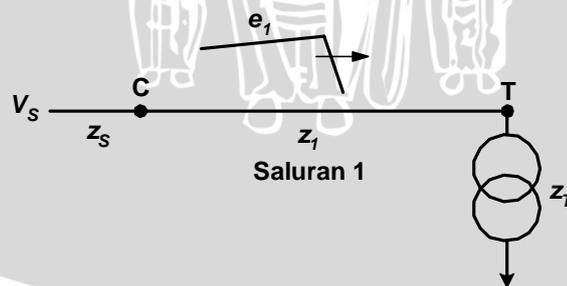
$$e_{r1} = \frac{\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_2} - \frac{1}{P}}{\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \frac{1}{P}} e_1 \quad (2-24)$$

atau

$$e_{r1} = e_1 \cdot \Gamma \quad (2-25)$$

2.6. Metode Pantulan Berulang Gelombang Surja Berjalan

Metode pantulan berulang yang biasa diwujudkan dalam bentuk diagram tangga adalah cara yang sesuai untuk mengamati jejak dari pemantulan suatu gelombang surja berjalan pada suatu saluran, sumbu horisontal untuk menamai garis pantulan pada saluran dan sumbu vertikal untuk menamai kenaikan waktu dari total waktu yang dibutuhkan gelombang surja untuk melintasi saluran dalam satu jurusan: S/v . Dari diagram ini bisa didapatkan nilai dari total tegangan surja pada saluran di setiap titik dan waktu. Penggunaan metode ini dapat dijelaskan secara lebih jauh pada penentuan besar tegangan surja dan arus surja untuk bentuk rangkaian yang diperlihatkan pada Gambar 2.8 di bawah ini.



Gambar 2.8. Rangkaian sederhana satu saluran
Sumber: Penulis

Suatu bentuk rangkaian sederhana diperlihatkan dalam Gambar 2.8. Setiap titik (titik C dan T) menandakan suatu hubungan dari dua nilai tahanan atau impedansi surja yang berbeda, saluran-1 dengan impedansi surja z_1 memiliki panjang total dari titik C sampai titik T sama dengan S. Dengan menganggap z_s sebagai impedansi surja sisi

sumber dan z_T sebagai impedansi surja sisi beban. Bila tegangan surja dari sisi sumber V_S diberikan pada saluran-1 maka pada saluran tersebut timbul gelombang tegangan surja e_1 dan arus surja i_1 yang merambat dari titik C menuju titik T.

Sebagaimana penjelasan sebelumnya bahwa suatu gelombang surja yang sampai pada suatu titik yang menghubungkan dua impedansi surja yang berbeda (titik peralihan) akan menimbulkan gelombang surja yang dipantulkan di titik ini.

Gelombang surja datang (e_1 dan i_1) pada saluran-1 akan menimbulkan gelombang surja pantul di titik T setelah sampainya gelombang ini di titik tersebut pada waktu t . Dan selanjutnya gelombang surja pantul ini akan merambat dan sampai pada titik C pada waktu $2t$ dan menimbulkan gelombang surja pantul baru di titik C tersebut, gelombang surja pantul baru ini akan kembali merambat menuju titik T dan menimbulkan gelombang surja pantul baru lagi setelah sampainya di titik T pada waktu $3t$. Proses pemantulan ini diulang secara terus menerus pada titik T dan titik C. Pada setiap waktu, total tegangan surja atau arus surja pada setiap titik dari saluran adalah penjumlahan dari nilai semua gelombang tegangan surja atau arus surja yang timbul pada saluran di titik dan waktu tersebut.

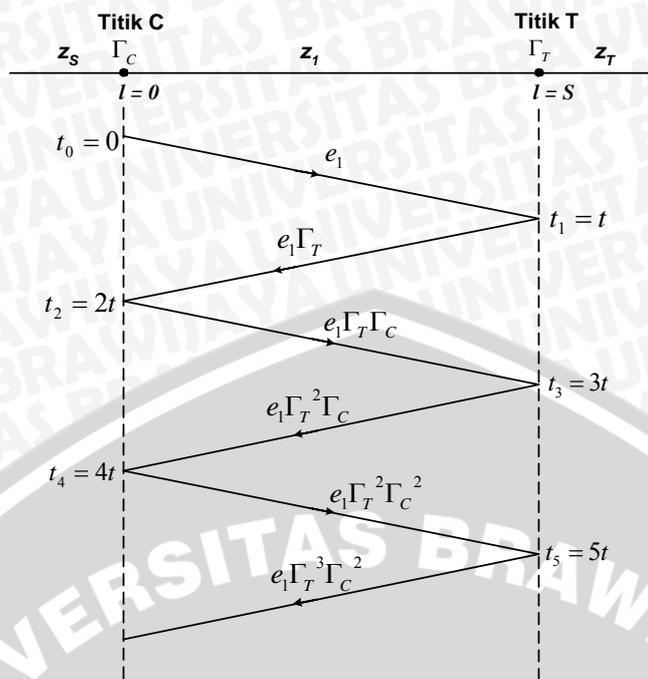
Waktu t yang dimaksud adalah waktu yang dibutuhkan gelombang surja untuk merambat pada saluran-1 dari titik C ke titik T atau sebaliknya, bila kecepatan rambat gelombang surja adalah v dan panjang saluran adalah S maka waktu t tersebut adalah:

$$t = \frac{S}{v}$$

Gelombang surja yang dipantulkan besarnya dipengaruhi oleh koefisien pantulan yang berada di titik T untuk gelombang surja yang dipantulkan dari titik T dan koefisien pantulan di titik C untuk gelombang yang dipantulkan dari titik C.

Dengan menganggap terminal tegangan di titik C berupa V_C dan di titik T berupa V_T sedangkan arus surja yang terjadi di titik C berupa I_C dan di titik T berupa I_T . Selanjutnya akan diamati tegangan surja dan arus surja fungsi waktu di titik C dan T tersebut.

Proses perjalanan gelombang surja e_1 sebagai gelombang tegangan surja datang pada saluran-1 diperlihatkan dalam diagram tangga di bawah ini (Gambar 2.9):



Gambar 2.9. Diagram tangga gelombang tegangan surja pada saluran-1
Sumber: Penulis

Diagram tangga ini memperlihatkan gelombang surja datang e_1 fungsi waktu [$e_1(t)$] dengan nilai puncak E_1 yang datang pada saluran-1 dan kemudian menimbulkan gelombang surja pantul setelah sampai di titik T dan C. Gelombang surja pantul yang dihasilkan ditandai dengan adanya perkalian antara gelombang surja e_1 dengan koefisien pantulan tegangan, perkalian ini menghasilkan gelombang-gelombang tegangan surja baru ($e_1\Gamma_T$, $e_1\Gamma_T\Gamma_C$, $e_1\Gamma_T^2\Gamma_C$, $e_1\Gamma_T^2\Gamma_C^2$, $e_1\Gamma_T^3\Gamma_C^2$, dan seterusnya) bentuk doblekspensial sebagaimana gelombang surja datang. Gelombang surja e_1 dengan masukan Γ_T sebagai pengalinya menandakan gelombang surja yang dipantulkan dari titik T sedangkan gelombang surja e_1 dengan masukan Γ_C sebagai pengalinya menandakan gelombang surja yang dipantulkan dari titik C.

Koefisien pantulan tegangan di titik C dan titik T yang didasarkan Persamaan (2-13) berturut-turut dapat dituliskan seperti berikut ini:

$$\Gamma_C = \frac{z_s - z_1}{z_s + z_1}$$

dan

$$\Gamma_T = \frac{z_T - z_1}{z_T + z_1}$$

Proses perjalanan gelombang e_1 seperti diperlihatkan dalam diagram tangga di atas dapat dijelaskan seperti berikut ini:

Gelombang surja e_1 yang dikirim dari titik C saat $t_0 = 0$ tepian ujung gelombang yang bernilai 0 % berada di titik C tersebut dan akan sampai pada titik T pada $t_1 = t = S/v$, pada waktu t ini juga dihasilkan gelombang surja pantul di titik T dengan sebesar $e_1 \cdot \Gamma_T$ yang mengarah ke titik C, tepian ujung gelombang surja ini berada pada titik T dan sampai di titik C saat $t_2 = 2t$ yang menimbulkan gelombang surja pantul di titik C sebesar $e_1 \cdot \Gamma_T \cdot \Gamma_C$ yang mengarah ke titik T. Kemudian saat $t_3 = 3t$ gelombang surja pantul dari titik C sampai pada titik T yang menimbulkan gelombang surja pantul sebesar $e_1 \cdot \Gamma_T^2 \cdot \Gamma_C$ yang mengarah ke titik C. Demikianlah proses pemantulan gelombang surja ini akan terjadi berulang-ulang pada titik T dan C. Pada setiap waktu, total tegangan surja pada setiap titik dari saluran adalah penjumlahan dari gelombang tegangan surja yang terjadi titik tersebut pada waktu itu.

Kita pandang bagian saluran di titik T yang terhubung dengan beban Z_T pada $l = S$ dengan terminal tegangan berupa V_T . Total tegangan surja pada terminal tegangan tersebut pada waktu t dan $3t$ bisa didapatkan berdasarkan persamaan di bawah ini:

- saat $t_1 = t$

$$\begin{aligned} v_T(t_1) &= e_1(t_1 - t) + e_1(t_1 - t) \Gamma_T \\ &= (A_V E_1 \cdot (1 - e^{-(t_1-t)/t_a}) \cdot e^{-(t_1-t)/t_b}) + (A_V E_1 \cdot (1 - e^{-(t_1-t)/t_a}) \cdot e^{-(t_1-t)/t_b} \cdot \Gamma_T) \\ v_T(t_1) &= A_V E_1 \cdot ((1 - e^{-(t_1-t)/t_a}) \cdot e^{-(t_1-t)/t_b} \cdot (1 + \Gamma_T)) \end{aligned} \quad (2-26)$$

- saat $t_3 = 3t$

$$\begin{aligned} v_T(t_3) &= e_1(t_3 - t) + e_1(t_3 - t) \Gamma_T + e_1(t_3 - 3t) \Gamma_T \cdot \Gamma_C + e_1(t_3 - 3t) \Gamma_T^2 \cdot \Gamma_C \\ &= e_1(t_3 - t) (1 + \Gamma_T) + e_1(t_3 - 3t) \Gamma_C \cdot (\Gamma_T + \Gamma_T^2) \\ v_T(t_3) &= A_V E_1 \cdot ((1 - e^{-(t_3-t)/t_a}) \cdot e^{-(t_3-t)/t_b} \cdot (1 + \Gamma_T) + (1 - e^{-(t_3-3t)/t_a}) \cdot e^{-(t_3-3t)/t_b} \cdot \Gamma_C \cdot (\Gamma_T + \Gamma_T^2)) \end{aligned} \quad (2-27)$$

Sehingga total tegangan surja di titik T atau terminal tegangan V_T pada waktu tertentu dapat dituliskan dalam bentuk persamaan di bawah ini:

$$\begin{aligned} v_T(t_n) &= A_V E_1 \cdot [(1 - e^{-(t_n-t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-t)/t_b} \cdot (1 + \Gamma_T) + (1 - e^{-(t_n-3t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-3t)/t_b} \cdot \Gamma_C \cdot (\Gamma_T + \Gamma_T^2) + \\ &\quad (1 - e^{-(t_n-5t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-5t)/t_b} \cdot \Gamma_C^2 \cdot (\Gamma_T^2 + \Gamma_T^3) + \dots + (1 - e^{-(t_n-n \cdot t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-n \cdot t)/t_b} \cdot \Gamma_C^8 \cdot (\Gamma_T^8 + \Gamma_T^9)] \end{aligned} \quad (2-28)$$

Dari Persamaan (2-28) ini terlihat bahwa gelombang tegangan surja yang diperhitungkan dibatasi pada $e_1(t_n) \cdot \Gamma_C^8 (\Gamma_T^8 + \Gamma_T^9)$, gelombang tegangan surja yang terbentuk setelah gelombang tegangan surja tersebut yang disebabkan proses pemantulan gelombang, yaitu $e_1(t) \cdot \Gamma_C^9 (\Gamma_T^9 + \Gamma_T^{10})$ hingga $e_1(t) \cdot \Gamma_C^m (\Gamma_T^m + \Gamma_T^{m+1})$ memiliki nilai yang

mendekati nol atau sama dengan nol sehingga nilai dari gelombang tegangan surja ini dapat diabaikan.

Selanjutnya, memandang bagian saluran di titik C yang terhubung dengan sumber z_S pada $l = 0$ dengan terminal tegangan berupa V_C . Total tegangan surja pada terminal tegangan tersebut pada waktu 0 dan $2t$ bisa didapatkan berdasarkan persamaan di bawah ini:

- saat $t_0 = 0t = 0$

$$\begin{aligned} v_C(t_0) &= e_1(t_0 - 0t) \\ &= A_V E_1 \cdot (1 - e^{-(t_0-0)/t_a}) \cdot e^{-(t_0-0)/t_b} \end{aligned} \quad (2-29)$$

- saat $t_2 = 2t$

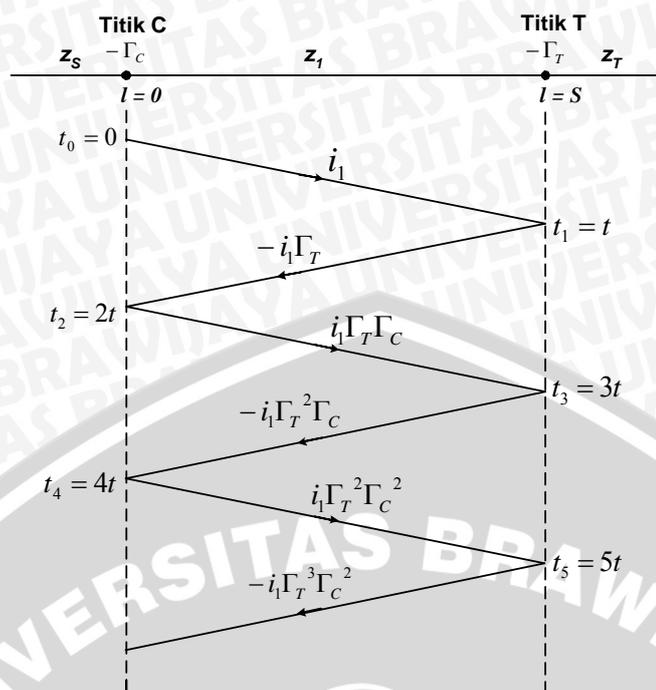
$$\begin{aligned} v_C(t_2) &= e_1(t_2 - 0t) + e_1(t_2 - 2t) \Gamma_T + e_1(t_2 - 2t) \Gamma_T \Gamma_C \\ &= (A_V E_1 \cdot (1 - e^{-(t_2-0t)/t_a}) \cdot e^{-(t_2-0t)/t_b}) + (A_V E_1 \cdot (1 - e^{-(t_2-2t)/t_a}) \cdot e^{-(t_2-2t)/t_b} \cdot \Gamma_T \cdot (1 + \Gamma_C)) \\ v_C(t_2) &= A_V E_1 \cdot ((1 - e^{-(t_2-0t)/t_a}) \cdot e^{-(t_2-0t)/t_b} + (1 - e^{-(t_2-2t)/t_a}) \cdot e^{-(t_2-2t)/t_b} \cdot \Gamma_T \cdot (1 + \Gamma_C)) \end{aligned} \quad (2-30)$$

Sehingga total tegangan surja di titik C atau terminal tegangan V_C pada waktu tertentu dapat dituliskan dalam bentuk persamaan di bawah ini:

$$\begin{aligned} v_C(t_n) &= A_V E_1 \cdot [(1 - e^{-(t_n-0t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-0t)/t_b} + (1 - e^{-(t_n-2t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-2t)/t_b} \cdot \Gamma_T (1 + \Gamma_C) + \\ &\quad (1 - e^{-(t_n-4t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-4t)/t_b} \cdot \Gamma_T^2 (\Gamma_C + \Gamma_C^2) + (1 - e^{-(t_n-6t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-6t)/t_b} \cdot \Gamma_T^3 (\Gamma_C^2 + \Gamma_C^3) + \\ &\quad \dots + (1 - e^{-(t_n-nt)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-nt)/t_b} \cdot \Gamma_T^9 (\Gamma_C^8 + \Gamma_C^9)] \end{aligned} \quad (2-31)$$

Dari Persamaan (2-31) ini terlihat bahwa gelombang tegangan surja yang diperhitungkan dibatasi pada $e_1(t_n) \cdot \Gamma_T^9 (\Gamma_C^8 + \Gamma_C^9)$, gelombang tegangan surja yang terbentuk setelah gelombang tegangan surja tersebut yang disebabkan proses pemantulan gelombang, yaitu $e_1(t) \cdot \Gamma_T^{10} (\Gamma_C^9 + \Gamma_C^{10})$ hingga $e_1(t) \cdot \Gamma_T^{m+1} (\Gamma_C^m + \Gamma_C^{m+1})$ memiliki nilai yang mendekati nol atau sama dengan nol sehingga nilai dari gelombang tegangan surja ini dapat diabaikan. Hal ini akan berlaku atau diterapkan pada persamaan-persamaan lain yang digunakan untuk menentukan total tegangan dan arus surja di titik tertentu pada suatu saluran, begitu juga untuk Persamaan (2-28).

Sedangkan proses perjalanan gelombang surja i_1 sebagai gelombang arus surja datang pada saluran-1 diperlihatkan dalam diagram tangga di bawah ini (Gambar 2.10):



Gambar 2.10. Diagram tangga gelombang arus surja pada saluran-1
 Sumber: Penulis

Diagram tangga ini memperlihatkan gelombang surja datang i_1 fungsi waktu $[i_1(t)]$ dengan nilai puncak I_1 yang datang pada saluran-1 dan kemudian terjadi proses pemantulan gelombang surja setelah sampai di titik T dan C. Proses pemantulan gelombang surja i_1 terjadi seperti halnya gelombang surja e_1 , perbedaannya adalah gelombang surja pantul yang ditimbulkan oleh gelombang surja i_1 dipengaruhi oleh koefisien pantulan arus yang memiliki nilai yang sama besarnya dengan koefisien pantulan tegangan tetapi berlawanan polaritasnya. Dengan demikian koefisien pantulan arus di titik C adalah $-\Gamma_C$ dan di titik T adalah $-\Gamma_T$.

Gelombang surja pantul yang dihasilkan ditandai dengan adanya perkalian antara gelombang surja i_1 dengan koefisien pantulan arus, perkalian ini menghasilkan gelombang-gelombang arus surja baru ($-i_1\Gamma_T$, $i_1\Gamma_T\Gamma_C$, $-i_1\Gamma_T^2\Gamma_C$, $i_1\Gamma_T^2\Gamma_C^2$, $-i_1\Gamma_T^3\Gamma_C^2$, dan seterusnya) bentuk eksponensial sebagaimana gelombang arus surja datang. Gelombang surja i_1 dengan masukan $-\Gamma_T$ sebagai pengalinya menandakan gelombang surja yang dipantulkan dari titik T sedangkan gelombang surja i_1 dengan masukan $-\Gamma_C$ sebagai pengalinya menandakan gelombang surja yang dipantulkan dari titik C.

Proses perjalanan gelombang i_1 sebagaimana diperlihatkan pada diagram tangga di atas dapat dijelaskan seperti berikut ini:

Gelombang surja i_1 yang dikirim dari titik C saat $t_0 = 0$ tepian ujung gelombang yang bernilai 0 berada di titik C tersebut dan akan sampai pada titik T pada $t_1 = t = S/v$, pada



waktu t ini juga dihasilkan gelombang surja pantul di titik T dengan sebesar $-i_1 \cdot \Gamma_T$ yang mengarah ke titik C, tepian ujung gelombang surja ini berada pada titik T dan sampai di titik C saat $t_2 = 2t$ yang menimbulkan gelombang surja pantul di titik C sebesar $i_1 \cdot \Gamma_T \cdot \Gamma_C$ yang mengarah ke titik T. Kemudian saat $t_3 = 3t$ gelombang surja pantul dari titik C sampai pada titik T yang menimbulkan gelombang surja pantul sebesar $-i_1 \cdot \Gamma_T^2 \cdot \Gamma_C$ yang mengarah ke titik C. Demikianlah proses pemantulan gelombang arus surja ini akan terjadi berulang-ulang pada titik T dan C. Pada setiap waktu, total arus surja pada setiap titik dari saluran adalah penjumlahan dari gelombang arus surja yang terjadi titik tersebut pada waktu itu.

Memandang bagian saluran di titik T yang terhubung dengan beban z_T pada $l = S$. Total arus surja pada titik ini pada waktu t dan $3t$ bisa didapatkan berdasarkan persamaan di bawah ini:

- saat $t_1 = t$

$$i_T(t_1) = i_1(t_1 - t) - i_1(t_1 - t) \Gamma_T$$

$$= (A_I \cdot I_1 \cdot (t_1 - t)^3 \cdot e^{-(t_1 - t)/t_c}) - (A_I \cdot I_1 \cdot (t_1 - t)^3 \cdot e^{-(t_1 - t)/t_c} \cdot \Gamma_T)$$

$$i_T(t_1) = A_I \cdot I_1 \cdot (t_1 - t)^3 \cdot e^{-(t_1 - t)/t_c} \cdot (1 - \Gamma_T) \quad (2-32)$$

- saat $t_3 = 3t$

$$i_T(t_3) = i_1(t_3 - t) - i_1(t_3 - t) \Gamma_T + i_1(t_3 - 3t) \Gamma_T \cdot \Gamma_C - i_1(t_3 - 3t) \Gamma_T^2 \cdot \Gamma_C$$

$$= i_1(t_3 - t) \cdot (1 - \Gamma_T) + i_1(t_3 - 3t) \cdot (-\Gamma_C \cdot (-\Gamma_T + \Gamma_T^2))$$

$$i_T(t_3) = A_I \cdot I_1 \cdot ((t_3 - t)^3 \cdot e^{-(t_3 - t)/t_c} \cdot (1 - \Gamma_T) + (t_3 - 3t)^3 \cdot e^{-(t_3 - 3t)/t_c} \cdot (-\Gamma_C \cdot (-\Gamma_T + \Gamma_T^2))) \quad (2-33)$$

Sehingga total arus surja di titik T pada waktu tertentu dapat dituliskan dalam bentuk persamaan di bawah ini:

$$i_T(t_n) = A_I I_1 \cdot [(t_n - t)^3 \cdot e^{-(t_n - t)/t_c} \cdot (1 - \Gamma_T) + (t_n - 3t)^3 \cdot e^{-(t_n - 3t)/t_c} \cdot (-\Gamma_C \cdot (-\Gamma_T + \Gamma_T^2)) + (t_n - 5t)^3 \cdot e^{-(t_n - 5t)/t_c} \cdot \Gamma_C^2 \cdot (\Gamma_T^2 - \Gamma_T^3) + \dots + (t_n - nt)^3 \cdot e^{-(t_n - nt)/t_c} \cdot \Gamma_C^8 \cdot (\Gamma_T^8 + \Gamma_T^9)] \quad (2-34)$$

Selanjutnya, memandang bagian saluran di titik C yang terhubung dengan sumber z_S pada $l = 0$. Total arus surja di titik C tersebut pada waktu 0 dan $2t$ bisa didapatkan berdasarkan persamaan di bawah ini:

- saat $t_0 = 0t = 0$

$$i_C(t_0) = i_1(t_0 - 0t)$$

$$= A_I \cdot I_1 \cdot (t_0 - 0t)^3 \cdot e^{-(t_0 - 0t)/t_c} \quad (2-35)$$

- saat $t_2 = 2t$

$$\begin{aligned}
 i_C(t_2) &= i_1(t_2 - 0t) - i_1(t_2 - 2t)\Gamma_T + i_1(t_2 - 2t)\Gamma_T\Gamma_C \\
 &= (A_T I_1 (t_2 - 0t)^3 \cdot e^{-(t_2 - 0t)/t_c}) + (A_T I_1 (t_2 - 2t)^3 \cdot e^{-(t_2 - 2t)/t_c} \cdot (-\Gamma_T \cdot (1 - \Gamma_C))) \\
 i_C(t_2) &= A_T I_1 \left((t_2 - 0t)^3 \cdot e^{-(t_2 - 0t)/t_c} + (t_2 - 2t)^3 \cdot e^{-(t_2 - 2t)/t_c} \cdot -\Gamma_T \cdot (1 - \Gamma_C) \right) \quad (2-36)
 \end{aligned}$$

Sehingga total tegangan surja di titik C atau terminal tegangan V_C pada waktu tertentu dapat dituliskan dalam bentuk persamaan di bawah ini:

$$\begin{aligned}
 i_C(t_n) &= A_T I_1 \cdot [(t_n - 0t)^3 \cdot e^{-(t_n - 0t)/t_c} + (t_n - 2t)^3 \cdot e^{-(t_n - 2t)/t_c} \cdot -\Gamma_T \cdot (1 - \Gamma_C) + \\
 &\quad (t_n - 4t)^3 \cdot e^{-(t_n - 4t)/t_c} \cdot (\Gamma_T^2 \cdot (-\Gamma_C + \Gamma_C^2)) + \dots + (t_n - nt)^3 \cdot e^{-(t_n - nt)/t_c} \cdot (-\Gamma_T^9 (\Gamma_C^8 - \Gamma_C^9))] \quad (2-37)
 \end{aligned}$$

2.7. Arrester atau Penangkap Petir

Arrester adalah alat proteksi yang berfungsi melindungi peralatan sistem tenaga listrik dari tegangan lebih yang disebabkan gelombang tegangan surja, dengan cara membatasi surja tegangan lebih yang datang dan mengalirkannya ke tanah. Berhubung dengan fungsinya itu, ia harus dapat menahan tegangan sistem 50 herz untuk waktu yang tak terbatas dan harus dapat melewatkan arus surja ke tanah tanpa mengalami kerusakan (Hutauruk, 1991:101).

Dalam hal ini digunakan arrester katup jenis saluran yang sesuai digunakan pada sistem tegangan 15 kV sampai 69 kV.

2.7.1. Arrester katup

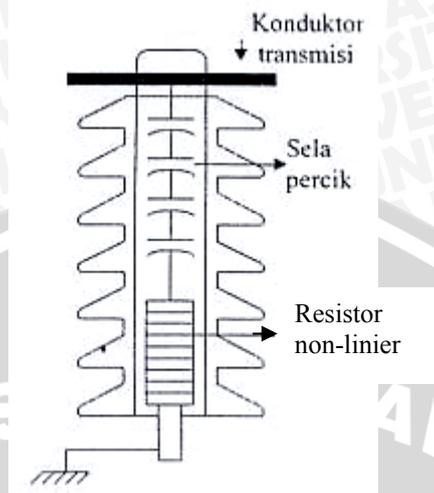
Bentuk konstruksi secara nyata arrester katup dapat diperlihatkan pada Gambar 2.11 di bawah ini:



Gambar 2.11. Bentuk nyata arrester katup
Sumber: Data lapangan

Secara konstruksi arrester katup ini terdiri atas beberapa sela peraik yang terhubung seri dengan tahanan tak linier atau tahanan katup (valve resistor) seperti diperlihatkan pada Gambar 2.12. Tahanan tak linier ini akan bernilai kecil sekali saat terjadi tegangan dan aliran arus yang besar dan akan bernilai besar sekali saat tegangan

kembali pada kondisi normal dan arus berangsur-angsur menuju nol. Sela percik dan tahanan tak linier ditempatkan dalam tabung isolasi tertutup, sehingga kerja arrester ini tidak dipengaruhi oleh udara luar.



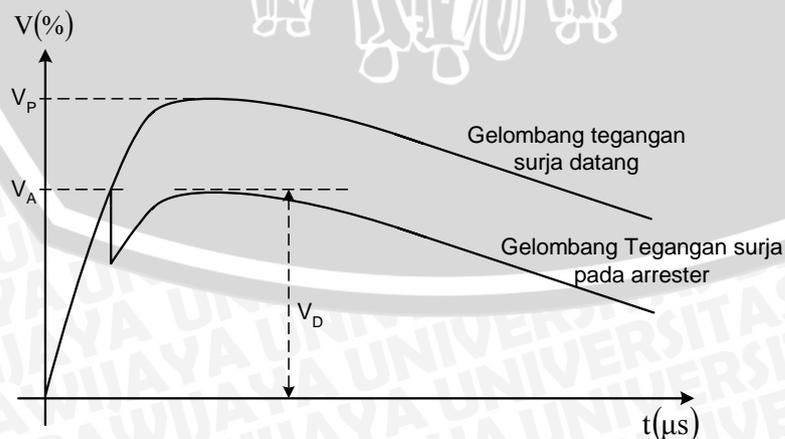
Gambar 2.12. Kontruksi arrester katup
Sumber: Bonggas, 2003:67

2.7.2. Data pengenalan arrester

Pada umumnya pengenalan atau "rating" arrester hanya pengenalan tegangan. Supaya pemakaian arrester lebih efektif maka perlu diketahui hal-hal berikut ini:

- Tegangan pengenalan
- Karakteristik perlindungan atau karakteristik impuls yang menunjukkan batas tegangan percik impuls dan tegangan pelepasan maksimum yang dimiliki oleh arrester.

Bentuk karakteristik impuls dari arrester katup dapat diperlihatkan pada Gambar 2.13 di bawah ini:



Gambar 2.13. Karakteristik impuls arrester katup
 V_p = puncak tegangan surja datang; V_A = tegangan percik arrester;
 V_D = tegangan pelepasan maksimum arrester
Sumber: Penulis

2.7.2.1. Tegangan pengenalan

Tegangan pengenalan atau tegangan dasar (rating) adalah tegangan dimana arrester masih dapat bekerja sesuai dengan karakteristiknya.

2.7.2.2. Tegangan percikan impuls maksimal

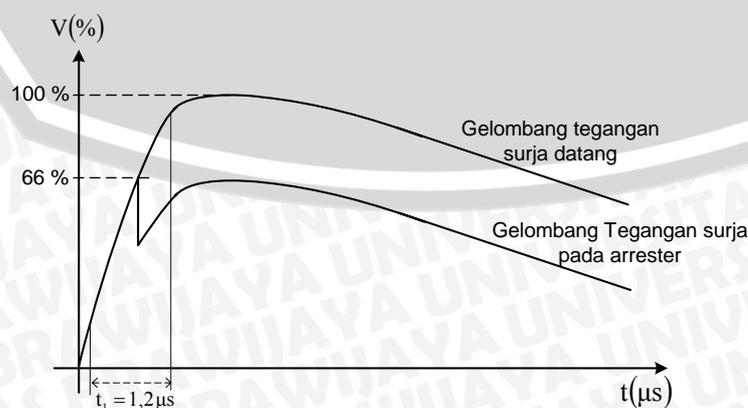
Tegangan percikan impuls/surja maksimal adalah puncak tegangan surja 1,2/50 μ s, yang membuat sela arrester pasti tepercik atau yang membuat arrester pasti bekerja.

Suatu arrester dikatakan aktif atau bekerja bila sela percik dari arrester tepercik oleh tegangan surja yang datang pada arrester tersebut.

Arrester dengan tegangan pengenalan tertentu mempunyai batas tegangan percik impuls, sela percik arrester akan tepercik atau arrester akan bekerja bila batas tegangan percik impulsnya telah dicapai oleh gelombang tegangan surja yang datang pada arrester tersebut.

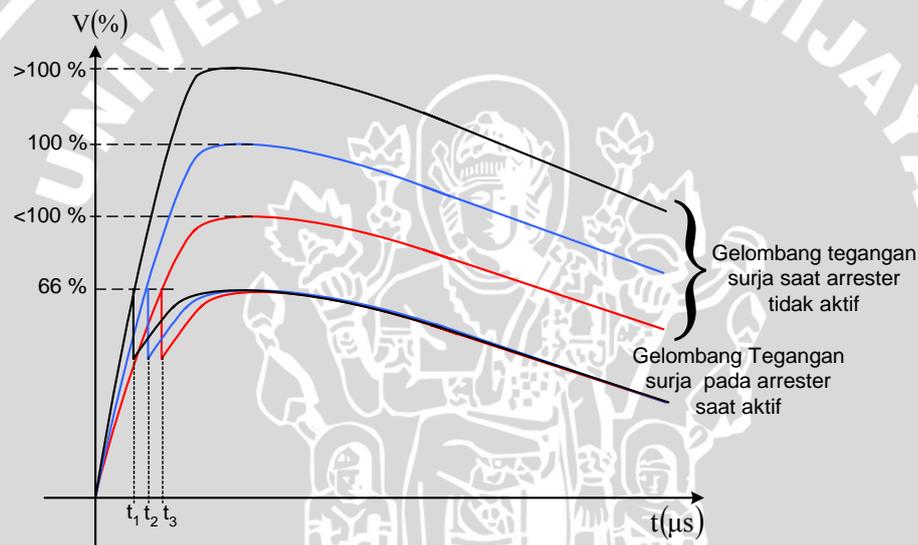
Dari Gambar 2.13 terlihat bahwa arrester akan bekerja pada kecuraman gelombang tegangan surja yang datang dan pada batas tegangan percik impuls dari arrester. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kerja dari arrester pada batas tegangan percik impulsnya didasarkan pada kecuraman gelombang tegangan surja yang datang pada arrester tersebut.

Berdasarkan standar yang ada suatu gelombang tegangan surja tipe 1,2/50 μ s adalah gelombang eksponensial ganda yang mempunyai kecuraman muka gelombang 1,2 μ s dengan puncak tegangan tertentu. Bila suatu gelombang tegangan surja tipe 1,2/50 μ s memiliki puncak tegangan 100 % diberikan pada suatu arrester dengan batas tegangan percik impuls 66 %, maka arrester tersebut akan terpercik setelah arrester merasakan tegangan surja 66 % pada kecuraman muka gelombang tegangan surja 1,2 μ s seperti diperlihatkan dalam Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Kerja arrester
Sumber: Penulis

Gelombang tegangan surja yang merambat pada saluran yang mempunyai nilai impedansi surja, akan dapat mengalami perubahan pada nilai puncak tegangan surjanya yang disebabkan proses penyaluran dan pemantulan gelombang tegangan surja pada saluran tersebut pada waktu tertentu. Perubahan nilai puncak tegangan surja ini akan mempengaruhi kecuraman muka gelombang tegangan surja. Semakin tinggi puncak tegangan surja maka kemiringan muka gelombang akan semakin curam. Bila pada awalnya puncak tegangan surja adalah 100 %, karena proses penyaluran dan pemantulan yang terjadi pada saluran, puncak tegangan surja dapat berubah menjadi di bawah 100 % ($< 100\%$) atau berubah menjadi di atas 100 % ($> 100\%$). Kejadian ini akan mengubah waktu kerja dari arrester yang merasakan gelombang tegangan surja tersebut, yang diperlihatkan dalam Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Kerja arrester pada kecuraman gelombang tegangan surja yang berbeda
Sumber: Penulis

Keterangan:

- Puncak tegangan surja di atas 100 %
- Puncak tegangan surja 100 %
- Puncak tegangan surja di bawah 100 %

66 % : Tegangan percik arrester

Nilai puncak tegangan surja yang tinggi akan menghasilkan nilai efektif gelombang tegangan surja yang besar yang kemudian akan dirasakan oleh arrester. Hal ini secara tidak langsung akan mempengaruhi kemampuan atau ketahanan kerja dari arrester tersebut atau mempengaruhi umur kerja dari arrester.

2.7.2.3. Tegangan pelepasan

Adalah tegangan di terminal arrester saat arrester mengalirkan arus surja atau arus pelepasan.

2.7.2.4. Arus pelepasan

Arus pelepasan adalah arus surja yang dialirkan oleh arester setelah tembusnya sela percik tanpa merusak atau merubah karakteristik dari arester tersebut. Berdasarkan standar yang ada, digunakan arus pelepasan sebesar 10 kA untuk arus surja tipe 8/20 μ s.

2.8. Fuse Cut Out (CO)

Fuse cut out atau disingkat dengan CO adalah pelebur yang berfungsi sebagai pelindung peralatan atau saluran dari arus lebih yang disebabkan hubung singkat antar fasa. Dan dirancang untuk digunakan pada tegangan di atas 600 volt.

Pelebur ini dilengkapi dengan alat pemisah berupa tempat atau tabung pelebur yang terdapat kawat lebur di dalamnya.

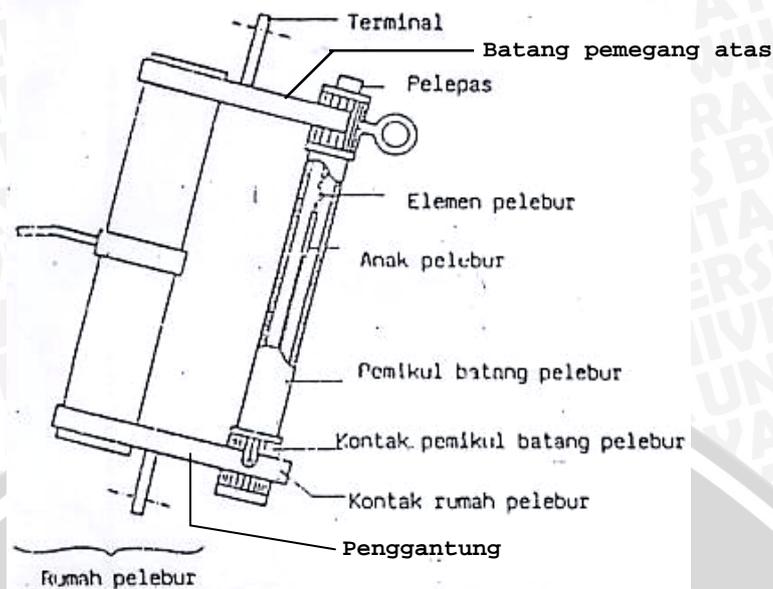
Dalam pemasangannya pelebur ini ditempatkan pada sisi primer (20 kV) dari trafo distribusi. Dengan pertimbangan akan pemakaian yang telah umum dan tidak menimbulkan masalah, maka perlu ditetapkan bahwa bagi SUTM dan pengaman sisi primer trafo distribusi pasangan luar dipergunakan pelebur jenis letupan (*expulsion*) bentuk terbuka (open) dengan rujukan pelengkap dari standar ANSI/NEMA (SPLN 64,1985:7). Bentuk konstruksi pelebur jenis ini diperlihatkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Pelebur jenis letupan (*expulsion*)
Sumber: Data lapangan

Pelebur, dimana busur listrik yang terjadi waktu pemutusan, dipadamkan oleh semprotan gas yang timbul karena panas busur listrik itu sendiri (SPLN 64,1985:1).

Nama bagian-bagian dari pelebur jenis ini diperlihatkan dalam Gambar 2.17 yang merupakan ilustrasi dari Gambar 2.16 di atas.



Gambar 2.17. Bagian-bagian pelebur jenis letupan
Sumber: SPLN 64,1985:4

Pelebur ini umumnya tipe buka jatuh (drop out) dimana tabung pemikul atau pemikul batang pelebur beserta anak peleburnya terlepas dari batang pemegang atas dan jatuh menggantung pada penggantung bila pelebur telah bekerja (kawat lebur putus).

Kawat lebur yang terdiri dari anak pelebur dan elemen pelebur dengan angka pengenal arus tertentu memiliki karakteristik pemutusan yang diwujudkan dalam bentuk kurva karakteristik waktu-arus (kurva waktu-arus).

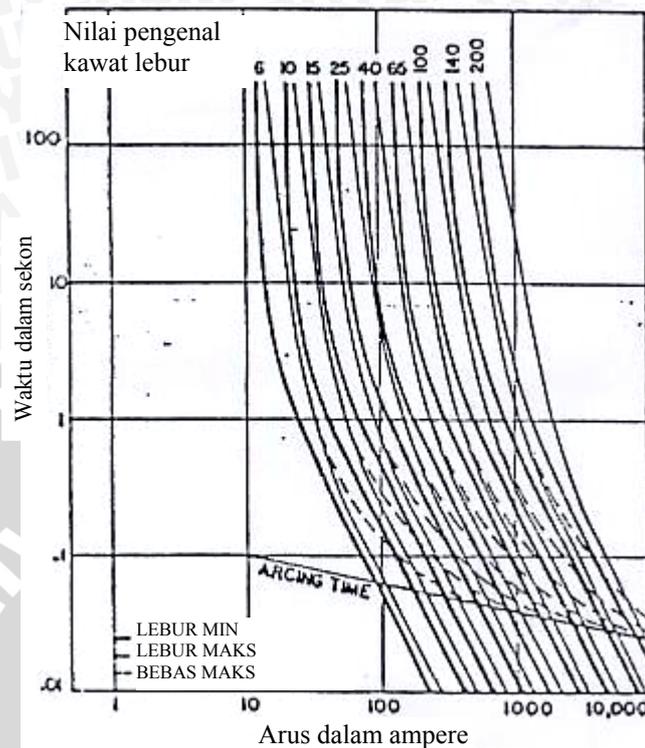
Angka pengenal (rating) arus adalah angka yang memberikan batasan arus pada penampilan kerja dan merupakan dasar dari desain dan pengujiannya.

Kurva waktu-arus atau kurva karakteristik waktu-arus menggambarkan waktu sebagai fungsi dari nilai efektif dari arus perkiraan menurut kondisi operasi yang telah ditentukan (SPLN 64,1985:3). Kurva-kurva waktu-arus dari kawat-kawat lebur Tipe K (cepat) didasarkan standar EEI-NEMA diperlihatkan pada Gambar 2.18.

Pada kurva (Gambar 2.18) terdapat sepasang garis lengkung waktu-arus pada masing-masing angka pengenal arus kawat lebur, yang pertama berada pada sisi bawah adalah lengkung waktu lebur minimum dan kedua, yang berada sejajar di atasnya adalah waktu lebur maksimum. Sedangkan garis putus-putus adalah waktu pembebasan maksimum.

Waktu lebur minimum dan maksimum berturut-turut akan menunjukkan arus pemutusan minimum dan maksimum kawat lebur yang merupakan arus perkiraan minimum dan maksimum yang mampu diputuskan oleh kawat lebur yang ditetapkan menurut kondisi kerja dan karakteristik yang telah ditentukan. Sedangkan waktu

pembebasan adalah waktu yang memastikan bahwa pada saat itu kawat lebur benar-benar mengalami pemutusan.



Gambar 2.18. Kurva-kurva karakteristik waktu-arus minimum dan maksimum kawat-kawat lebur Tipe K EEI-NEMA
Sumber: SPLN 52-3,1983:22

Berdasarkan kurva-kurva karakteristik waktu-arus kawat lebur dari CO, nilai arus leleh minimum dan maksimum pada waktu leleh 600, 300, 10, dan 0,1 sekon dapat dituliskan dalam Tabel 2.1 di bawah ini:

Tabel 2.1. Arus leleh kawat labur Tipe K (cepat)

Rating arus kawat lebur	Arus leleh 300 atau 600 sekon (1)		Arus leleh 10 sekon		Arus leleh 0,1 sekon	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
ampere (A)						
6	12,0	14,4	13,5	20,5	72	80
10	19,5	23,4	22,5	34,0	128	154
15	31,0	37,2	37,0	55	215	258
25	50	60	60	90	350	420
40	80	96	98	146	565	680
65	128	153	159	237	918	1100
100	200	240	258	388	1520	1820
140	310	372	430	650	2470	2970
200	480	576	760	1150	3880	4650

Keterangan: (1) 300 sekon untuk kawat lebur dengan rating arus 100 ampere ke bawah; 600 sekon untuk kawat lebur dengan rating arus 140 dan 200 ampere.

Sumber: Electric Utility Engineers hal 374.

BAB III METODE PENELITIAN

Dalam penyusunan skripsi ini, terdapat metode penelitian yang digunakan untuk memberikan satu alur kerangka berpikir dalam bentuk langkah-langkah yang ditempuh untuk melakukan penelitian, yaitu meliputi:

- a. Studi literatur
- b. Pengambilan data
- c. Analisis data
- d. Menarik kesimpulan

3.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan pengetahuan dan penguasaan tentang teori-teori yang terkait dengan hal-hal berikut:

- a. Gelombang berjalan dari surja petir
- b. Metode pantulan berulang dari gelombang berjalan
- c. Pemilihan arrester dan pelebur

3.2. Pengambilan Data

Data-data yang dipergunakan dalam skripsi ini adalah milik PT. PLN APJ (Area Pelayanan dan Jaringan) Malang, berupa data-data yang berhubungan dengan Gardu Transformator Tiang (GTT) pada wilayah Malang. Data-data tersebut meliputi:

- a. Bentuk pengawatan dari sistem penempatan arrester.
- b. Jenis dan panjang kawat yang digunakan dalam sistem pengawatan arrester.
- c. Jari-jari kawat dan ketinggian kawat di atas tanah, yang digunakan dalam pengawatan arrester.
- d. Spesifikasi arrester dan pelebur/CO yang digunakan dalam sistem penempatan arrester.

3.3. Analisis Data

Data-data yang telah didapatkan digunakan sebagai bahan analisis terhadap masing-masing sistem penempatan arrester sehingga tujuan dari penyusunan skripsi dapat dicapai. Analisis atau penelitian yang dilakukan meliputi hal-hal berikut:

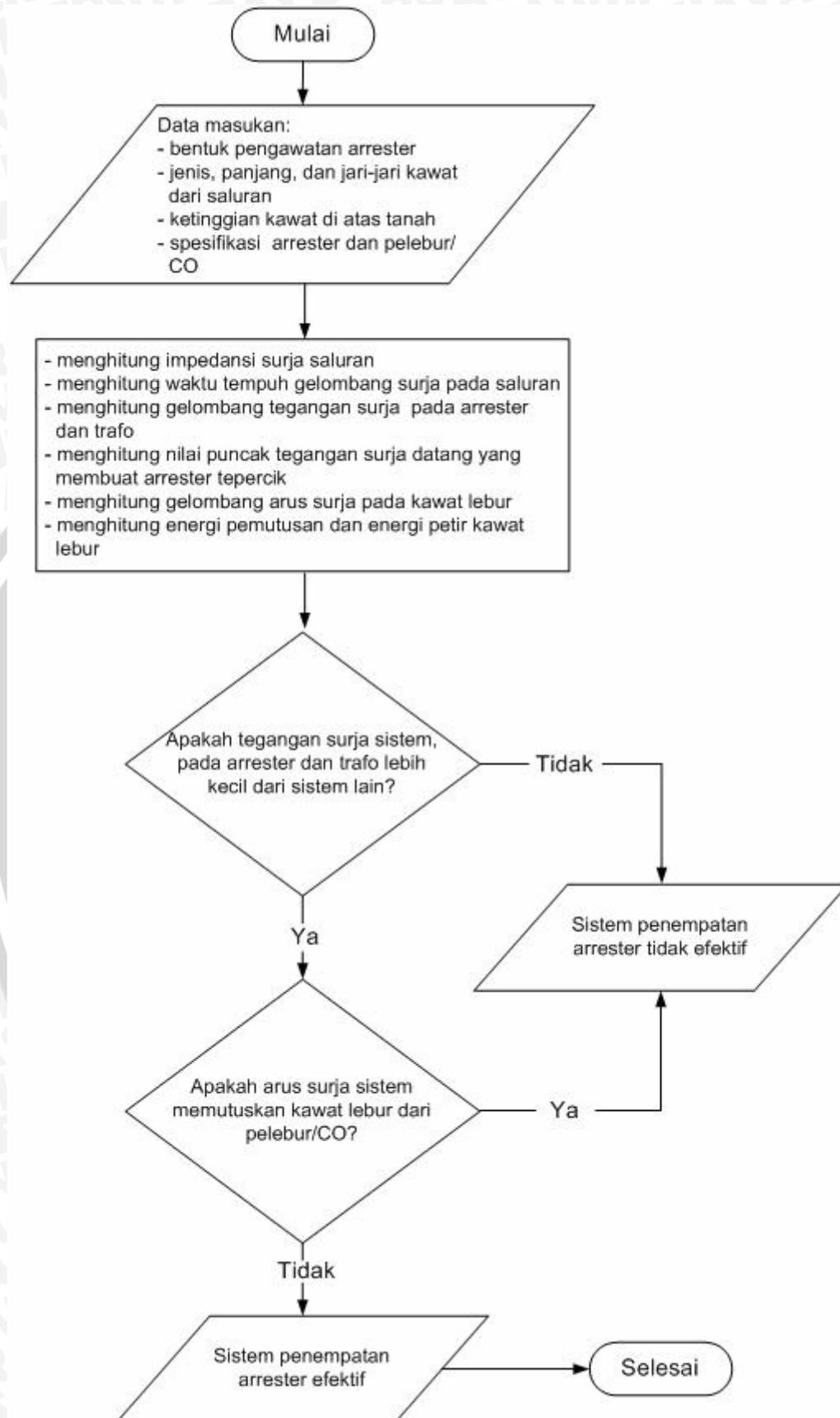
- a. Menghitung impedansi surja saluran udara yang didasarkan pada ketinggian dan jari-jari kawat dari saluran. Kemudian menghitung waktu tempuh gelombang

- surja dengan kecepatan rambat tertentu yang merambat pada kawat yang memiliki panjang tertentu sesuai keadaan di lapangan.
- Menghitung besarnya gelombang tegangan surja sebagai fungsi waktu yang terjadi pada arrester dan trafo dengan metode pantulan berulang pada masing-masing sistem penempatan arrester. Dan kemudian menentukan tegangan surja tertinggi yang terjadi pada arrester dan trafo tersebut.
 - Menghitung nilai puncak minimal tegangan surja datang pada sistem yang membuat arrester bekerja atau tepercik pada masing-masing sistem penempatan arrester.
 - Menentukan sistem penempatan arrester yang mempunyai nilai tegangan surja yang kecil pada arrester dan trafo.
 - Menghitung besarnya gelombang arus surja sebagai fungsi waktu yang terjadi pada kawat lebur dari CO atau pelebur dengan metode pantulan berulang pada masing-masing sistem penempatan arrester.
 - Menghitung besarnya energi pemutusan kawat lebur yang didasarkan pada kurva karakteristik waktu-arus dari kawat lebur dan menghitung energi petir yang timbul pada kawat lebur yang didasarkan pada besarnya arus surja yang terjadi pada kawat lebur tersebut.
 - Menentukan kemampuan kawat pelebur dalam menahan arus surja petir dengan cara membandingkan energi petir yang timbul pada kawat lebur dengan energi pemutusan kawat lebur tersebut.

Langkah-langkah penelitian yang digunakan untuk mendapatkan sistem penempatan arrester yang efektif sebagai proteksi trafo distribusi 20 kV pada GTT ini selanjutnya dapat digambarkan dalam diagram alur berikut ini (Gambar 3.1):

3.4. Menarik Kesimpulan

Selanjutnya hasil perhitungan dan analisis yang mengacu pada tujuan penelitian disimpulkan, yaitu untuk mendapatkan sistem penempatan arrester yang efektif sebagai proteksi trafo distribusi 20 kV pada gardu trafo tiang. Kesimpulan dari penelitian ini disajikan sebagai penutup dalam BAB V bersama saran dari penulis.



Gambar 3.1. Diagram alur langkah-langkah penelitian

Sumber: Penulis

BAB IV DATA DAN ANALISIS

Sistem penempatan arrester yang efektif adalah sistem yang berhubungan dengan cara pengawatan arrester dengan peralatan lain (trafo dan pelebur/CO) yang memiliki tujuan untuk mendapatkan efektivitas proteksi pada trafo dari tegangan lebih yang disebabkan surja petir.

Dan bila pada sistem penempatan arrester tersebut terjadi suatu gelombang surja petir saat arrester belum atau tidak aktif, tegangan surja yang terjadi pada trafo dan arrester harus bernilai sekecil mungkin. Selain itu kontinuitas penyaluran daya listrik dari sistem saat terjadi gangguan tegangan lebih akibat surja petir harus tetap terjaga, hal ini dipengaruhi oleh kemampuan kawat lebur dari CO yang ikut terpasang dalam suatu sistem penempatan arrester saat dialiri arus surja petir. Tentunya diinginkan kawat lebur tidak mengalami pemutusan saat dialiri arus surja tersebut. Dengan memperhitungkan dan membandingkan besarnya energi pemutusan kawat lebur dan besarnya energi petir yang timbul pada kawat lebur, maka akan didapatkan kemampuan kawat lebur dalam menahan arus surja petir yang mengalir pada kawat lebur tersebut.

Dalam mengevaluasi sistem penempatan arrester sebagai proteksi trafo terhadap tegangan lebih yang disebabkan surja petir pada GTT perlu mempertimbangkan beberapa hal yang mempengaruhi besarnya tegangan surja yang terjadi pada trafo dan arrester serta besarnya arus surja yang timbul pada kawat lebur dari CO, yaitu meliputi:

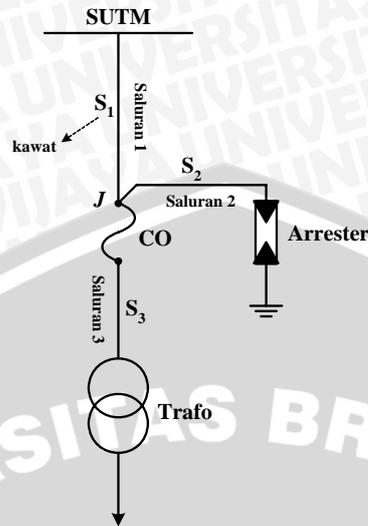
- a. Sistem pengawatan arrester: ini akan menunjukkan bentuk rangkaian dan panjang kawat yang dipergunakan dalam sistem penempatan arrester. Panjang kawat akan menentukan waktu yang dibutuhkan gelombang surja untuk merambat pada kawat tersebut.
- b. Jenis, jari-jari kawat dan ketinggian kawat di atas tanah yang dipergunakan sebagai pengawatan: ini menentukan besarnya impedansi surja dan koefisien pantulan tegangan dan arus surja dari kawat tersebut.

4.1. Pengawatan Arrester

Pengawatan arrester merupakan suatu aturan dalam pemasangan arrester dengan tujuan agar arrester dapat berfungsi dengan baik sebagai alat proteksi peralatan dari tegangan lebih akibat surja petir baik dari segi teknis maupun dari segi kelistrikan.

4.1.1. Sistem-1

Pengawatan pada sistem-1 seperti terlihat pada Gambar 4.1 di bawah ini:

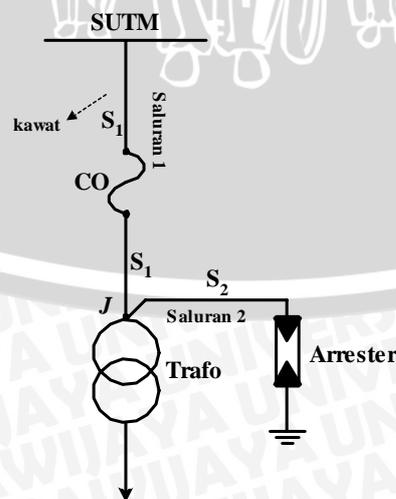


Gambar 4.1. Pengawatan sistem-1
Sumber: Data lapangan

Pada sistem ini, CO dan trafo yang terhubung seri, terangkai secara paralel dengan arrester pada titik simpul J. Saluran-1 berupa kawat dengan panjang $S_1 = 1$ meter yang menghubungkan titik J dengan SUTM. CO terhubung langsung dengan titik J tanpa melalui kawat, sedangkan arrester dihubungkan ke titik J melalui kawat dengan panjang $S_2 = 0,5$ meter. Trafo dihubungkan seri dengan CO melalui kawat dengan panjang $S_3 = 1,5$ meter.

4.1.2. Sistem-2

Pengawatan sistem-2 diperlihatkan pada Gambar 4.2 di bawah ini:

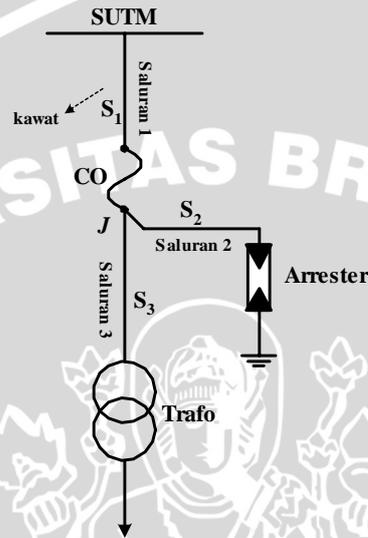


Gambar 4.2. Pengawatan sistem-2
Sumber: Data lapangan

CO dihubungkan pada SUTM dan titik simpul J melalui kawat yang masing-masing dengan panjang $S_1 = 1$ meter sedangkan trafo secara langsung tanpa melalui kawat dan arrester terhubung pada titik simpul J melalui kawat dengan panjang $S_2 = 0,5$ meter. Titik simpul J menghubungkan paralel trafo dengan arrester.

4.1.3. Sistem-3

Pengawatan sistem-3 diperlihatkan pada Gambar 4.3 di bawah ini:

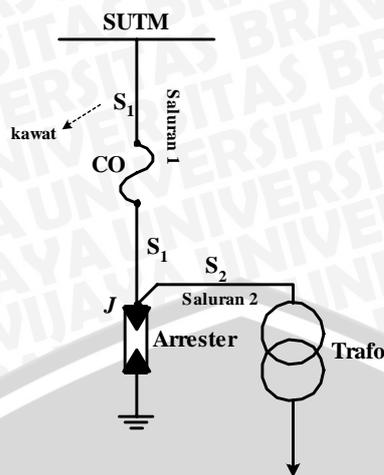


Gambar 4.3. Pengawatan sistem-3
Sumber: Data lapangan

CO dihubungkan pada SUTM melalui kawat dengan panjang $S_1 = 1$ meter dan terhubung pada titik simpul J tanpa melalui kawat. Arrester dan trafo terhubung pada titik simpul melalui kawat dengan panjang berturut-turut $S_2 = 0,5$ meter dan $S_3 = 2$ meter. Titik simpul J menghubungkan paralel trafo dan arrester.

4.1.4. Sistem-4

Pengawatan sistem-4 diperlihatkan pada Gambar 4.4 di bawah ini:



Gambar 4.4. Pengawatan sistem-4
Sumber: Data lapangan

CO dihubungkan pada SUTM dan titik simpul J melalui kawat dengan panjang masing-masing $S_1 = 0,75$ meter sedangkan arrester secara langsung terhubung pada titik J tanpa melalui kawat dan trafo terhubung pada titik J melalui kawat dengan panjang $S_2 = 0,5$ meter. Titik simpul J menghubungkan paralel trafo dan arrester.

4.2. Tegangan dan Arus Surja Sistem Penempatan Arrester

Kawat yang digunakan sebagai pengawatan dari keempat sistem penempatan arrester menggunakan penghantar jenis AAAC dengan luas penampang (A) 70 mm^2 , ketinggian kawat di atas tanah (h) 850 cm dan jari-jari (r) kawat adalah:

$$r = \sqrt{\frac{70}{\pi}} = 4,72 \text{ mm} = 0,472 \text{ cm}$$

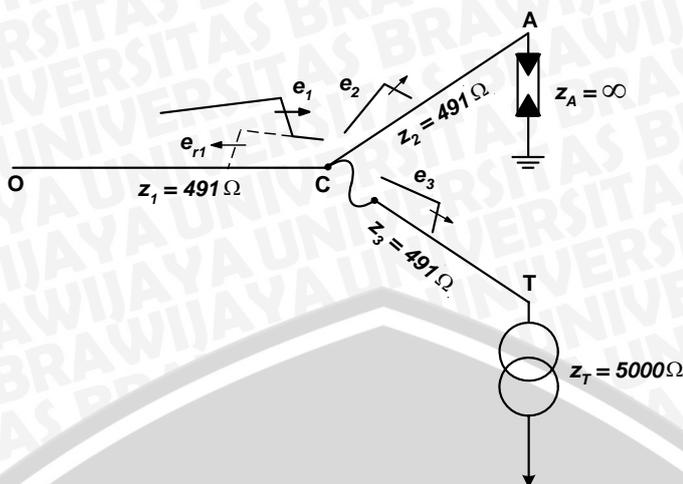
sehingga berdasarkan Persamaan (2-6) impedansi surja kawat udara adalah

$$\begin{aligned} z &= 60 \ln \frac{2h}{r} \\ &= 60 \ln \frac{2.850}{0,472} \\ z &= 491 \Omega \end{aligned}$$

sedangkan impedansi surja transformator diambil $z_T = 5000 \Omega$

4.2.1. Sistem-1

Sistem-1 yang diperlihatkan pada Gambar 4.1 dapat digambarkan dengan lebih sederhana seperti di bawah ini (Gambar 4.5):



Gambar 4.5. Rangkaian sederhana sistem-1

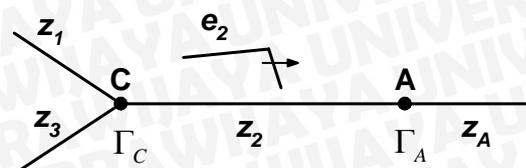
Sistem ini menunjukkan rangkaian dua percabangan saluran pada struktur yang seragam dalam tiga bagian dengan nilai impedansi surja $z_1 = z_2 = z_3 = 491\Omega$. Dalam hubungan dua percabangan saluran-2 dan saluran-3 yang memiliki nilai impedansi surja z_2 dan z_3 yang sama sehingga dalam suatu hubungan paralel nilai impedansi menjadi setengahnya. Sebuah gelombang datang e_1 dengan nilai puncak $E_1 = 100\%$ merambat pada saluran-1, setelah sampai pada titik C gelombang dibagi ke dalam dua percabangan saluran. Sehingga gelombang tegangan pada saluran-2 (e_2) yang menuju arrester dan saluran-3 (e_3) yang menuju trafo berdasarkan Persamaan (2-19) akan memiliki amplitudo sebesar:

$$E_2 = E_3 = \frac{2}{3} E_1 \tag{4-1}$$

Nilai tegangan surja fungsi waktu yang akan diamati adalah pada arrester di titik A dan pada trafo di titik T. Sedangkan nilai arus surja fungsi waktu yang akan diamati adalah pada saluran-3 yang menjadi tempat terpasangnya CO.

4.2.1.1. Tegangan surja pada arrester di titik A

Untuk memudahkan, Gambar 4.5 diwujudkan dalam rangkaian pengganti sebagaimana berikut ini:



Gambar 4.6. Rangkaian pengganti sistem-1

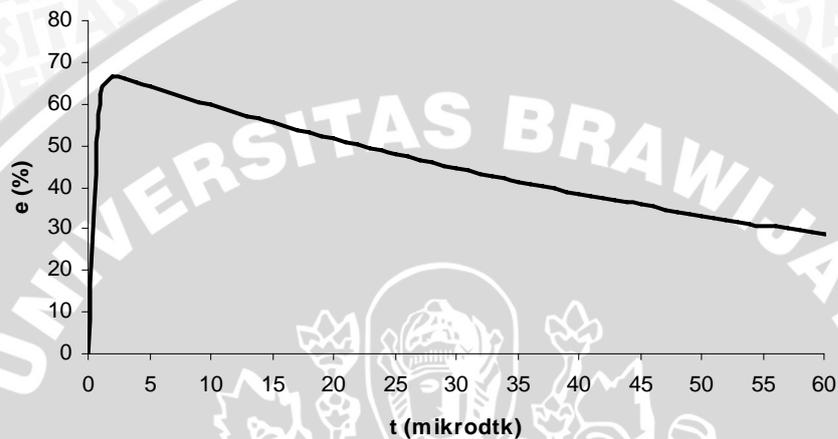
Gelombang e_2 sebagai gelombang datang pada saluran-2 memiliki amplitudo sebesar:

$$E_2 = \frac{2}{3}100\% = 66,67\%$$

dan gelombang e_2 fungsi waktu didasarkan pada Persamaan (2-1), adalah:

$$e_2(t) = Av.E_2(1 - e^{-t/t_a})e^{-t/t_b} \quad (4-2)$$

Bentuk gelombang e_2 diperlihatkan pada Gambar 4.7. di bawah ini:



Gambar 4.7. Gelombang tegangan surja datang e_2 pada saluran-2 untuk sistem-1

Dengan kecepatan rambat gelombang $v = 3.10^8$ m/s maka perjalanan gelombang surja dari titik C ke titik A yang berjarak $S_2 = 0,5$ m membutuhkan waktu

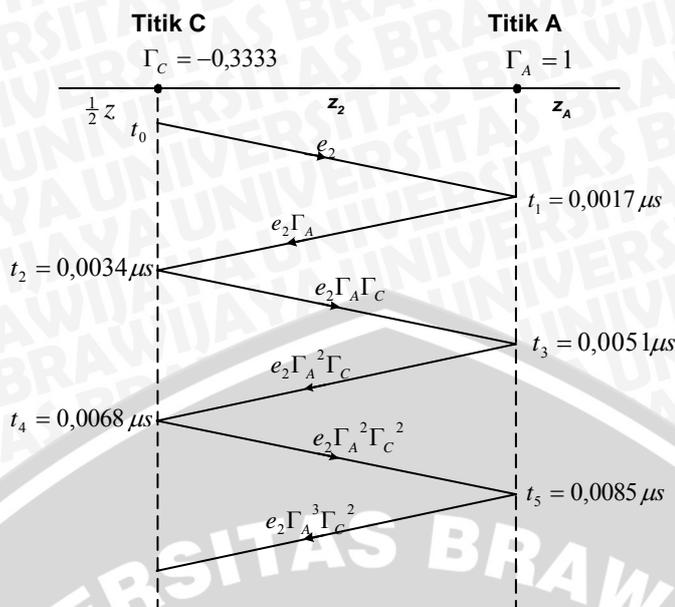
$$t = \frac{0,5}{3.10^8} = 0,0017 \mu s .$$

Dalam hal ini arrester dianggap tidak aktif sehingga diasumsikan impedansi surja arrester $z_A = \infty$. Koefisien pantulan tegangan di titik C dan titik A didasarkan Persamaan (2-14) berturut-turut adalah

$$\Gamma_C = \frac{\frac{1}{2}z - z_2}{\frac{1}{2}z + z_2} = \frac{\frac{1}{2}491 - 491}{\frac{1}{2}491 + 491} = -\frac{1}{3} \quad \text{dan} \quad \Gamma_A = \frac{z_A - z_2}{z_A + z_2} = \frac{\infty - 491}{\infty + 491} \approx 1$$

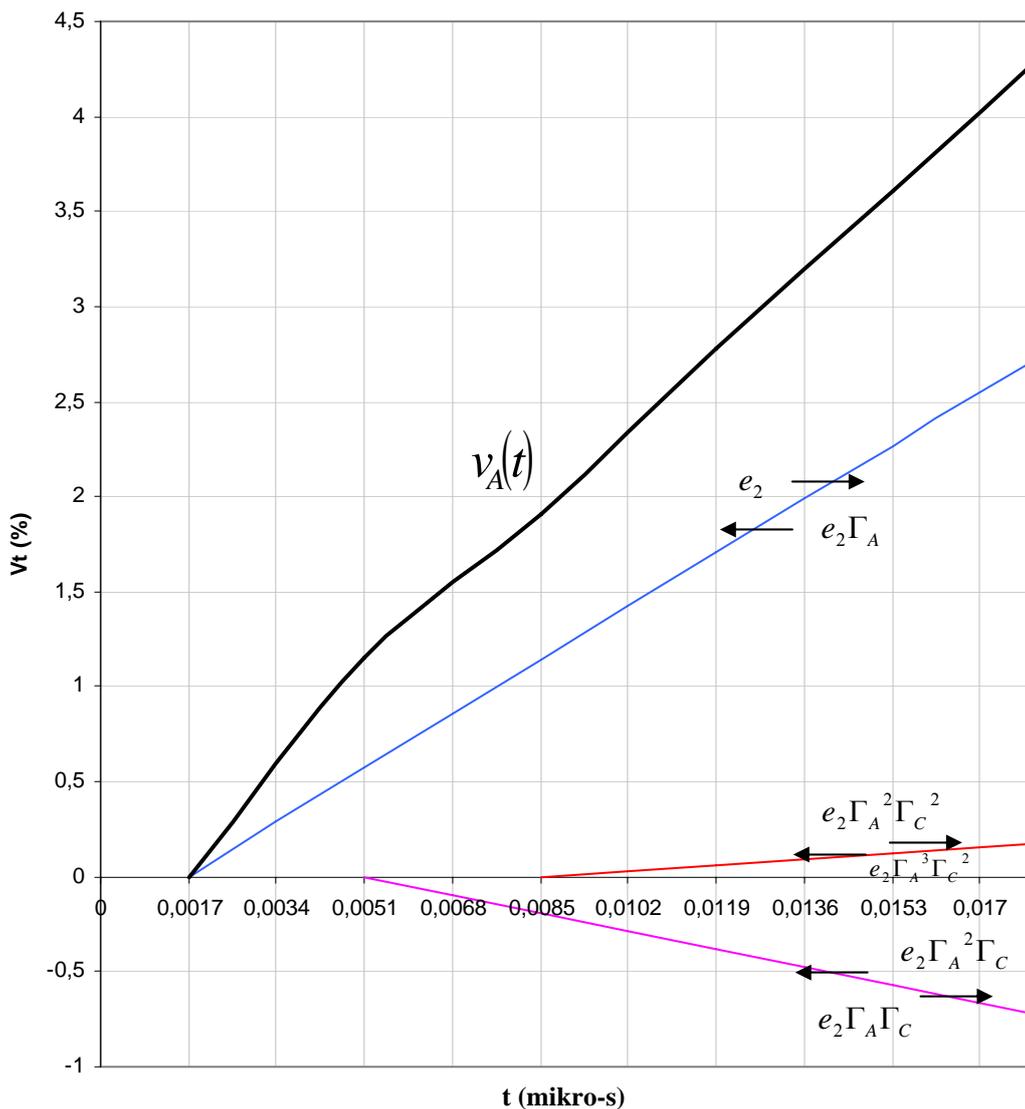
Nilai tegangan titik A sebagai fungsi waktu $[v_A(t)]$ ditentukan dengan metode pantulan berulang. Proses pantulan gelombang surja dapat digambarkan dalam sebuah diagram tangga di bawah ini (Gambar 4.8).





Gambar 4.8. Diagram Tangga Gelombang tegangan titik C dan A untuk sistem-1

Diagram ini memperlihatkan gelombang datang e_2 dengan nilai puncak $E_2 = 66,67\%$ yang datang pada saluran-2 dan kemudian dipantulkan setelah sampai pada titik A dan C. Gelombang e_2 yang dipantulkan ditandai dengan adanya perkalian antara e_2 dengan koefisien pantulan tegangan, perkalian ini menghasilkan gelombang-gelombang baru ($e_2 \Gamma_A$, $e_2 \Gamma_A \Gamma_C$, $e_2 \Gamma_A^2 \Gamma_C$, $e_2 \Gamma_A^2 \Gamma_C^2$, $e_2 \Gamma_A^3 \Gamma_C^2$, dan seterusnya) bentuk eksponensial ganda sebagaimana gelombang datang. Gelombang e_2 dengan masukan Γ_A sebagai pengalinya menandakan gelombang surja yang dipantulkan dari titik A sedangkan gelombang e_2 dengan masukan Γ_C sebagai pengalinya menandakan gelombang surja yang dipantulkan dari titik C.



Grafik 4.1. Distribusi tegangan surja pada arrester di titik A pada waktu $t = 0$ sampai $t = 0,017 \mu s$ untuk sistem-1

Distribusi tegangan surja yang terjadi di titik A [$v_A(t)$] dari $t = 0$ sampai $t = 0,017 \mu s$ akibat proses perjalanan gelombang datang e_2 dapat diamati pada Grafik 4.1 di atas.

Proses perjalanan gelombang e_2 sebagai gelombang datang pada saluran-2 adalah sebagai berikut:

Gelombang e_2 dengan tepian ujung gelombang yang bernilai 0 di titik C akan sampai pada titik A saat $t_1 = 0,0017 \mu s$, sehingga di titik A saat t_1 akan merasakan tegangan surja sebesar 0% yang ditentukan berdasarkan persamaan (2-26), menjadi:

$$v_A(t_1) = e_2(t_1 - 0,0017 \cdot 10^{-6}) + e_2(t_1 - 0,0017 \cdot 10^{-6}) \Gamma_A$$

karena nilai $\Gamma_A = 1$ maka nilai ini dapat diabaikan, sehingga persamaan menjadi:

$$\begin{aligned} v_A(t_1) &= 2.e_2(t_1 - 0,0017.10^{-6}) \\ &= 2.A_v.E_2 \cdot \left(1 - e^{-(t_1 - 0,0017.10^{-6})/t_a}\right) e^{-(t_1 - 0,0017.10^{-6})/t_b} \\ v_A(t_1) &= 0\% \end{aligned}$$

Pada waktu ini juga dihasilkan gelombang pantul di titik A dengan amplitudo sebesar $\Gamma_A.E_2 = 66,67\%$ yang mengarah ke titik C dengan arah mundur, tepian ujung gelombang ini berada pada titik A dan sampai di titik C saat $t_2 = 0,0034 \mu s$ yang menimbulkan gelombang pantul di titik C dengan amplitudo sebesar $\Gamma_C.66,67 = -22,22\%$ yang mengarah ke titik A. Saat t_2 tegangan surja di titik A adalah sebesar $0,57577\%$. Kemudian saat $t_3 = 0,0051 \mu s$ gelombang pantul dari titik C sampai pada titik A yang menimbulkan gelombang pantul dengan amplitudo sebesar $\Gamma_A.-22,22 = -22,22\%$ yang mengarah ke titik C, bersamaan dengan ini tegangan surja di titik A adalah $1,1491\%$. Tegangan surja di titik A saat $t_2 = 0,0034 \mu s$ dan $t_3 = 0,0051 \mu s$ didapatkan berdasarkan perhitungan di bawah ini:

- saat $t_2 = 0,0034 \mu s$

$$\begin{aligned} v_A(t_2) &= 2.e_2(t_2 - 0,0017.10^{-6}) \\ &= 2.A_v.E_2 \cdot \left(1 - e^{-(t_2 - 0,0017.10^{-6})/t_a}\right) e^{-(t_2 - 0,0017.10^{-6})/t_b} \\ v_A(t_2) &= 0,57577\% \end{aligned}$$

- saat $t_3 = 0,0051 \mu s$

$$\begin{aligned} v_A(t_3) &= 2.e_2(t_3 - 0,0017.10^{-6}) + 2.e_2(t_3 - 0,0051.10^{-6})\Gamma_C \\ &= 2.A_v.E_2 \cdot \left(1 - e^{-(t_3 - 0,0017.10^{-6})/t_a}\right) e^{-(t_3 - 0,0017.10^{-6})/t_b} + \\ &\quad 2.A_v.E_2 \cdot \left(1 - e^{-(t_3 - 0,0051.10^{-6})/t_a}\right) e^{-(t_3 - 0,0051.10^{-6})/t_b} \\ v_A(t_3) &= 1,1491\% \end{aligned}$$

Secara umum total tegangan surja di titik A dapat dihitung berdasarkan Persamaan (2-28) dan dapat dituliskan kembali menjadi seperti berikut ini:

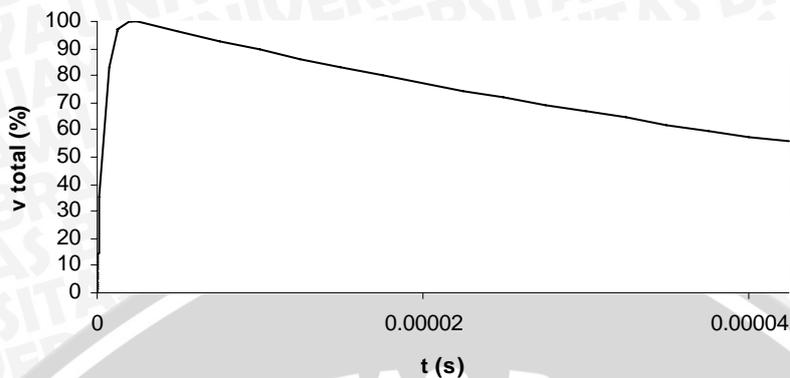
$$v_A(t_n) = A_v E_2 \cdot \left[\left(1 - e^{-(t_n - t)/t_a}\right) e^{-(t_n - t)/t_b} \cdot (1 + \Gamma_A) + \left(1 - e^{-(t_n - 3t)/t_a}\right) e^{-(t_n - 3t)/t_b} \cdot \Gamma_C (\Gamma_A + \Gamma_A^2) + \right. \\ \left. \left(1 - e^{-(t_n - 5t)/t_a}\right) e^{-(t_n - 5t)/t_b} \cdot \Gamma_C^2 (\Gamma_A^2 + \Gamma_A^3) + \dots + \left(1 - e^{-(t_n - nt)/t_a}\right) e^{-(t_n - nt)/t_b} \cdot \Gamma_C^8 (\Gamma_A^8 + \Gamma_A^9) \right]$$

atau

$$v_A(t_n) = 2.A_v E_2 \cdot \left[\left(1 - e^{-(t_n - t)/t_a}\right) e^{-(t_n - t)/t_b} + \left(1 - e^{-(t_n - 3t)/t_a}\right) e^{-(t_n - 3t)/t_b} \cdot \Gamma_C + \right. \\ \left. \left(1 - e^{-(t_n - 5t)/t_a}\right) e^{-(t_n - 5t)/t_b} \cdot \Gamma_C^2 + \dots + \left(1 - e^{-(t_n - nt)/t_a}\right) e^{-(t_n - nt)/t_b} \cdot \Gamma_C^8 \right] \quad (4-3)$$

Total tegangan surja di titik A dari $t = 0$ s hingga $t = 4,25.10^{-6}$ s diperlihatkan dalam tabel pada Lampiran 1 dan Grafik 4.2. Total tegangan surja di titik A merupakan

penjumlahan gelombang tegangan e_2 dengan gelombang tegangan surja yang timbul akibat proses pantulan di titik A dan C pada beberapa waktu t .

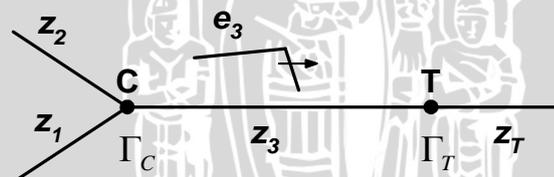


Grafik 4.2. Total tegangan surja pada arrester di titik A untuk sistem-1

Tegangan surja tertinggi di titik A, yaitu sebesar $V_A = 99,9888 \%$ yang terjadi pada waktu $t = 2,0893 \cdot 10^{-6} \text{s}$ atau $2,0893 \mu\text{s}$. Dari Grafik 4.2 terlihat bahwa setelah tegangan surja mencapai nilai puncaknya pada waktu yang sesaat, pada saat-saat berikutnya tegangan surja akan terus mengalami penurunan.

4.2.1.2. Tegangan surja pada trafo di titik T

Rangkaian pengganti dari sistem-1 menjadi seperti di bawah ini:



Gambar 4.9. Rangkaian pengganti sistem-1

Gelombang e_3 sebagai gelombang datang pada saluran-3 dengan amplitudo E_3 yang besarnya, yaitu:

$$E_3 = \frac{2}{3} 100\% = 66,67\%$$

dan gelombang e_3 fungsi waktunya adalah

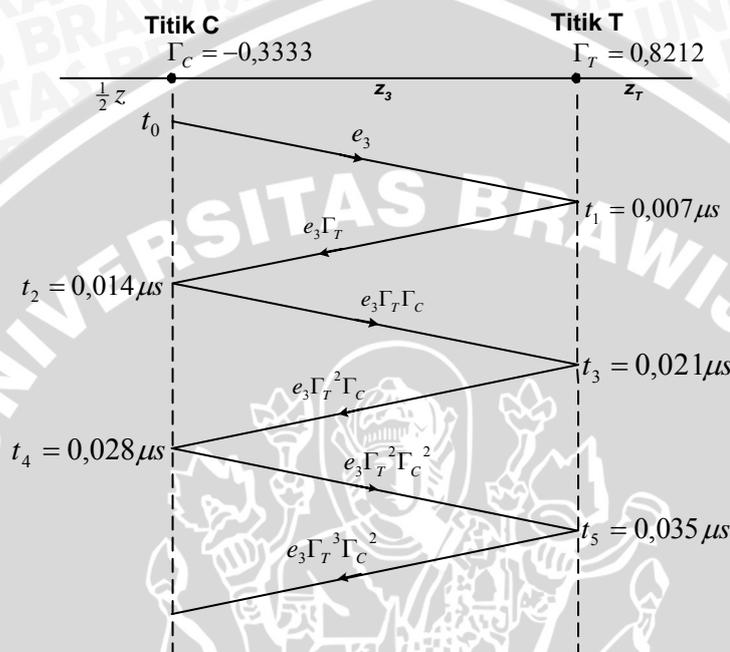
$$e_3(t) = Av.E_3(1 - e^{-t/t_a})e^{-t/t_b} \quad (4-4)$$

Perjalanan gelombang e_3 dari titik C ke titik T yang berjarak $S = 2 \text{ m}$ (panjang saluran + panjang kawat lebur), membutuhkan waktu $t = \frac{2}{3 \cdot 10^8} = 0,007 \mu\text{s}$.

Koefisien pemantulan tegangan di titik C dan titik T berturut-turut adalah

$$\Gamma_C = \frac{\frac{1}{2}z - z_3}{\frac{1}{2}z + z_3} = \frac{\frac{1}{2}491 - 491}{\frac{1}{2}491 + 491} = -\frac{1}{3} \quad \text{dan} \quad \Gamma_T = \frac{z_T - z_3}{z_T + z_3} = \frac{5000 - 491}{5000 + 491} = 0,8212$$

Proses pantulan gelombang e_3 dapat digambarkan dalam sebuah diagram tangga di bawah ini (Gambar 4.10).

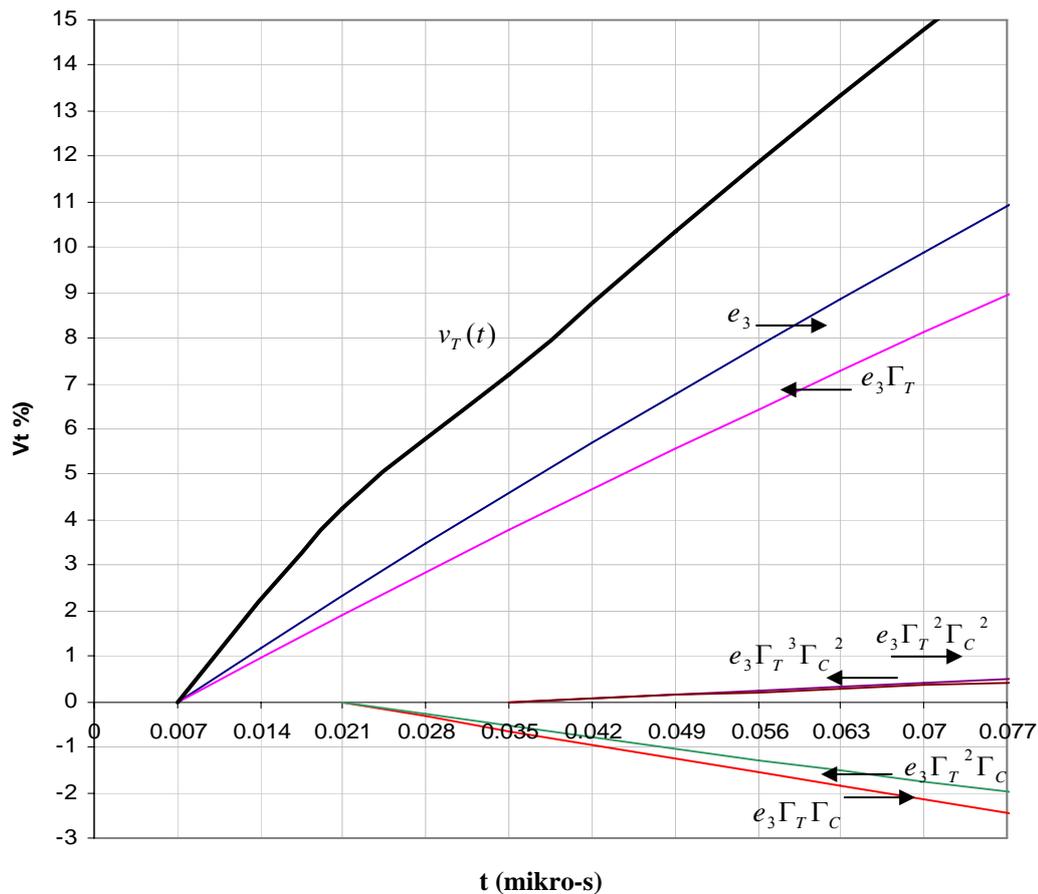


Gambar 4.10. Diagram tangga gelombang tegangan surja titik C dan T untuk sistem-1

Diagram ini memperlihatkan gelombang datang e_3 dengan nilai puncak $E_3 = 66,67\%$ yang datang dan kemudian dipantulkan secara berulang setelah sampai di titik T dan C. Gelombang e_3 yang dipantulkan ditandai dengan adanya perkalian gelombang e_3 dengan koefisien pantulan tegangan, perkalian ini menghasilkan gelombang-gelombang baru ($e_3\Gamma_T$, $e_3\Gamma_T\Gamma_C$, $e_3\Gamma_T^2\Gamma_C$, $e_3\Gamma_T^2\Gamma_C^2$, $e_3\Gamma_T^3\Gamma_C^2$, dan seterusnya) dengan bentuk gelombang yang sama sebagaimana gelombang datang. Gelombang e_3 dengan masukan Γ_T sebagai koefisien pantulannya menandakan gelombang surja yang dipantulkan dari titik T sedangkan gelombang e_3 dengan masukan Γ_C sebagai koefisien pantulannya menandakan gelombang surja yang dipantulkan dari titik C.

Distribusi tegangan surja di titik T saat $t = 0,007 \mu s$ sampai $t = 0,077 \mu s$ perubahan waktu (t) dapat diamati pada Grafik 4.3 di bawah ini:





Grafik 4.3. Distribusi tegangan surja di titik T pada waktu $t = 0$ hingga $t = 0,077 \mu\text{s}$ untuk sistem-1

Proses perjalanan gelombang e_3 sebagai gelombang datang pada saluran-3, seperti halnya perjalanan gelombang e_2 pada saluran-2. Perbedaan terletak pada koefisien pantulan tegangan pada titik T (Γ_T). Sehingga gelombang e_3 yang sampai pada titik T dengan arah maju akan menghasilkan gelombang pantulan yang besar amplitudonya adalah $\Gamma_T \cdot E_3 = 54,749\%$ yang menuju ke titik C, gelombang ini selanjutnya akan dipantulkan dalam beberapa waktu t sehingga memunculkan gelombang-gelombang pantul baru setelah gelombang surja dipantulkan dari titik C atau setelah dipantulkan dari titik T. Besarnya tegangan di titik T [$v_T(t)$] saat $t = 0,007 \mu\text{s}$ dan $0,021 \mu\text{s}$ didapatkan dengan perhitungan yang didasarkan pada Persamaan (2-26) dan (2-27) seperti di bawah ini:

- saat $t_1 = 0,007 \mu\text{s}$

$$v_T(t_1) = e_3(t_1 - 0,007 \cdot 10^{-6}) + e_3(t_1 - 0,007 \cdot 10^{-6})\Gamma_T$$

$$v_T(t_1) = e_3(t_1 - 0,007.10^{-6})x(1 + \Gamma_T)$$

$$= Av.E_3 \cdot (1 - e^{-(t_1 - 0,007.10^{-6})/t_a}) e^{-(t_1 - 0,007.10^{-6})/t_b} x(1 + \Gamma_T)$$

$$v_T(t_1) = 0\%$$

- saat $t_3 = 0,021 \mu s$

$$v_T(t_3) = e_3(t_3 - 0,007.10^{-6})x(1 + \Gamma_T) + .e_3(t_3 - 0,0014.10^{-6})x\Gamma_C(\Gamma_T + \Gamma_T^2)$$

$$= Av.E_3 \cdot (1 - e^{-(t_3 - 0,007.10^{-6})/t_a}) e^{-(t_3 - 0,007.10^{-6})/t_b} \cdot (1 + \Gamma_T) +$$

$$Av.E_3 \cdot (1 - e^{-(t_3 - 0,014.10^{-6})/t_a}) e^{-(t_3 - 0,014.10^{-6})/t_b} \cdot \Gamma_C(\Gamma_T + \Gamma_T^2)$$

$$v_T(t_3) = 4,25249\%$$

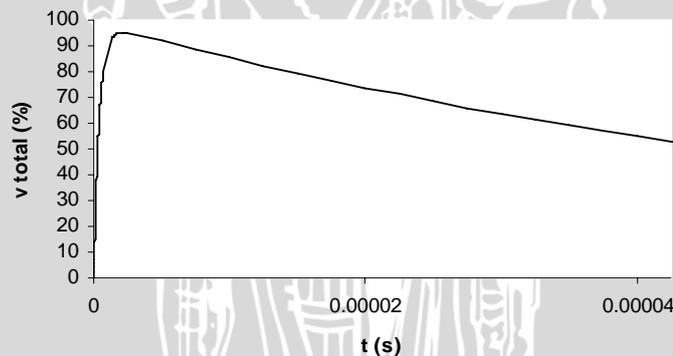
Penentuan total tegangan surja di titik T secara umum didasarkan pada Persamaan (2-28) dan dapat dituliskan menjadi seperti berikut ini:

$$v_T(t_n) = Av.E_3 \cdot [(1 - e^{-(t_n - t)/t_a}) e^{-(t_n - t)/t_b} \cdot (1 + \Gamma_T) + (1 - e^{-(t_n - 3t)/t_a}) e^{-(t_n - 3t)/t_b} \cdot \Gamma_C(\Gamma_T + \Gamma_T^2) +$$

$$(1 - e^{-(t_n - 5t)/t_a}) e^{-(t_n - 5t)/t_b} \cdot \Gamma_C^2(\Gamma_T^2 + \Gamma_T^3) + \dots + (1 - e^{-(t_n - nt)/t_a}) e^{-(t_n - nt)/t_b} \cdot \Gamma_C^8(\Gamma_T^8 + \Gamma_T^9)]$$

(4-5)

Total tegangan surja di titik T dari $t = 0$ s hingga $t = 1,475.10^{-4}$ s diperlihatkan dalam tabel pada Lampiran 2 dan Grafik 4.4.



Grafik 4.4. Total tegangan pada trafo di titik T untuk sistem-1

Tegangan surja tertinggi yang terjadi di titik T, yaitu sebesar $V_T = 95,3058 \%$ dan terjadi pada waktu $t = 2,093.10^{-6}$ s atau $2,093 \mu s$. Dari Grafik 4.4 terlihat bahwa setelah tegangan surja mencapai nilai puncaknya pada waktu yang sesaat, pada saat-saat berikutnya tegangan surja akan terus mengalami penurunan.

4.2.1.3. Nilai arus surja pada saluran-3

Besarnya arus surja pada sistem-1 yang perlu diketahui adalah pada saluran-3, karena pada saluran ini terpasang CO (fuse cut out) yang berfungsi sebagai pengaman

arus lebih. CO yang dilengkapi kawat lebur memiliki batasan dalam mengalirkan arus pada frekuensi jala-jala (50 Hz). Kawat lebur dapat dengan cepat melebur atau putus bila energi yang timbul padanya telah melampaui batas kemampuannya. Sedangkan arus surja petir yang mengalir pada kawat lebur pada selang waktu tertentu akan menghasilkan energi pada kawat lebur.

Energi pemutusan kawat lebur pada frekuensi jala-jala akan dijadikan sebagai tolak ukur dalam menentukan kemampuan kawat lebur menahan energi yang disebabkan oleh surja petir.

Energi pemutusan kawat lebur pada frekuensi jala-jala ditentukan berdasarkan kurva karakteristik waktu-arus dari kawat lebur yang diperlihatkan dalam Gambar 2.18. Pada kurva ini akan ditunjukkan waktu lebur minimum dimana pada waktu ini akan terdapat arus lebur atau pemutusan minimum yang merupakan arus perkiraan minimum yang mampu diputuskan oleh pelebur. Arus lebur minimum ini akan digunakan untuk menentukan besarnya energi pemutusan minimum dari kawat lebur. Energi pemutusan minimum dari kawat lebur inilah yang akan dijadikan sebagai tolak ukur dalam menentukan kemampuan kawat lebur menahan energi petir. Energi pemutusannya didasarkan pada persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{pemutusan}} &= R \int_0^T i^2(t) dt \\
 &= R \int_0^T I_m^2 \cdot \sin^2 \omega t dt
 \end{aligned}
 \tag{4-6}$$

dimana R adalah tahanan kawat lebur dianggap sama dengan 1Ω .

Energi pemutusan kawat lebur atau disebut energi spesifik yang artinya sama dengan energi yang timbul pada tahanan $R = 1 \Omega$ pada rangkaian, selama peleburnya bekerja (SPLN 64:1985:2). Dan energi pemutusan minimum pada waktu 0,1 sekon dari beberapa angka pengenalan kawat lebur tipe K (cepat) yang umum digunakan di lapangan dapat dituliskan dalam Tabel 4.1 di bawah ini:

Tabel 4.1. Energi pemutusan minimum kawat lebur pada 0,1 sekon

Rating Kawat lebur (A)	Energi pemutusan minimum Kawat lebur (joule)
6	518,411
10	1638,44
15	4622,64
25	12250,4
40	31923,4

Pada Tabel 4.1, terlihat bahwa angka pengenalan (rating) kawat lebur yang kecil akan menghasilkan energi pemutusan yang kecil sedangkan angka pengenalan kawat lebur yang besar akan menghasilkan energi pemutusan yang besar juga. Dengan demikian untuk memastikan kemampuan kawat lebur dari CO dalam menahan energi petir yang timbul pada kawat lebur tersebut, dapat digunakan angka pengenalan kawat lebur yang terkecil, yaitu 6 A. Bila kawat lebur yang digunakan dalam suatu sistem penempatan arrester dengan angka pengenalan 6 A dapat menahan atau tidak mengalami pemutusan saat timbul energi petir pada sistem tersebut, maka dapat dipastikan kawat lebur dengan angka pengenalan yang lebih besar juga tidak akan mengalami pemutusan bila digunakan dalam sistem tersebut.

Sesuai dengan data yang ada di lapangan, maka digunakan anak pelebur tipe K dengan angka pengenalan arus 6 A, ini merupakan angka pengenalan (rating) kawat lebur yang terkecil dari kurva waktu-arus berdasarkan standar SPLN 52-3:1983.

Energi pemutusan minimum dari kawat lebur 6 A yang tertulis dalam Tabel 2.1 didapat berdasarkan Persamaan (4-6) pada waktu 0,1 sekon dengan arus lebur / pemutusan minimum kawat lebur sama dengan 72 A, sesuaikan dengan Tabel 2.1. Sehingga energi pemutusannya adalah:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{pemutusan}} &= I_m^2 \cdot R \cdot \frac{1}{2} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt \\
 &= (7\sqrt{2})^2 \cdot 1 \cdot \frac{1}{2} \int_0^{0,1} \left(1 - \cos \left[2 \cdot \frac{2\pi}{0,1} \cdot t \right] \right) dt \\
 W_{\text{pemutusan}} &= 518,411 \text{ joule}
 \end{aligned}$$

Sedangkan energi petir yang diserap elemen pelebur pada selang waktu tertentu didasarkan pada persamaan berikut ini:

$$W_{\text{petir}} = R \int_0^T i_3^2(t) dt$$

atau

$$W_{\text{petir}} = R \int_0^t (A_1 \cdot I_3 \cdot t^3 \cdot e^{-t/t_c})^2 dt \tag{4-7}$$

$i_3(t)$ adalah arus surja petir fungsi waktu yang didasarkan pada Persamaan (2-2). Arus surja $i_3(t)$ yang datang pada saluran-3 memiliki amplitudo sebesar:

$$I_3 = \frac{E_3}{z_3} = \frac{66,67}{491} = 0,1358\%$$

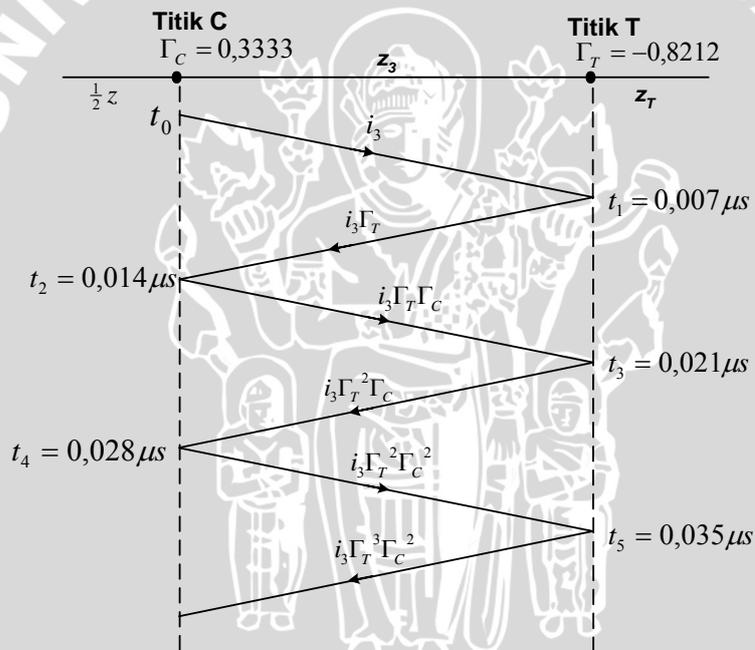
Nilai arus surja tertinggi yang mengalir pada kawat lebur pada waktu tertentu akan digunakan untuk menyatakan besarnya energi petir yang diserap oleh kawat lebur.

Arus surja yang mengalir pada kawat lebur pada saluran-3 dianggap sama dengan arus yang terjadi di titik C [$i_C(t)$]. Dengan metode pantulan berulang, besarnya arus surja pada kawat lebur atau di titik C dalam selang waktu tertentu bisa didapatkan.

Proses pemantulan gelombang arus surja i_3 pada saluran-3 ditentukan dengan menjadikan koefisien pantulan arus sebagai masukan. Koefisien pantulan arus di titik C dan titik T yang didasarkan pada Persamaan (2-17), berturut-turut dapat dituliskan menjadi:

$$\Gamma_C = \frac{z_3 - \frac{1}{2}z}{z_3 + \frac{1}{2}z} = \frac{491 - \frac{1}{2}491}{491 + \frac{1}{2}491} = \frac{1}{3} \quad \text{dan} \quad \Gamma_T = \frac{z_3 - z_T}{z_3 + z_T} = \frac{491 - 5000}{491 + 5000} = -0,8212$$

Diagram tangga untuk gelombang arus surja pada saluran-3 diperlihatkan dalam Gambar 4.11.

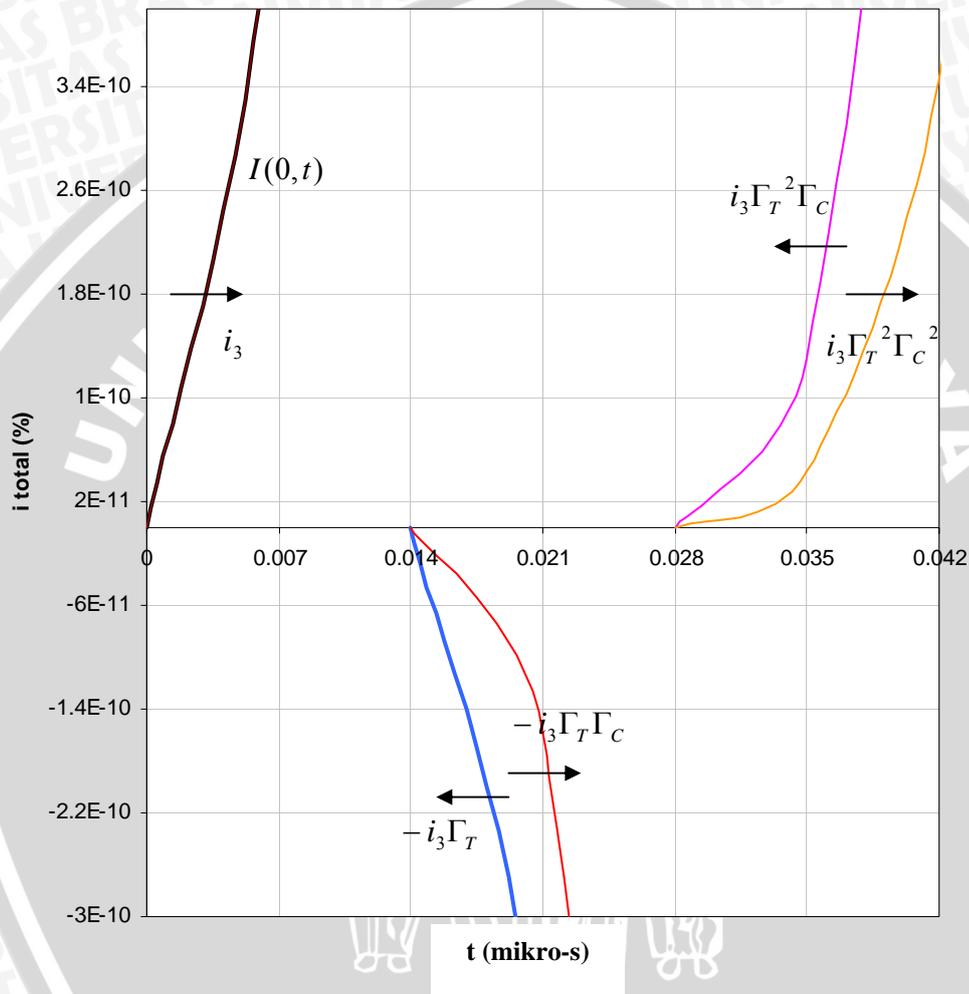


Gambar 4.11. Diagram tangga gelombang arus di titik C dan T untuk sistem-1

Dalam diagram ini diperlihatkan gelombang datang i_3 dengan nilai puncak $I_3 = 0,1358\%$ yang datang dan kemudian dipantulkan setelah sampai pada titik T dan C. Gelombang arus yang dipantulkan ditandai dengan adanya perkalian antara i_3 dengan koefisien pantulan arus, perkalian ini menghasilkan gelombang-gelombang arus baru ($i_3\Gamma_T$, $i_3\Gamma_T\Gamma_C$, $i_3\Gamma_T^2\Gamma_C$, $i_3\Gamma_T^2\Gamma_C^2$, $i_3\Gamma_T^3\Gamma_C^2$, dan seterusnya). Gelombang i_3 dengan masukan Γ_T sebagai pengalinya menandakan gelombang surja yang dipantulkan dari

titik T sedangkan gelombang i_3 dengan masukan Γ_C sebagai pengalinya menandakan gelombang surja yang dipantulkan dari titik C.

Distribusi arus surja di titik C dari $t = 0$ sampai $t = 0,042 \mu s$ diperlihatkan pada Grafik 4.5 di bawah ini:



Grafik 4.5. Distribusi arus saluran-3 pada $t = 0$ sampai $t = 0,042 \mu s$ untuk sistem-1

Proses perjalanan gelombang i_3 sebagai gelombang datang pada saluran-3 adalah sebagai berikut:

Gelombang i_3 dengan tepian ujung gelombang yang bernilai 0% yang berada di titik C akan sampai pada titik T pada $t_1 = 0,007 \mu s$, sehingga arus surja yang dirasakan di titik C saat t_0 adalah 0% sedangkan saat t_1 adalah sebesar $5,77947.10^{-10} \%$ yang didapatkan berdasarkan perhitungan di bawah ini:

$$\begin{aligned}
 i_C(t_1) &= i_3(t_1 - 0) \\
 &= A_I \cdot I_3 \cdot t_1^3 \cdot e^{-(t_1-0)/t_c} \\
 i_C(t_1) &= 5,77947 \cdot 10^{-10} \%
 \end{aligned}$$

pada waktu t_1 ini akan dihasilkan gelombang pantul di titik T dengan amplitudo sebesar $\Gamma_T \cdot 0,1358 = -0,1115 \%$ yang mengarah ke titik C, tepian ujung gelombang ini berada di titik T dan sampai di titik C saat $t_2 = 0,014 \mu\text{dtk}$ yang menimbulkan gelombang pantul di titik C sebesar $\Gamma_C \cdot -0,1115 = -0,03716 \%$ yang mengarah ke titik T. Saat t_2 arus di titik C adalah sebesar $I_C(t_2) = 4,6153 \cdot 10^{-9} \%$. Saat $t_3 = 0,021 \mu\text{dtk}$ gelombang pantul dari titik C sampai pada titik T yang menimbulkan gelombang pantul sebesar $\Gamma_T \cdot -0,03716 = 0,03052 \%$ yang mengarah ke titik C, bersamaan dengan ini tegangan di titik C adalah $I_C(t_3) = 1,4916 \cdot 10^{-8} \%$. Besarnya arus di titik C saat $t_2 = 0,014 \mu\text{s}$ dan $t_3 = 0,021 \mu\text{s}$ didapatkan berdasarkan Persamaan (2-36) seperti di bawah ini:

- saat $t_2 = 0,014 \mu\text{s}$

$$\begin{aligned}
 i_C(t_2) &= i_3(t_2 - 0) + i_3(t_2 - 0,014 \cdot 10^{-6}) \Gamma_T + i_3(t_2 - 0,014 \cdot 10^{-6}) \Gamma_T \cdot \Gamma_C \\
 &= A_I \cdot I_3 \cdot t_2^3 \cdot e^{-(t_2-0)/t_c} + \left(A_I \cdot I_3 \cdot t_2^3 \cdot e^{-(t_2-0,014 \cdot 10^{-6})/t_c} \right) \Gamma_T \cdot (1 + \Gamma_C) \\
 i_C(t_2) &= 4,6153 \cdot 10^{-9} \%
 \end{aligned}$$

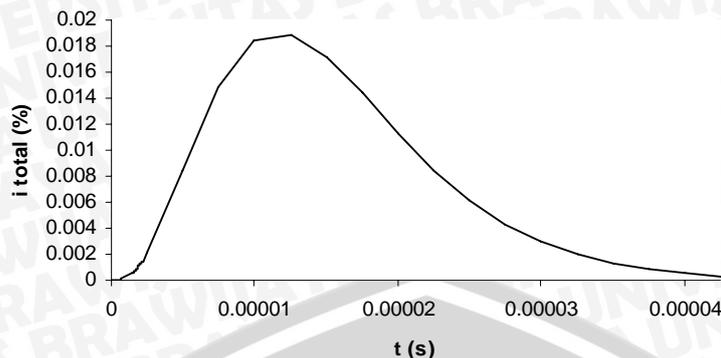
- saat $t_3 = 0,021 \mu\text{s}$

$$\begin{aligned}
 i_C(t_3) &= i_3(t_3 - 0) + i_3(t_3 - 0,014 \cdot 10^{-6}) \Gamma_T \cdot (1 + \Gamma_C) \\
 i_C(t_3) &= 1,4916 \cdot 10^{-8} \%
 \end{aligned}$$

Perhitungan total arus surja di titik C secara umum didasarkan pada Persamaan (2-37) dan dapat dituliskan menjadi seperti berikut ini:

$$\begin{aligned}
 i_C(t_n) &= A_I I_{31} \cdot [(t_n - 0t)^3 \cdot e^{-(t_n-0t)/t_c} + (t_n - 2t)^3 \cdot e^{-(t_n-2t)/t_c} \cdot \Gamma_T \cdot (1 + \Gamma_C) + \\
 &\quad (t_n - 4t)^3 \cdot e^{-(t_n-4t)/t_c} \cdot (\Gamma_T^2 \cdot (\Gamma_C + \Gamma_C^2)) + \dots + (t_n - nt)^3 \cdot e^{-(t_n-nt)/t_c} \cdot (\Gamma_T^9 \cdot (\Gamma_C^8 + \Gamma_C^9))]
 \end{aligned} \tag{4-8}$$

Total arus surja pada kawat lebur atau di titik C dari $t = 0 \text{ s}$ sampai $t = 1,475 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ diperlihatkan dalam tabel pada Lampiran 6 dan Grafik 4.6. Nilai arus surja tertinggi yang terjadi di titik C sebesar $I_C = 0,0189 \%$ saat $t = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ atau $12,5 \mu\text{s}$.



Grafik 4.6. Total arus surja di titik C untuk sistem-1

Dari Grafik 4.6 terlihat bahwa setelah tegangan surja mencapai nilai puncaknya pada waktu yang sesaat, pada saat-saat berikutnya arus surja akan terus mengalami penurunan.

Bila diambil arus surja petir dengan puncak 10 kA maka besar amplitudo arus tertinggi di titik C adalah $I_3 = 189,1756$ A. Berdasarkan Persamaan (4-7) energi petir yang diserap kawat lebur dari waktu 0 hingga 0,1 sekon adalah:

$$W_{petir} = R \int_0^t (A_1 \cdot I_3 \cdot t^3 \cdot e^{-t/t_c})^2 dt$$

$$W_{petir} = 0,01243 \cdot 10^{36} \cdot 189,1756^2 \cdot 1 \cdot \int_0^{0,1} t^6 \cdot e^{(-2/3,911 \cdot 10^{-6})t} dt$$

$$W_{petir} = 35,0218 \text{ joule}$$

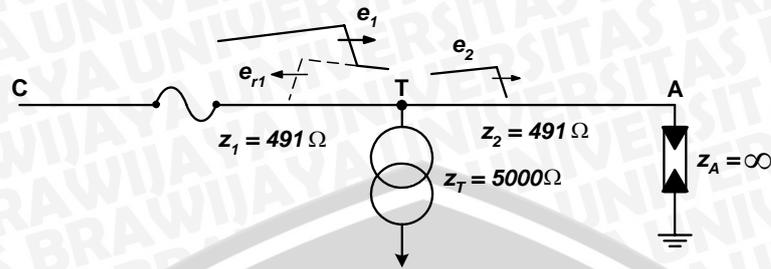
Jadi energi petir yang diserap elemen pelebur adalah 35,0218 joule sedangkan energi pemutusan elemen pelebur adalah 518,411 joule. Sehingga perbandingan yang didapatkan dari kedua nilai ini adalah:

$$\frac{W_{petir}}{W_{pemutusan}} = \frac{35,0218}{518,411} = \frac{1}{14,8025}$$

Dari perbandingan ini terlihat bahwa energi pemutusan kawat lebur jauh lebih besar dibandingkan energi petir yang timbul pada kawat lebur. Sehingga dipastikan pada sistem ini kawat lebur tidak akan mengalami pemutusan saat dialiri arus surja petir.

4.2.2. Sistem-2

Gambar rangkaian sistem-2 dibuat lebih sederhana menjadi seperti di bawah ini:



Gambar 4.12. Rangkaian sederhana sistem-2

Sistem-2 menunjukkan suatu bentuk rangkaian dengan resistansi paralel berupa trafo dengan impedansi surja $z_T = 5000\Omega$ yang dihubungkan pada titik T. Dengan bentuk rangkaian seperti ini pada saluran-2 akan dihasilkan gelombang tegangan surja yang diteruskan pada saluran-2 (e_2) yang besarnya didasarkan pada Persamaan (2-23), memiliki amplitudo sebesar:

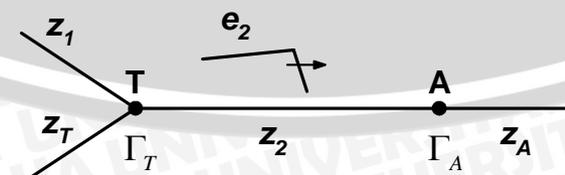
$$E_2 = \frac{2 \frac{1}{z_1}}{\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_T}} \cdot E_1 \quad (4-9)$$

Gelombang e_2 timbul saat gelombang e_1 yang merambat pada saluran 1 sampai pada titik T.

Nilai tegangan surja sebagai fungsi waktu yang akan diamati adalah pada arrester di titik A dan trafo di titik T. Sedangkan nilai arus surja yang akan diamati adalah pada saluran-1 yang menjadi tempat terpasangnya CO.

4.2.2.1. Tegangan surja pada arrester di titik A

Untuk memudahkan, Gambar 4.12 diwujudkan dalam bentuk rangkaian pengganti seperti berikut ini:

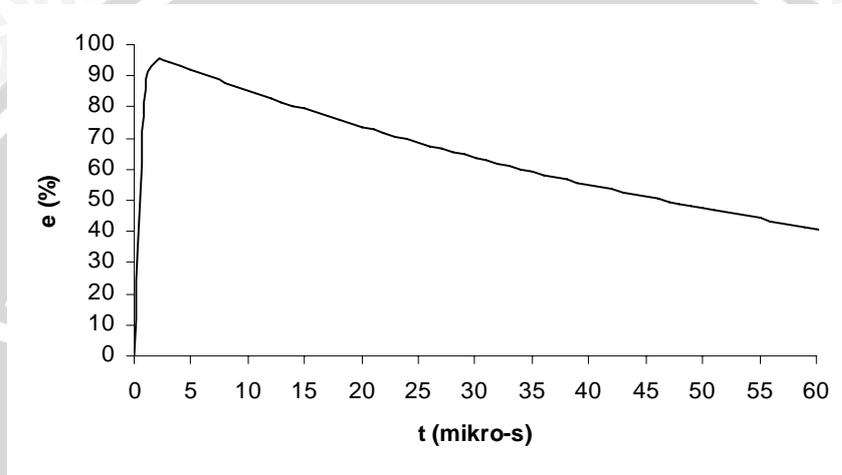


Gambar 4.13. Rangkaian pengganti sistem-2

Gelombang e_2 sebagai gelombang tegangan surja datang pada saluran-2 memiliki amplitudo yang besarnya adalah:

$$E_2 = \frac{2 \frac{1}{491}}{\frac{1}{491} + \frac{1}{491} + \frac{1}{5000}} 100\% = 95,32\%$$

Bentuk gelombang e_2 fungsi waktu yang didasarkan pada Persamaan (2-1) diperlihatkan pada Gambar 4.14 di bawah ini:



Gambar 4.14. Gelombang tegangan surja datang e_2 pada saluran-2 untuk sistem-2

Dengan kecepatan rambat gelombang $v = 3.10^8$ m/s maka perjalanan gelombang dari titik T ke titik A yang berjarak $S_2 = 0,5$ m, membutuhkan waktu

$$t = \frac{0,5}{3.10^8} = 0,0017 \mu s$$

Dua impedansi surja yang terangkai secara paralel adalah

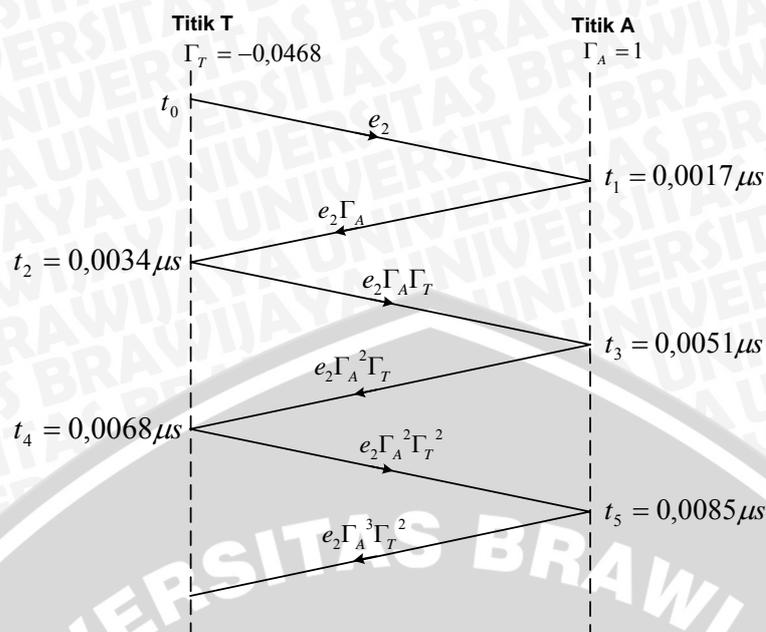
$$z_g = \frac{z_1 \cdot z_T}{z_1 + z_T} = \frac{491 \times 5000}{491 + 5000} = 447,1 \Omega$$

Sehingga koefisien pantulan tegangan di titik T dan titik A berturut-turut adalah

$$\Gamma_T = \frac{z_g - z_2}{z_g + z_2} = \frac{447,1 - 491}{447,1 + 491} = -0,0468 \quad \text{dan} \quad \Gamma_A = \frac{z_A - z_2}{z_A + z_2} = \frac{\infty - 491}{\infty + 491} \approx 1$$

Dengan metode yang sama nilai tegangan surja di titik A sebagai fungsi waktu $[v_A(t)]$ akan dapat ditentukan.

Proses pantulan gelombang e_2 pada saluran-2 diperlihatkan pada diagram tangga di bawah ini (Gambar 4.15):



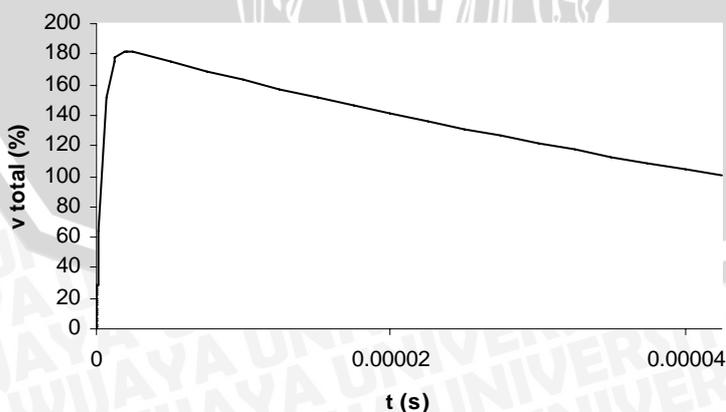
Gambar 4.15. Diagram tangga gelombang tegangan surja e_2 pada saluran-2 untuk sistem-2

Gelombang e_2 pada saluran- 2 akan dipantulkan secara berulang pada beberapa waktu saat sampainya pada titik A dan T sebagaimana gambar diagram tangga di atas.

Secara umum total tegangan surja di titik A dapat dihitung berdasarkan Persamaan (2-28) dan dapat dituliskan kembali menjadi seperti berikut ini:

$$v_A(t_n) = A_V E_2 \cdot [(1 - e^{-(t_n-t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-t)/t_b} \cdot (1 + \Gamma_A) + (1 - e^{-(t_n-3t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-3t)/t_b} \cdot \Gamma_T (\Gamma_A + \Gamma_A^2) + (1 - e^{-(t_n-5t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-5t)/t_b} \cdot \Gamma_T^2 (\Gamma_A^2 + \Gamma_A^3) + \dots + (1 - e^{-(t_n-n.t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-n.t)/t_b} \cdot \Gamma_T^8 (\Gamma_A^8 + \Gamma_A^9)] \quad (4-10)$$

Total tegangan di titik A dari $t = 0$ hingga $t = 4,25 \cdot 10^{-5}$ s diperlihatkan dalam tabel pada Lampiran 3 dan Grafik 4.7.

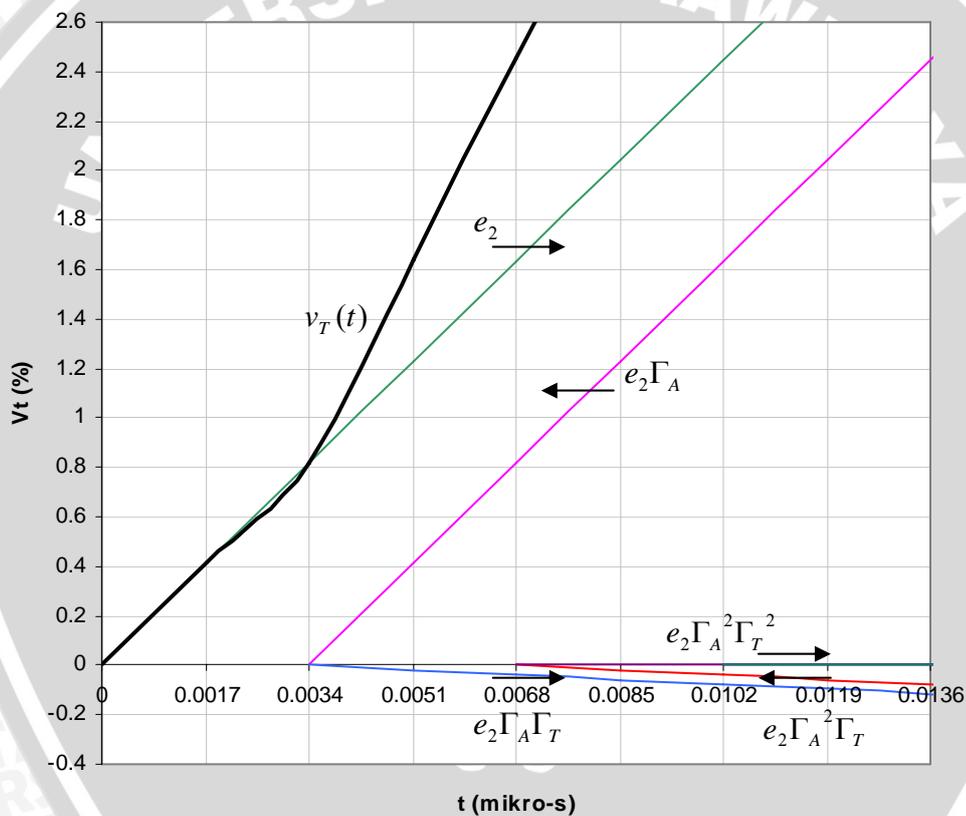


Grafik 4.7. Total tegangan pada arrester di titik A untuk sistem-2

Nilai tegangan surja tertinggi yang terjadi pada arrester di titik A adalah $V_A=182,0736\%$ yang terjadi pada saat $t = 2,0893 \cdot 10^{-6}s$. Dari Grafik 4.7 terlihat bahwa setelah tegangan surja mencapai nilai puncaknya pada waktu yang sesaat, pada saat-saat berikutnya tegangan surja akan terus mengalami penurunan.

4.2.2.2. Tegangan surja pada trafo di titik T

Diagram tangga pada Gambar 4.15 memperlihatkan gelombang tegangan surja yang datang dan dipantulkan pada titik T dan distribusi tegangan surja yang terjadi di titik T [$v_T(t)$] dari $t = 0$ sampai $t = 0,0136 \mu s$ dapat diamati pada Grafik 4.8 di bawah ini:



Grafik 4.8. Distribusi tegangan surja pada trafo di titik T pada waktu $t = 0$ sampai $t = 0,0136 \mu s$ untuk sistem-2

Gelombang e_2 yang datang pada saluran-2 saat $t_0 = 0$ tepian ujung gelombang surja yang bernilai 0 berada di titik T sehingga pada saat itu besar tegangan surja di titik T adalah 0%. Gelombang ini akan merambat sampai pada titik A pada waktu $t_1 = 0,0017 \mu s$ dan menimbulkan gelombang pantul di titik A dengan amplitudo sebesar $E_2 \cdot \Gamma_A = 95,32\%$, gelombang pantul ini menuju pada titik T dan sampai pada titik

tersebut saat $t_2 = 0,0034 \mu\text{s}$, pada waktu ini juga dihasilkan gelombang pantul di titik T dengan amplitudo sebesar 95,32%. $\Gamma_T = -4,461\%$ sehingga tegangan surja di titik T saat t_2 adalah sebesar 0,82146%. Gelombang pantul dari titik T yang besarnya -4,461% akan sampai pada titik A saat $t_3 = 0,0051 \mu\text{s}$ dan menimbulkan gelombang pantul di titik A dengan amplitudo sebesar -4,461%. $\Gamma_A = -4,461\%$ yang akan menuju ke titik T, gelombang ini akan sampai di titik T pada $t_4 = 0,0068 \mu\text{s}$ dan menimbulkan gelombang pantul baru di titik T sebesar -4,461%. $\Gamma_T = 0,2088\%$ sehingga pada saat t_4 tegangan di titik T adalah sebesar 2,419%, dan begitulah seterusnya. Nilai tegangan di titik T saat t_0 , t_2 , dan t_4 yang didasarkan pada Persamaan (2-9) dan (2-30), dapat dituliskan seperti berikut ini:

- saat t_0

$$v_T(t_0) = A_V E_2 (1 - e^{-(t_0-0)/t_a}) e^{-(t_0-0)/t_b} = 0\%$$

- saat $t_2 = 0,0034 \mu\text{s}$

$$v_T(t_2) = A_V E_2 (1 - e^{-(t_2-0)/t_a}) e^{-(t_2-0)/t_b} + A_V E_2 (1 - e^{-(t_2-0,0034 \cdot 10^{-6})/t_a}) e^{-(t_2-0,0034 \cdot 10^{-6})/t_b} \Gamma_A (1 + \Gamma_T)$$

$$v_T(t_2) = 0,82146\%$$

- saat $t_4 = 0,0068 \mu\text{s}$

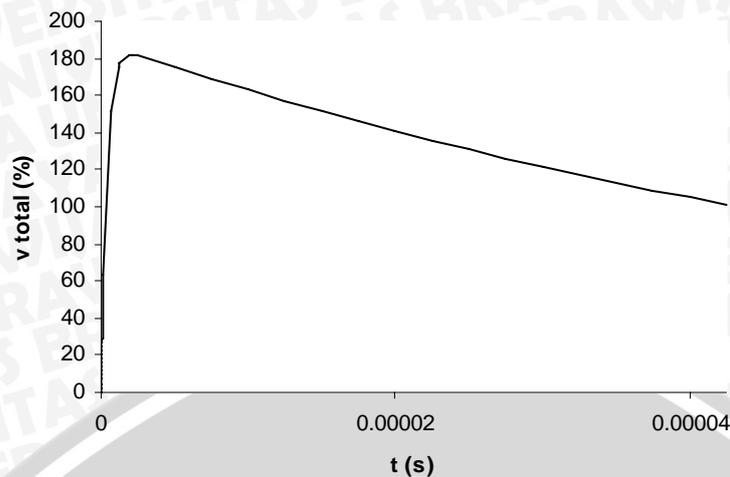
$$v_T(t_4) = A_V E_2 (1 - e^{-(t_4-0)/t_a}) e^{-(t_4-0)/t_b} + A_V E_2 (1 - e^{-(t_4-0,0034 \cdot 10^{-6})/t_a}) e^{-(t_4-0,0034 \cdot 10^{-6})/t_b} \Gamma_A (1 + \Gamma_T) + A_V E_2 (1 - e^{-(t_4-0,0068 \cdot 10^{-6})/t_a}) e^{-(t_4-0,0068 \cdot 10^{-6})/t_b} \Gamma_A^2 (\Gamma_T + \Gamma_T^2)$$

$$v_T(t_2) = 2.4190\%$$

Secara umum total tegangan surja di titik T dapat dihitung berdasarkan Persamaan (2-31) dan dapat dituliskan kembali menjadi seperti berikut ini:

$$v_T(t_n) = A_V E_2 [(1 - e^{-(t_n-0t)/t_a}) e^{-(t_n-0t)/t_b} + (1 - e^{-(t_n-2t)/t_a}) e^{-(t_n-2t)/t_b} \Gamma_A (1 + \Gamma_T) + (1 - e^{-(t_n-4t)/t_a}) e^{-(t_n-4t)/t_b} \Gamma_A^2 (\Gamma_T + \Gamma_T^2) + (1 - e^{-(t_n-6t)/t_a}) e^{-(t_n-6t)/t_b} \Gamma_A^3 (\Gamma_T^2 + \Gamma_T^3) + \dots + (1 - e^{-(t_n-nt)/t_a}) e^{-(t_n-nt)/t_b} \Gamma_A^9 (\Gamma_T^8 + \Gamma_T^9)] \quad (4-11)$$

Total tegangan di titik T dari $t = 0$ hingga $t = 4,25 \cdot 10^{-5}$ s diperlihatkan dalam tabel pada Lampiran 4 dan Grafik 4.9.



Grafik 4.9. Total tegangan surja pada trafo di titik T untuk sistem-2

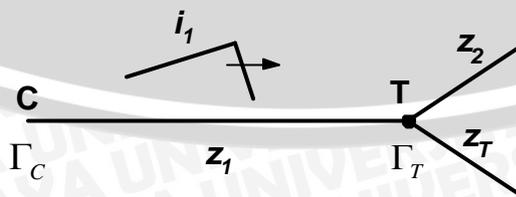
Nilai tegangan surja tertinggi yang terjadi pada trafo adalah $V_T = 182,0736\%$ yang terjadi pada saat $t = 2,091 \cdot 10^{-6}$ s. Dari grafik 4.8 terlihat bahwa setelah tegangan surja mencapai nilai puncaknya pada waktu yang sesaat, setelah itu nilai tegangan surja akan terus mengalami penurunan.

4.2.2.3. Arus surja pada saluran-1

Pada sistem-2, CO terpasang pada saluran-1 dan kawat lebur yang digunakan disesuaikan dengan data yang ada dilapangan. Berdasarkan hasil perhitungan yang didapatkan dalam sistem-1, kawat lebur tipe K dengan nilai pengenal arus 6 A memiliki energi pemutusan sebesar 518,411 joule.

Sedangkan energi petir yang timbul pada kawat lebur didasarkan pada Persamaan (4-7). Nilai arus surja tertinggi yang terjadi di titik T digunakan untuk menyatakan besarnya energi petir yang timbul pada kawat lebur.

Untuk menentukan arus surja pada saluran-1, rangkaian pengganti sistem-2 dapat diwujudkan seperti di bawah ini:



Gambar 4.16. Rangkaian pengganti sistem-2



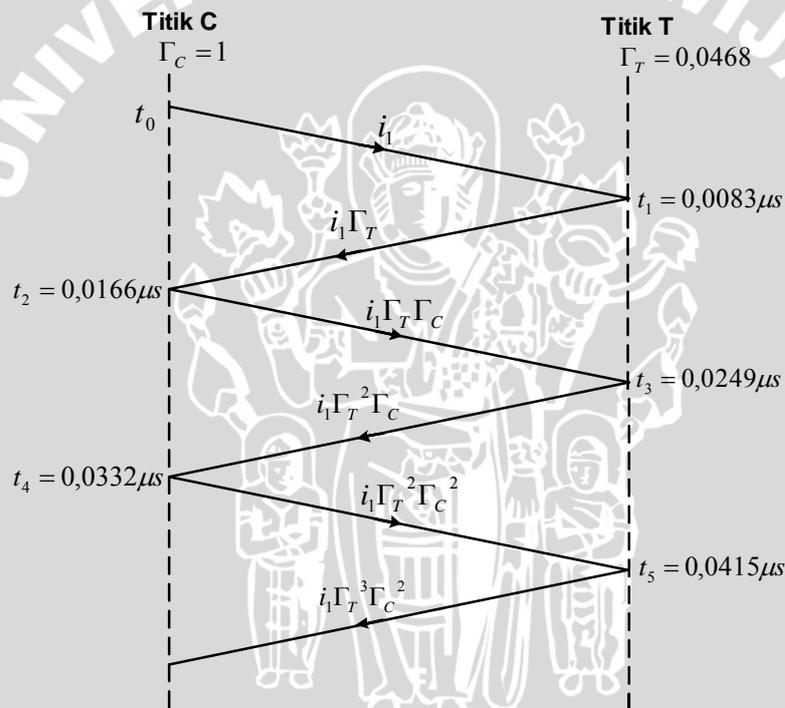
Karena gelombang tegangan surja yang datang pada saluran-1 adalah e_1 yang memiliki amplitudo sebesar 100% maka gelombang arus surja i_1 pada saluran ini memiliki amplitudo sebesar:

$$I_1 = \frac{E_1}{z_1} = \frac{100}{491} = 0,2037\%$$

Nilai arus surja fungsi waktu di titik T [$i_T(t)$] dipengaruhi oleh koefisien pantulan arus di titik C dan T, berdasarkan Persamaan (2-17) maka besarnya adalah:

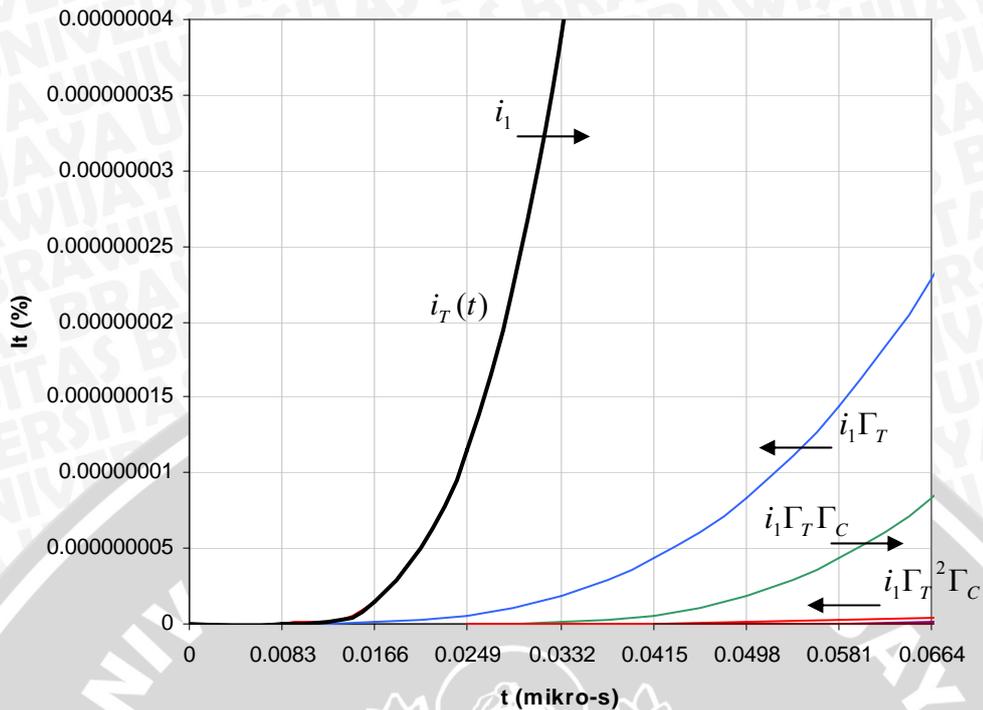
$$\Gamma_C = \frac{z_1}{z_1} = \frac{491}{491} = 1 \quad \text{dan} \quad \Gamma_T = \frac{z_1 - z_g}{z_1 + z_g} = \frac{491 - 447,1}{491 + 447,1} = 0,0468$$

Proses pemantulan gelombang i_1 di titik T pada saluran-1 diperlihatkan dalam diagram tangga di bawah ini (Gambar 4.17):



Gambar 4.17. Diagram tangga gelombang arus surja pada saluran-1 untuk sistem-2

Dan distribusi arus surja di titik T sebagai tempat terhubungnya anak pelebur dari $t = 0$ sampai $t = 0,0664 \mu s$ dapat diperlihatkan pada Grafik 4.10 di bawah ini:



Grafik 4.10. Distribusi arus surja di titik T sebagai tempat terhubungnya kawat lebur dari $t = 0$ sampai $t = 0,0664 \mu\text{s}$ untuk sistem-2

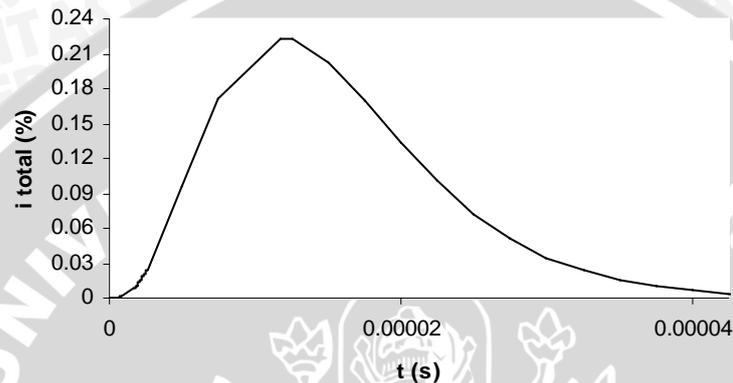
Gelombang i_1 yang datang pada saluran-1 saat $t_0 = 0$ tepian ujung gelombang surja yang bernilai 0 berada di titik C. Gelombang ini akan merambat dan sampai pada titik T pada waktu $t_1 = 0,0083 \mu\text{s}$ dan menimbulkan gelombang pantul di titik T dengan amplitudo sebesar $I_1 \cdot \Gamma_T = 9,533 \cdot 10^{-3}\%$, sehingga arus surja di titik T saat t_1 adalah $I_T = 0\%$. Gelombang pantul dari titik T yang bernilai $9,533 \cdot 10^{-3}\%$ ini menuju ke titik C dan sampai pada titik tersebut saat $t_2 = 0,0166 \mu\text{s}$, pada waktu ini juga dihasilkan gelombang pantul di titik C dengan amplitudo sebesar $9,533 \cdot 10^{-3}\% \cdot \Gamma_C = 9,533 \cdot 10^{-3}\%$, gelombang pantul dari titik C ini akan sampai di titik T pada saat $t_3 = 0,0249 \mu\text{s}$ dan menimbulkan gelombang pantul baru di titik T tersebut dengan amplitudo sebesar $9,533 \cdot 10^{-3} \cdot \Gamma_T = 4,4614 \%$, sehingga pada saat t_3 nilai arus surja di titik T adalah $I_T = 1,2072 \cdot 10^{-8} \%$. Nilai arus surja di titik T saat t_3 yang didasarkan pada Persamaan (2-6) dan dapat dituliskan seperti berikut ini:

$$\begin{aligned}
 I_T(t_3) &= i_1(t_3 - 0,0083 \cdot 10^{-6})(1 + \Gamma_T) + i_1(t_3 - 0,0249 \cdot 10^{-6})\Gamma_C \cdot (\Gamma_T + \Gamma_T^2) \\
 &= (A_I \cdot I_1 \cdot t_3^3 \cdot e^{-(t_3 - 0,0083 \cdot 10^{-6})/t_C})(1 + \Gamma_T) + (A_I \cdot I_1 \cdot t_3^3 \cdot e^{-(t_3 - 0,0249 \cdot 10^{-6})/t_C})\Gamma_C \cdot (\Gamma_T + \Gamma_T^2) \\
 I_T(t_3) &= 1,20728 \cdot 10^{-8}\%
 \end{aligned}$$

Secara umum total arus surja di titik T dapat dihitung berdasarkan Persamaan (2-34) dan dapat dituliskan kembali menjadi seperti berikut ini:

$$i_T(t_n) = A_I I_1 \cdot [(t_n - t)^3 \cdot e^{-(t_n - t)/t_c} \cdot (1 + \Gamma_T) + (t_n - 3t)^3 \cdot e^{-(t_n - 3t)/t_c} \cdot (\Gamma_C \cdot (\Gamma_T + \Gamma_T^2)) + (t_n - 5t)^3 \cdot e^{-(t_n - 5t)/t_c} \cdot \Gamma_C^2 (\Gamma_T^2 + \Gamma_T^3) + \dots + (t_n - nt)^3 \cdot e^{-(t_n - nt)/t_b} \cdot \Gamma_C^8 (\Gamma_T^8 + \Gamma_T^9)] \quad (4-12)$$

Total arus surja di titik T dari $t = 0$ sampai $t = 1,525 \cdot 10^{-4}$ s dapat diperlihatkan dalam tabel pada Lampiran 7 dan Grafik 4.11.



Grafik 4.11. Total arus surja di titik T untuk sistem-2

Nilai arus surja tertinggi yang terjadi di titik T sebesar $I_T = 0,2236\%$ saat $t = 1,17445 \cdot 10^{-5}$ s atau $11,7445 \mu\text{s}$. Dari Grafik 4.11 terlihat bahwa setelah tegangan surja mencapai nilai puncaknya pada waktu yang sesaat, pada saat-saat berikutnya arus surja akan terus mengalami penurunan.

Bila diambil arus surja petir dengan puncak 10 kA maka besar amplitudo arus tertinggi di titik C atau yang mengalir pada kawat lebur adalah $I_1 = 2236,071 \text{ A}$, sehingga energi petir yang timbul pada kawat lebur dari waktu 0 hingga 0,1 sekon berdasarkan Persamaan (4-7) adalah:

$$W_{\text{petir}} = R \int_0^t (A_I \cdot I_1 \cdot t^3 \cdot e^{-t/t_c})^2 dt$$

$$W_{\text{petir}} = 0,01243 \cdot 10^{36} \cdot 2236,071^2 \cdot 1 \cdot \int_0^{0,1} t^6 \cdot e^{(-2/3,911 \cdot 10^{-6})t} dt$$

$$W_{\text{petir}} = 4893,05 \text{ joule}$$

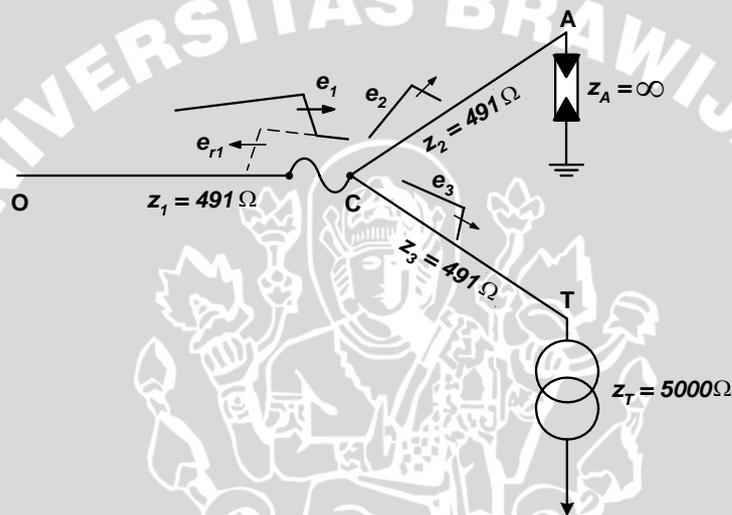
Jadi energi petir yang diserap elemen pelebur adalah 4893,05 joule sedangkan energi pemutusan kawat lebur adalah 518,411 joule. Sehingga perbandingan yang didapatkan dari kedua nilai ini adalah:

$$\frac{W_{petir}}{W_{pemutusan}} = \frac{4893,05}{518,411} = 0,1059$$

Dari perbandingan ini terlihat bahwa energi pemutusan kawat lebur lebih kecil dibandingkan energi petir yang timbul pada kawat lebur. Sehingga pada sistem-2 ini kawat lebur akan mengalami pemutusan saat dialiri arus surja petir. Hal ini tidak diinginkan dalam suatu sistem penempatan arrester.

4.2.3. Sistem-3

Sistem-3 yang diperlihatkan pada Gambar 4.3 dapat digambarkan secara lebih sederhana seperti berikut ini:

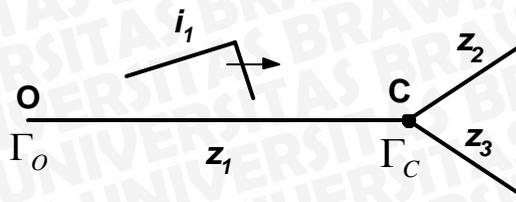


Gambar 4.18. Rangkaian sistem-3

Sistem-3 memiliki bentuk rangkaian yang sama dengan sistem-1, dengan begini besar tegangan surja yang terjadi pada arrester di titik A dan trafo di titik T adalah sama seperti halnya pada sistem-1. Sedangkan perbedaannya terletak pada cara pemasangan CO nya, pada sistem ini CO dipasang pada saluran-1, sehingga besar arus surja yang mengalir pada elemen pelebur CO perlu diperhitungkan kembali.

4.2.3.1. Arus surja pada saluran-1

Untuk memudahkan Gambar 4.19 diwujudkan dalam bentuk rangkaian pengganti seperti berikut ini:



Gambar 4.19. Rangkaian pengganti sistem-3

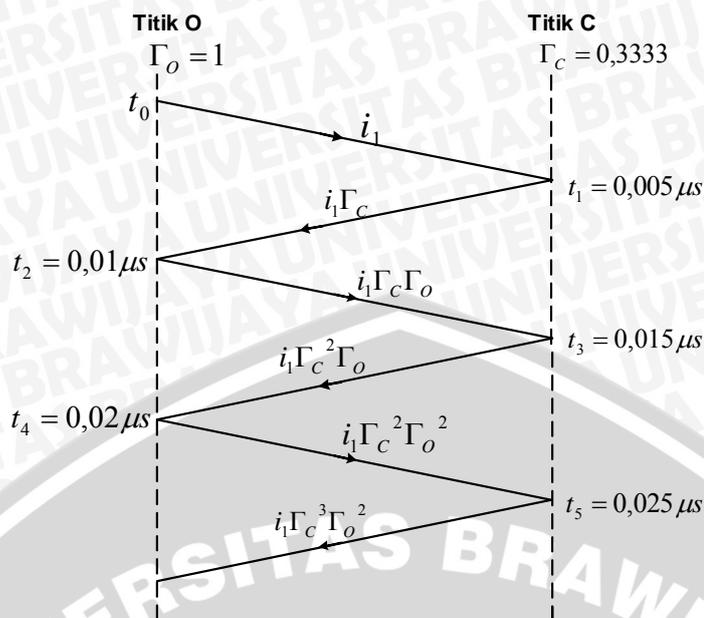
Besar arus surja yang mengalir pada kawat lebur adalah sama dengan arus surja yang terjadi di titik C. Arus surja tersebut adalah i_1 yang datang pada saluran-1, karena gelombang tegangan surja yang datang pada saluran-1 adalah e_1 yang memiliki amplitudo sebesar 100% maka gelombang i_1 memiliki amplitudo sebesar:

$$I_1 = \frac{E_1}{z_1} = \frac{100}{491} = 0,2037\%$$

Perjalanan gelombang i_1 dari titik O ke titik C yang berjarak 1,5 meter membutuhkan waktu $t = 0,005 \mu s$. Dalam waktu beberapa t gelombang i_1 akan mengalami pemantulan sehingga besarnya akan dipengaruhi oleh koefisien pantulan arus di titik O dan titik C seperti terlihat pada gambar 4.10 di atas. Koefisien pantulan arus di titik-titik tersebut adalah

$$\Gamma_O = \frac{z_1}{z_1} = 1 \text{ dan } \Gamma_C = \frac{z_1 - (z_2 // z_3)}{z_1 + (z_2 // z_3)} = \frac{491 - 245,5}{491 + 245,5} = 0,3333$$

Proses pemantulan gelombang i_1 pada saluran-1 adalah seperti halnya proses pemantulan gelombang i_1 pada saluran-1 dari sistem-2, perbedaannya hanya terletak pada nilai koefisien pantulan arus yang akan mempengaruhi besarnya gelombang i_1 pada saluran tersebut. Proses pemantulan gelombang i_1 pada saluran-1 untuk sistem ini diperlihatkan dalam diagram tangga di bawah ini (Gambar 4.20):

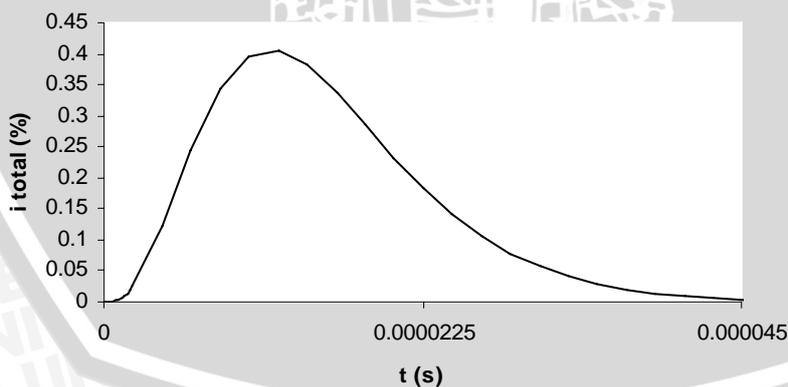


Gambar 4.20. Diagram tangga gelombang i_1 pada saluran-1 dari sistem-3

Secara umum total arus surja di titik C dapat dihitung berdasarkan Persamaan (2-34) dan dapat dituliskan kembali menjadi seperti berikut ini:

$$i_c(t_n) = A_1 I_1 \cdot [(t_n - t)^3 \cdot e^{-(t_n - t)/t_c} \cdot (1 + \Gamma_C) + (t_n - 3t)^3 \cdot e^{-(t_n - 3t)/t_c} (\Gamma_O \cdot (\Gamma_C + \Gamma_C^2)) + (t_n - 5t)^3 \cdot e^{-(t_n - 5t)/t_c} \cdot \Gamma_O^2 (\Gamma_C^2 + \Gamma_C^3) + \dots + (t_n - nt)^3 \cdot e^{-(t_n - nt)/t_c} \cdot \Gamma_O^8 (\Gamma_C^8 + \Gamma_C^9)] \quad (4-13)$$

Total arus surja yang terjadi pada kawat lebur atau di titik C dari $t = 0$ sampai $t = 4.5305 \cdot 10^{-4}$ s dapat diperlihatkan dalam tabel pada Lampiran 8 dan Grafik 4.12.



Grafik 4.12. Total arus surja di titik C untuk sistem-3

Nilai arus surja tertinggi yang terjadi di titik C sebesar $I_C = 0,4058\%$ saat $t = 1,23 \cdot 10^{-5}$ s atau $12,3 \mu s$. Dari Grafik 4.12 terlihat bahwa setelah tegangan surja mencapai

nilai puncaknya pada waktu yang sesaat, pada saat-saat berikutnya arus surja akan terus mengalami penurunan.

Bila diambil arus surja petir dengan puncak 10 kA maka besar amplitudo arus tertinggi di titik C atau yang mengalir pada elemen pelebur adalah $I_1 = 4058,427A$, sehingga energi petir yang diserap elemen pelebur dari waktu 0 hingga 0,1 sekon berdasarkan Persamaan (4-7) adalah:

$$W_{petir} = R \int_0^t (A_1 \cdot I_1 \cdot t^3 \cdot e^{-t/t_c})^2 dt$$

$$W_{petir} = 0,01243 \cdot 10^{36} \cdot 4058,427^2 \cdot 1 \cdot \int_0^{0,1} t^6 \cdot e^{(-2/3,911 \cdot 10^{-6})t} dt$$

$$W_{petir} = 16118,5 \text{ joule}$$

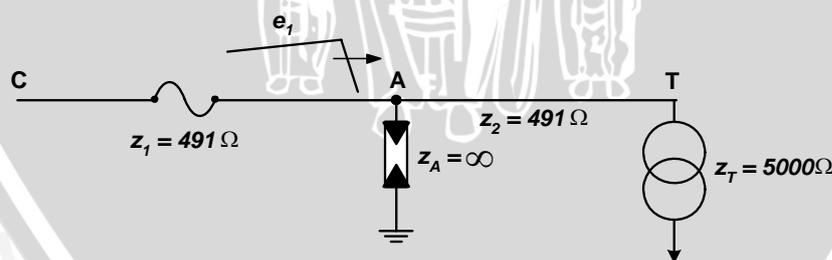
Jadi energi petir yang timbul pada kawat lebur adalah 16118,5 joule sedangkan energi pemutusan kawat lebur adalah 518,411 joule. Sehingga perbandingan yang didapatkan dari kedua nilai ini adalah:

$$\frac{W_{petir}}{W_{pemutusan}} = \frac{16118,5}{518,411} = 0,0321$$

Dari perbandingan ini terlihat bahwa energi pemutusan kawat lebur lebih kecil dibandingkan energi petir yang timbul pada kawat lebur. Sehingga pada sistem-3 ini kawat lebur akan mengalami pemutusan saat dialiri arus surja petir.

4.2.4. Sistem-4

Secara lebih sederhana sistem-4 yang diperlihatkan pada Gambar 4.4 dapat diwujudkan dalam bentuk rangkaian seperti di bawah ini:



Gambar 4.21. Rangkaian sistem-4

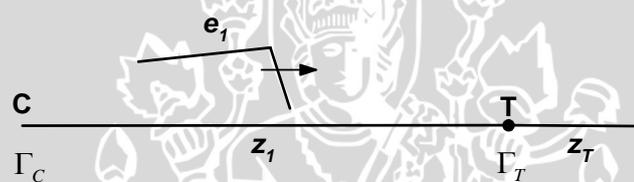
Sistem-4 menunjukkan suatu bentuk sistem dengan resistansi paralel berupa arrester dengan impedansi surja $z_A = \infty$ yang dihubungkan pada titik T. Karena impedansi surja dari arrester tidak terhingga maka dalam rangkaian ini arrester atau impedansi surja arrester dapat diabaikan. Selain itu impedansi surja pada saluran-1 dan saluran-2 adalah sama ($z_1 = z_2$) sehingga pada kondisi ini gelombang tegangan surja

yang merambat pada saluran-1, yaitu e_1 akan merambat pada saluran-2 tanpa menimbulkan gelombang surja pantul di titik A. Sehingga gelombang tegangan surja yang terjadi pada sistem ini bisa dianggap hanya gelombang e_1 baik pada saluran-1 dan saluran-2. Selanjutnya dalam rangkaian pengganti sistem ini dianggap sebagai sistem dengan satu saluran, sebut saja saluran-1 dengan impedansi surja z_1 yang menjadi tempat merambatnya gelombang e_1 yang datang dari titik C menuju ke titik T.

Besar tegangan surja yang akan diamati adalah pada trafo di titik T. Tegangan surja pada arrester di titik A dianggap sama dengan tegangan surja yang terjadi pada trafo. Sedangkan arus surja yang akan diamati adalah arus surja yang mengalir pada saluran-1 yang merupakan tempat terpasangnya CO.

4.2.4.1. Tegangan surja pada arrester dan trafo

Rangkaian sistem-2 pada Gambar 4.21 dapat digambarkan dalam bentuk rangkaian pengganti seperti di bawah ini:



Gambar 4.22. Rangkaian pengganti sistem-4

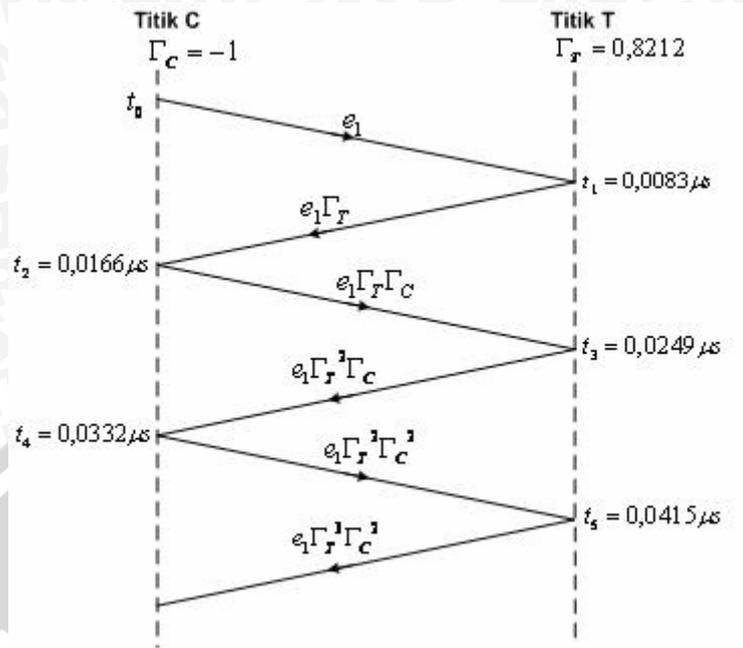
Gelombang e_1 sebagai gelombang tegangan surja yang datang pada saluran-1 memiliki amplitudo yang besarnya adalah $E_1 = 100\%$. Perjalanan gelombang e_1 dari titik C ke titik T yang berjarak 2,5 meter membutuhkan waktu $t = 0,0083 \mu s$. Selanjutnya gelombang e_1 ini akan mengalami proses pemantulan pada saluran-1 setelah sampainya pada titik T dan C sehingga besar tegangan surja yang sampai di titik T akan dipengaruhi oleh koefisien pantulan tegangan di titik C dan T. Koefisien pantulan tegangan di titik C adalah

$$\Gamma_C = \frac{-z_1}{z_1} = \frac{-491}{491} = -1$$

sedangkan di titik T adalah

$$\Gamma_T = \frac{z_T - z_1}{z_T + z_1} = \frac{5000 - 491}{5000 + 491} = 0,8212$$

Proses pemantulan gelombang e_1 diperlihatkan dalam diagram tangga di bawah ini:

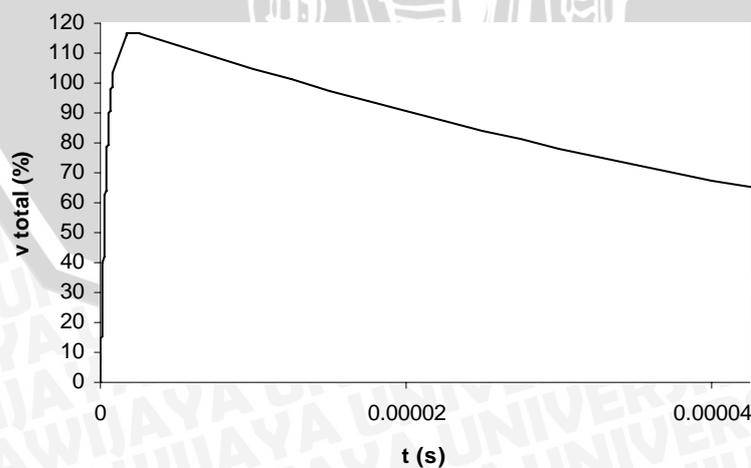


Gambar 4.23. Diagram tangga gelombang tegangan surja pada saluran-1 untuk sistem-4

Penentuan total tegangan surja di titik T didasarkan pada Persamaan (2-28) dan dapat dituliskan menjadi seperti berikut ini:

$$v_T(t_n) = A_V E_1 \cdot [(1 - e^{-(t_n - t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n - t)/t_b} \cdot (1 + \Gamma_T) + (1 - e^{-(t_n - 3t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n - 3t)/t_b} \cdot \Gamma_C (\Gamma_T + \Gamma_T^2) + (1 - e^{-(t_n - 5t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n - 5t)/t_b} \cdot \Gamma_C^2 (\Gamma_T^2 + \Gamma_T^3) + \dots + (1 - e^{-(t_n - nt)/t_a}) \cdot e^{-(t_n - nt)/t_b} \cdot \Gamma_C^8 (\Gamma_T^8 + \Gamma_T^9)] \quad (4-14)$$

Total tegangan di titik T dari $t = 0$ hingga $t = 1,525 \cdot 10^{-4}$ s diperlihatkan dalam tabel pada Lampiran 5 dan Grafik 4.13.



Grafik 4.13. Total tegangan pada trafo dan arrester untuk sistem-4

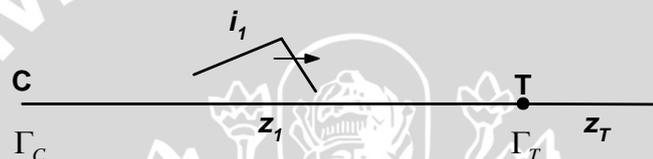
Nilai tegangan surja tertinggi yang terjadi pada trafo adalah $V_T = 116,9499\%$ yang terjadi pada saat $t = 2,1165 \cdot 10^{-6}$ s.

4.2.4.2. Arus surja pada saluran-1

Besar arus surja yang mengalir pada elemen pelebur adalah sama dengan arus surja yang terjadi di titik T. Gelombang arus surja tersebut adalah i_1 yang datang pada saluran-1, karena gelombang tegangan surja yang datang pada saluran-1 adalah e_1 yang memiliki amplitudo sebesar 100% maka gelombang i_1 memiliki amplitudo sebesar:

$$I_1 = \frac{E_1}{z_1} = \frac{100}{491} = 0,2037\%$$

Berikut ini adalah rangkaian pengganti sistem-4 dengan gelombang i_1 yang mengalir pada saluran-1:



Gambar 4.24. Rangkaian pengganti sistem-4

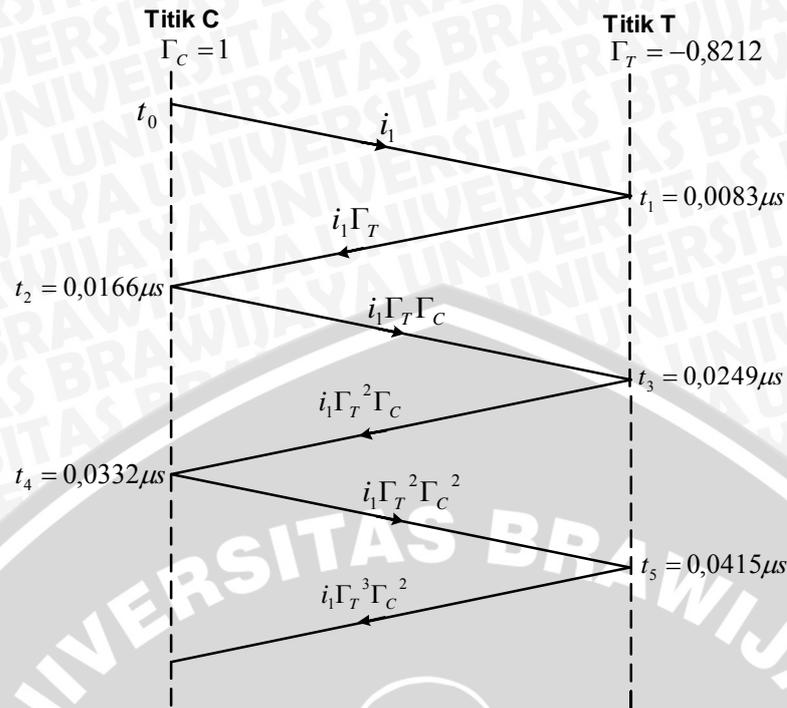
Gelombang i_1 akan mengalami pemantulan pada saluran-1 besarnya akan dipengaruhi oleh koefisien pantulan arus di titik C dan titik T yang nilainya adalah kebalikan dari nilai koefisien pantulan tegangan, yaitu:

$$\Gamma_C = \frac{z_1}{z_1} = \frac{491}{491} = 1$$

sedangkan di titik T adalah

$$\Gamma_T = \frac{z_1 - z_T}{z_1 + z_T} = \frac{491 - 5000}{491 + 5000} = -0,8212$$

Proses pemantulan gelombang i_1 pada saluran-1 adalah seperti halnya proses pemantulan gelombang i_1 pada saluran-1 dari sistem-2, perbedaannya hanya terletak pada nilai koefisien pantulan arus yang akan mempengaruhi besarnya gelombang i_1 pada saluran tersebut. Proses pemantulan gelombang i_1 pada saluran-1 untuk sistem ini diperlihatkan dalam diagram tangga di bawah ini (Gambar 4.25):

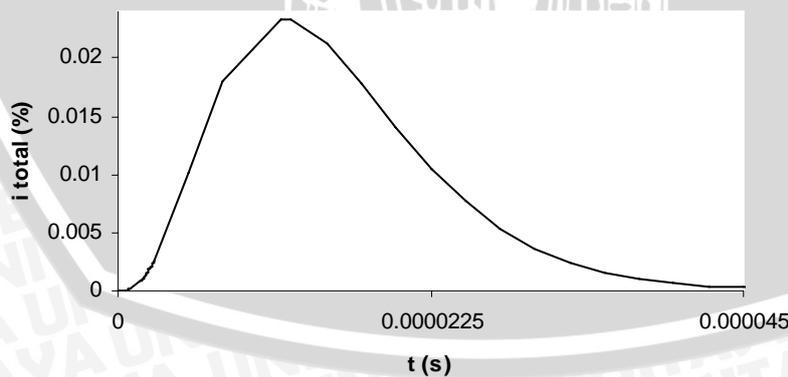


Gambar 4.25. Diagram tangga gelombang arus surja pada saluran-1 dari sistem-4

Secara umum total arus surja di titik T dapat dihitung berdasarkan Persamaan (2-34) dan dapat dituliskan kembali menjadi seperti berikut ini:

$$i_T(t_n) = A_I I_1 \cdot [(t_n - t)^3 \cdot e^{-(t_n-t)/t_c} \cdot (1 + \Gamma_T) + (t_n - 3t)^3 \cdot e^{-(t_n-3t)/t_c} (\Gamma_C \cdot (\Gamma_T + \Gamma_T^2)) + (t_n - 5t)^3 \cdot e^{-(t_n-5t)/t_c} \cdot \Gamma_C^2 (\Gamma_T^2 + \Gamma_T^3) + \dots + (t_n - nt)^3 \cdot e^{-(t_n-nt)/t_b} \cdot \Gamma_C^8 (\Gamma_T^8 + \Gamma_T^9)] \quad (4-15)$$

Total arus surja di titik T dari $t = 0$ hingga $t = 1,525 \cdot 10^{-4}$ s diperlihatkan dalam tabel pada Lampiran 9 dan Grafik 4.14.



Grafik 4.14. Total arus surja di titik T untuk sistem-4

Nilai arus surja tertinggi yang terjadi di titik T sebesar $I_T = 0,0233 \%$ saat $t = 1,17445 \cdot 10^{-5}$ s atau 11,7445 μ s.

Bila diambil arus surja petir dengan puncak 10 kA maka besar amplitudo arus tertinggi di titik T atau yang mengalir pada elemen pelebur adalah $I_1 = 233,8454A$, sehingga energi petir yang diserap elemen pelebur dari waktu 0 hingga 0,1 sekon berdasarkan Persamaan (4-7) adalah:

$$W_{petir} = R \int_0^t (A_1 \cdot I_1 \cdot t^3 \cdot e^{-t/t_c})^2 dt$$

$$W_{petir} = 0,01243 \cdot 10^{36} \cdot 233,8454^2 \cdot 1 \cdot \int_0^{0,1} t^6 \cdot e^{(-2/3,911 \cdot 10^{-6})t} dt$$

$$W_{petir} = 53,5138 \text{ joule}$$

Jadi energi petir yang diserap elemen pelebur adalah 53,5138 joule sedangkan energi pemutusan elemen pelebur adalah 518,411 joule. Sehingga perbandingan yang didapatkan dari kedua nilai ini adalah:

$$\frac{W_{petir}}{W_{pemutusan}} = \frac{53,5138}{518,411} = \frac{1}{9,6874}$$

Dari perbandingan ini terlihat bahwa energi pemutusan kawat lebur lebih besar dibandingkan energi petir yang diserap oleh kawat lebur. Sehingga pada sistem-4 ini kawat lebur tidak akan mengalami pemutusan saat dialiri arus surja petir.

4.3. Tegangan Kerja Arrester sebagai Alat Proteksi Transformator

Tegangan kerja arrester adalah tegangan yang membuat sela arrester terpercik, yang berarti bahwa pada jepitan atau terminal arrester telah terjadi tegangan surja yang besarnya mencapai tegangan percik arrester. Berdasarkan data yang ada tegangan percik arrester adalah 66 kV (lampiran 10). Selanjutnya dari masing-masing sistem akan dicari besarnya puncak tegangan surja dari gelombang tegangan surja datang yang membuat arrester terpercik. Gelombang tegangan surja datang yang dimaksud adalah gelombang e_1 yang merupakan gelombang tegangan surja yang terjadi pertama kali di saluran-1 yang kemudian menyebabkan timbulnya gelombang tegangan surja pada saluran-saluran lain dari sistem yang terhubung pada arrester dan trafo. Dengan menjadikan tegangan surja dengan nilai puncak 66 kV sebagai nilai minimal puncak tegangan surja yang terjadi di terminal arrester yang dapat membuat arrester tersebut terpercik, maka selanjutnya akan bisa didapatkan nilai minimal puncak tegangan surja gelombang e_1 yang menyebabkan timbulnya nilai puncak tegangan surja sebesar 66 kV pada terminal arrester dari masing-masing sistem penempatan arrester.

4.3.1. Sistem-1

Sistem-1 dengan bentuk rangkaian sebagaimana diperlihatkan Gambar 4.5 bila gelombang e_1 sebagai gelombang tegangan surja yang datang pada saluran-1 dengan nilai puncak E_1 maka pada saluran-2 yang menjadi tempat terpasangnya arrester akan terjadi gelombang tegangan surja e_2 dengan nilai puncak dua pertiga dari nilai puncak gelombang e_1 seperti berikut ini (Persamaan 4-1):

$$E_2 = \frac{2}{3} \cdot E_1$$

Gelombang e_2 ini akan dapat membuat arrester terpercik bila tegangan percik dari arrester telah dijangkau atau dilampaui oleh tegangan surja gelombang tersebut. Karena gelombang e_2 yang terjadi disebabkan oleh gelombang e_1 yang pertama kali datang pada sistem, maka dari sini akan dicari nilai puncak tegangan surja E_1 yang membuat arrester terpercik.

Tegangan surja yang terjadi pada arrester di titik A pada saluran-2 untuk sistem ini adalah V_A yang didapatkan dari Persamaan (4-3) seperti di bawah ini:

$$V_A = v_A(t_n) = 2 \cdot A_v \cdot E_2 \cdot [(1 - e^{-(t_n-t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-t)/t_b} + (1 - e^{-(t_n-3t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-3t)/t_b} \cdot \Gamma_C + (1 - e^{-(t_n-5t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-5t)/t_b} \cdot \Gamma_C^2 + \dots + (1 - e^{-(t_n-n \cdot t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-n \cdot t)/t_b} \cdot \Gamma_C^8]$$

atau dapat dituliskan menjadi

$$V_A = 2 \cdot A_v \cdot E_2 [k]$$

bila ditentukan nilai $V_A = 66$ kV maka nilai E_2 adalah 44,00713 kV. Berdasarkan Persamaan (4-1) nilai puncak tegangan surja gelombang e_1 akan didapatkan sebagaimana berikut ini:

$$E_1 = \frac{3}{2} \cdot 44,0071 = 66,0106 \text{ kV}$$

Jadi nilai minimal puncak tegangan surja gelombang e_1 yang dapat menyebabkan arrester terpercik adalah 66,0106 kV.

4.3.2. Sistem-2

Sistem-2 dengan bentuk rangkaian sebagaimana diperlihatkan Gambar 4.12 bila gelombang e_1 sebagai gelombang tegangan surja yang datang pada saluran-1 dengan nilai puncak E_1 maka pada saluran-2 yang menjadi tempat terpasangnya arrester akan terjadi gelombang tegangan surja e_2 dengan nilai puncak seperti berikut ini (persamaan 4-9):

$$E_2 = \frac{2 \frac{1}{z_1}}{\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_T}} \cdot E_1$$

Nilai tegangan surja pada arrester di titik A adalah V_A yang didapatkan dari Persamaan (4-10) seperti di bawah ini:

$$V_A = v_A(t_n) = A_V E_2 \cdot [(1 - e^{-(t_n-t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-t)/t_b} \cdot (1 + \Gamma_A) + (1 - e^{-(t_n-3t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-3t)/t_b} \cdot \Gamma_T (\Gamma_A + \Gamma_A^2) + (1 - e^{-(t_n-5t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-5t)/t_b} \cdot \Gamma_T^2 (\Gamma_A^2 + \Gamma_A^3) + \dots + (1 - e^{-(t_n-n.t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-n.t)/t_b} \cdot \Gamma_T^8 (\Gamma_A^8 + \Gamma_A^9)]$$

atau

$$V_A = A_V \cdot E_2 [k]$$

bila ditentukan nilai $V_A = 66$ kV maka nilai E_2 adalah 34,55 kV. Berdasarkan Persamaan (4-9) nilai puncak tegangan surja gelombang e_1 akan didapatkan sebagaimana berikut ini:

$$E_1 = \frac{\frac{1}{491} + \frac{1}{491} + \frac{1}{5000}}{2 \frac{1}{491}} \cdot 34,55 = 36,25 \text{ kV}$$

Jadi nilai minimal puncak tegangan surja gelombang e_1 yang dapat menyebabkan arrester pada sistem-2 terpercik adalah 36,25 kV.

4.3.3. Sistem-3

Sistem-3 memiliki bentuk rangkaian yang seperti sistem-2 yang diperlihatkan gambar 4.18. Sehingga nilai minimal puncak tegangan surja gelombang e_1 yang dapat menyebabkan arrester pada sistem-3 terpercik adalah 66,0106 kV.

4.3.4. Sistem-4

Sistem-4 dianggap sebagai sistem dengan satu saluran sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.21 dan Gambar 4.22 sebagai rangkaian penggantinya. Sehingga gelombang e_1 sebagai gelombang tegangan surja yang datang pada saluran-1 dengan nilai puncak E_1 adalah sama dengan tegangan surja yang akan membuat arrester terpercik.

Pada sistem ini nilai tegangan surja pada arrester di titik A sama dengan nilai tegangan surja di titik T. Dengan demikian tegangan surja pada arrester adalah V_A yang didapatkan dari Persamaan (4-14) seperti di bawah ini:

$$V_A = v_T(t_n) = v_T(t_n) = A_V E_1 \cdot [(1 - e^{-(t_n-t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-t)/t_b} \cdot (1 + \Gamma_T) + (1 - e^{-(t_n-3t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-3t)/t_b} \cdot \Gamma_C (\Gamma_T + \Gamma_T^2) + (1 - e^{-(t_n-5t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-5t)/t_b} \cdot \Gamma_C^2 (\Gamma_T^2 + \Gamma_T^3) + \dots + (1 - e^{-(t_n-n.t)/t_a}) \cdot e^{-(t_n-n.t)/t_b} \cdot \Gamma_C^8 (\Gamma_T^8 + \Gamma_T^9)]$$

$$V_A = A_V \cdot E_1 [k]$$

Sehingga dengan menentukan nilai tegangan surja pada arrester adalah 66 kV maka nilai puncak tegangan surja E_1 yang membuat arrester terpercik adalah

$$E_1 = \frac{V_A}{A_V \cdot [k]} = 56,4343 \text{ kV}$$

Jadi nilai minimal puncak tegangan surja yang membuat arrester terpercik pada sistem-4 adalah 56,4343 kV.

Nilai minimal puncak tegangan surja yang membuat arrester terpercik dari keempat sistem penempatan arrester dapat dirangkum dalam Tabel 4.2 di bawah ini:

Tabel 4.2. Nilai minimal puncak gelombang tegangan surja datang yang membuat arrester terpercik

	Sistem-1	Sistem-2	Sistem-3	Sistem-4
E_1 (kV)	66,0106	36,25	66,0106	56,4344

Bila arrester terpercik karena adanya tegangan surja yang terjadi pada arrester tersebut secara teknis menandakan bahwa tegangan surja tersebut telah mencapai batas tegangan kerja atau percik dari arrester sebagai pelindung trafo dari tegangan surja tersebut. Tabel 4.2 memperlihatkan puncak tegangan surja dari gelombang tegangan surja yang datang (e_1) yang membuat arrester bekerja atau terpercik pada masing-masing sistem penempatan arrester. Dapat dilihat bahwa pada sistem-1 dan 3 memiliki puncak tegangan surja datang yang lebih tinggi dibandingkan sistem-2 dan 4 untuk membuat arrester bekerja atau terpercik, sedangkan pada sistem-2 dan 4 dengan puncak tegangan surja datang yang lebih rendah dari sistem-1 dan 3 ternyata sudah dapat membuat arrester bekerja. Hal ini menandakan bahwa sistem-1 dan 3 tidak mudah menghasilkan tegangan surja yang tinggi yang membuat arrester bekerja, sedangkan sistem-2 dan 4 adalah sistem yang mudah menghasilkan tegangan surja yang tinggi hingga membuat arrester bekerja untuk melindungi trafo dari tegangan surja tersebut.

Hasil perhitungan dan pengamatan nilai tegangan surja pada arrester dan trafo dari keempat sistem penempatan arrester di atas dapat dirangkum dalam Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 di bawah ini:

Tabel 4.3 . Tegangan surja tertinggi pada Arrester (titik A)

	$V_A(\%)$	$t (\mu s)$
Sistem-1	99,9888	2,089
Sistem-2	182,0736	2,0893
Sistem-3	99,9888	2,089
Sistem-4	116,9499	2,1165

Tabel 4.4. Tegangan surja tertinggi pada Transformator (titik T)

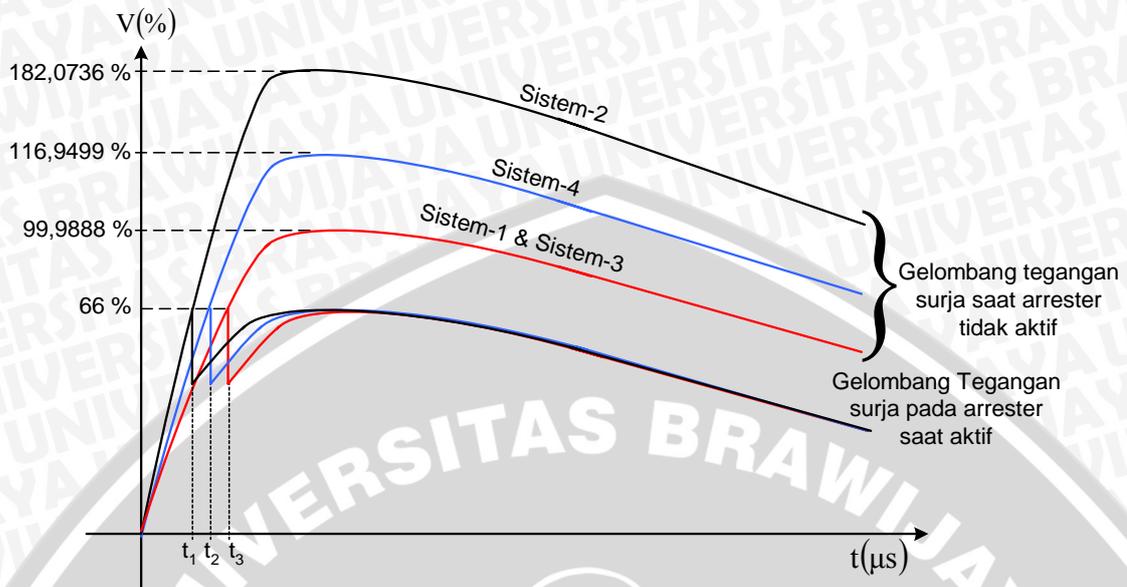
	$V_T(\%)$	$t (\mu s)$
Sistem-1	95,3058	2,093
Sistem-2	182,0736	2,091
Sistem-3	95,3058	2,093
Sistem-4	116,9499	2,1165

Tabel 4.3 menunjukkan nilai tegangan surja tertinggi pada arrester di titik A sedangkan Tabel 4.4 menunjukkan nilai tegangan tertinggi pada trafo di titik T. Dari kedua tabel ini terlihat bahwa pada sistem-1 dan 3, tegangan surja pada trafo (titik T) dan arrester (titik A) memiliki nilai tegangan surja paling rendah bila dibandingkan sistem 2 dan 4. Dan sistem-2 memiliki nilai tegangan surja paling tinggi bila dibandingkan dengan sistem yang lain baik pada trafo maupun pada arrester.

Puncak gelombang tegangan surja sangat mempengaruhi kecuraman dari gelombang surja tersebut. Semakin tinggi puncak gelombang tegangan surja, akan membuat gelombang tegangan surja semakin curam dan tentunya gelombang surja ini juga akan semakin besar. Gelombang tegangan surja yang besar, yang terjadi pada arrester akan menuntut arrester untuk bekerja pada kondisi yang lebih maksimal atau lebih berat, karena arrester akan merasakan gelombang tegangan surja yang besar. Sehingga besarnya gelombang tegangan surja yang terjadi pada arrester akan mempengaruhi umur kerja dari arrester tersebut.

Jika dibandingkan, gelombang tegangan surja yang terjadi pada arrester di sistem-1 dan sistem-3 memiliki nilai puncak yang lebih rendah bila dibandingkan dengan sistem-2, dengan demikian umur kerja arrester pada sistem-1 dan sistem-3 akan lebih lama dibandingkan umur kerja arrester sistem-2.

Berikut ini akan diperlihatkan kerja arrester pada masing-masing sistem penempatan arrester (Gambar 4.26).



Gambar 4.26. Kerja arrester pada sistem penempatan arrester

Pada Gambar 4.26 terlihat bahwa arrester yang berada pada sistem-2 akan merasakan gelombang tegangan surja yang lebih besar dibandingkan arrester pada sistem yang lain, sehingga arrester pada sistem-2 ini akan bekerja atau terpercik pada waktu yang lebih awal atau lebih cepat dibandingkan arrester pada sistem yang lain, hal inilah yang menjadikan arrester bekerja lebih berat. Sedangkan arrester yang berada pada sistem-1 dan sistem-3 akan merasakan gelombang tegangan surja yang lebih kecil dibandingkan arrester pada sistem yang lain, sehingga arrester pada sistem-1 dan sistem-3 ini akan bekerja atau terpercik pada waktu yang lebih akhir atau lebih lambat dibandingkan arrester pada sistem yang lain, dengan begini arrester dapat bekerja lebih ringan.

Hasil perhitungan dan pengamatan nilai arus surja tertinggi yang mengalir pada kawat lebur dari keempat sistem penempatan arrester diperlihatkan dalam Tabel 4.5. Dan besarnya energi pemutusan dan energi petir yang timbul pada kawat lebur dari keempat sistem penempatan arrester dapat dirangkum dalam Tabel 4.6 di bawah ini:

Tabel 4.5. Arus surja tertinggi pada kawat lebur

	I (%)	t (s)
Sistem-1	0,0189	$1,25 \cdot 10^{-5}$
Sistem-2	0,2236	$1,17445 \cdot 10^{-5}$
Sistem-3	0,4058	$1,23 \cdot 10^{-5}$
Sistem-4	0,0233	$1,17445 \cdot 10^{-5}$

Tabel 4.6. Energi kawat lebur

	W_{petir} (joule)	$W_{\text{pemutusan}}$ (joule)
Sistem-1	35,0218	518,411
Sistem-2	4893,05	
Sistem-3	16118,5	
Sistem-4	53,5138	

Dari Tabel 4.5 terlihat bahwa nilai arus surja yang paling tinggi mengalir pada kawat lebur adalah pada sistem-3 sedangkan nilai arus surja paling kecil yang mengalir pada kawat lebur adalah pada sistem-1. Sehingga dalam Tabel 4.6 terlihat bahwa sistem-3 akan menghasilkan energi petir yang diserap oleh kawat lebur dengan nilai paling tinggi sedangkan sistem-1 menghasilkan energi petir paling kecil. Dengan energi pemutusan kawat lebur yang besarnya 518,411 joule, maka energi petir yang timbul pada kawat lebur di sistem-2 dan sistem-3 akan dapat memutuskan kawat lebur tersebut, sedangkan di sistem-1 dan sistem-4 tidak akan memutuskan kawat lebur tersebut.



BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

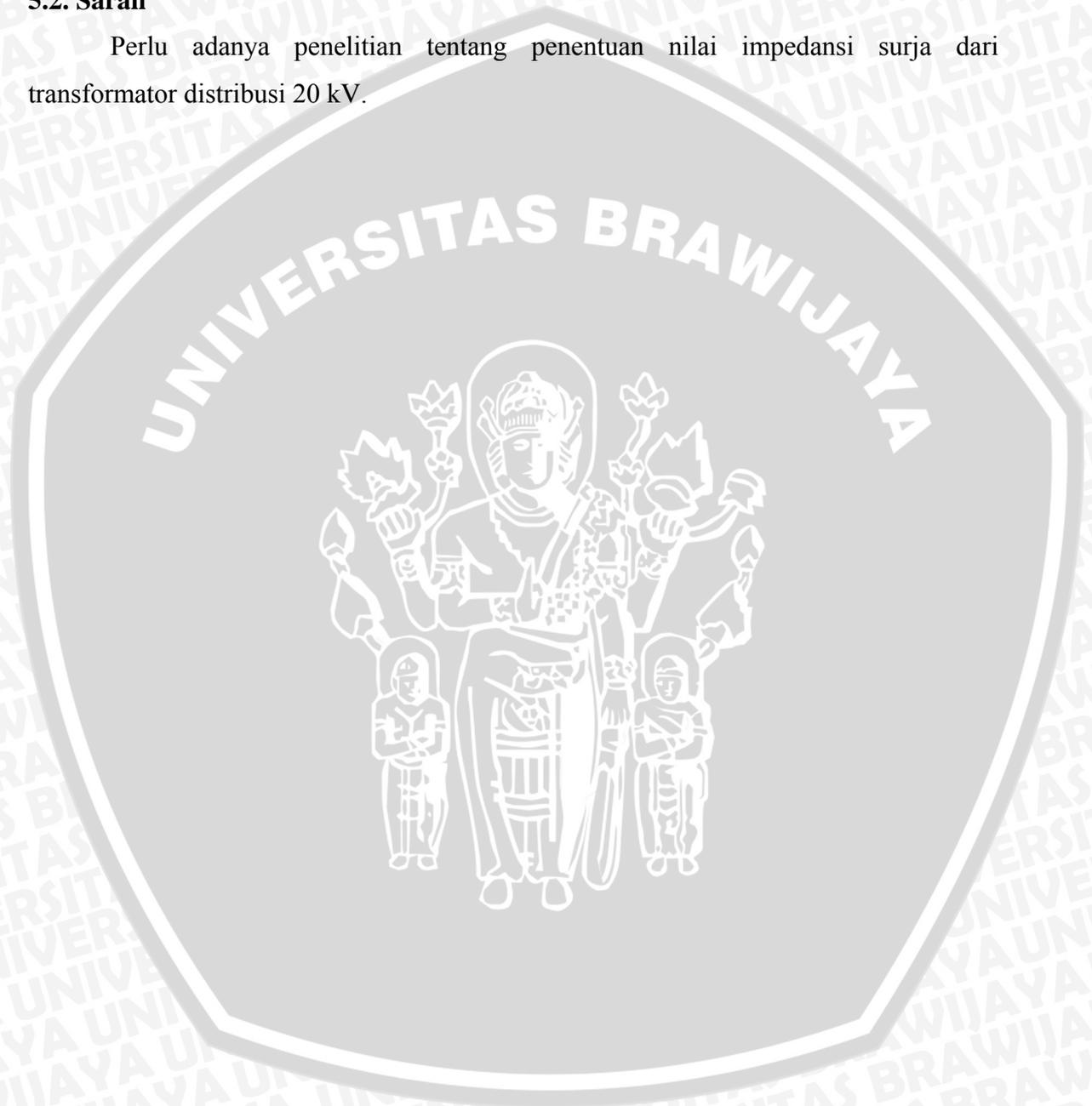
Dari hasil analisis dan perhitungan dapat diambil kesimpulan:

- a. Sistem penempatan arrester pada trafo distribusi 20 kV sangat mempengaruhi besarnya tegangan surja yang terjadi pada trafo dan arrester, dan mempengaruhi besarnya arus surja yang mengalir pada kawat lebur dari CO. Tegangan dan arus surja dari masing-masing sistem penempatan arrester adalah sebagai berikut:
 - Sistem-1, nilai tegangan surja 99,98 % pada arrester dan 95,3 % pada trafo, sehingga kerja dari arrester untuk melindungi trafo dari tegangan surja tersebut menjadi lebih ringan. Dan arus surja yang terjadi pada kawat lebur sebesar 0,0189 %, menimbulkan energi petir 35,02 joule sehingga tidak memutuskan kawat lebur dari CO yang memiliki energi pemutusan 518,411 joule.
 - Sistem-2, nilai tegangan surja 182,07 % pada arrester dan trafo, sehingga kerja dari arrester untuk melindungi trafo dari tegangan surja tersebut menjadi lebih berat karena tegangan surja yang dirasakan oleh arrester tersebut sangat besar. Dan arus surja yang mengalir pada kawat lebur sebesar 0,2236 %, menimbulkan energi petir 4893,05 joule sehingga memutuskan kawat lebur dari CO yang memiliki energi pemutusan 518,411 joule.
 - Sistem-3, nilai tegangan surja 99,98 % pada arrester dan 95,3 % pada trafo, sehingga kerja dari arrester untuk melindungi trafo dari tegangan surja tersebut adalah sama ringannya dengan kerja arrester pada sistem-1. Dan arus surja yang mengalir pada kawat lebur sebesar 0,4058 %, menimbulkan energi petir 16118,5 joule sehingga memutuskan kawat lebur dari CO yang memiliki energi pemutusan 518,411 joule.
 - Sistem-4, nilai tegangan surja 116,94 % pada arrester dan trafo, sehingga kerja dari arrester untuk melindungi trafo dari tegangan surja tersebut masih lebih berat dari kerja arrester pada sistem-1 dan 3. Dan arus surja yang mengalir pada kawat lebur sebesar 0,0233 %, menimbulkan energi petir 53,51 joule sehingga tidak memutuskan kawat lebur dari CO yang memiliki energi pemutusan 518,411 joule.
- b. Sistem-1 merupakan sistem penempatan arrester yang efektif. Dari segi tegangan surja yang dihasilkan: sistem ini tidak mudah menghasilkan tegangan surja yang tinggi sehingga dari keempat sistem yang ada, sistem-1 merupakan sistem yang

menghasilkan tegangan surja paling rendah baik pada trafo maupun pada arrester. Dari segi arus surja yang dihasilkan: sistem ini tidak mudah menghasilkan arus surja yang tinggi sehingga energi petir yang ditimbulkannya tidak akan memutuskan kawat lebur dari CO/pelebur.

5.2. Saran

Perlu adanya penelitian tentang penentuan nilai impedansi surja dari transformator distribusi 20 kV.



DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, Artono. 2001. *Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Dhofir, Moch. 2003. *Pengaruh Sisipan Induktor Dan Kapasitor Pada Sambungan Saluran Udara Dan Saluran Kabel Terhadap Peredaman Gelombang Surja*. Malang.
- Electric Utility Engineers. *Distribution System*. East Pittsburgh, Pennsylvania: Westinghouse Electric Corporation.
- Hutauruk, T.S. 1991. *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*. Edisi kedua, Jakarta: Erlangga.
- IEEE std 141-1986. *IEEE Recommended Practice of Electric Power Distribution for Industrial Plants*.
- Kind, Dieter. 1993. *Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. Bandung: ITB.
- Pabla, A.S. 1994. *Sistem Distribusi Daya Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- Paul, Clayton R dan Nasar A. Syed. 1987. *Introduction to Electromagnetic Fields*. International Edition, Singapore: McGraw-Hill Book Company.
- Proyek Listrik Pedesaan Jawa Timur. 1996. *Gambar Konstruksi Jaringan Distribusi*. Jawa Timur: PT. PLN.
- Rudenberg, Reinhold. 1968. *Electrical Shock Waves in Power Systems*. Massachusetts: Havard University Press.
- SPLN 52-3.1983. *Pola Pengamanan Sistem*. Bagian tiga, Jakarta: PLN.
- SPLN 64.1985. *Petunjuk Pemilihan dan Penggunaan Pelebur pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah*. Jakarta: PLN.
- SPLN 41-8.1981. *Kabel Saluran Udara*. Jakarta: PLN.
- Tobing, Bonggas L. 2003. *Peralatan Tegangan Tinggi*. Jakarta: PT Gramedia Utama.
- UNINDO. *Totally Filled Transformers*. GTU Series, Jakarta.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN



Total Tegangan surja pada arrester di titik A untuk sistem-1 dan sistem-3

t(s)	$2 \cdot e_2 \cdot \Gamma_C^0$	$2 \cdot e_2 \cdot \Gamma_C$	$2 \cdot e_2 \cdot \Gamma_C^2$	$2 \cdot e_2 \cdot \Gamma_C^3$	$2 \cdot e_2 \cdot \Gamma_C^4$	$2 \cdot e_2 \cdot \Gamma_C^5$	V_A (%)
0	0	0	0	0	0	0	0
1,7E-09	0	0	0	0	0	0	0
3,4E-09	0,5757719	0	0	0	0	0	0,57577192
5,1E-09	1,1491176	0	0	0	0	0	1,14911764
6,8E-09	1,7200473	-0,191905	0	0	0	0	1,52814252
8,5E-09	2,288571	-0,383001	0	0	0	0	1,90557012
1,02E-08	2,8546989	-0,573292	0,063962	0	0	0	2,34536902
1,19E-08	3,418441	-0,762781	0,127654	0	0	0	2,78331447
1,36E-08	3,9798072	-0,951471	0,191078	-0,02131849	0	0	3,19809575
1,53E-08	4,5388076	-1,139366	0,254235	-0,04254715	0	0	3,61112891
1,7E-08	5,0954521	-1,32647	0,317125	-0,06368635	0,0071055	0	4,02952674
1,87E-08	5,6497504	-1,512785	0,379751	-0,08473646	0,014181	0	4,44616113
2,04E-08	6,2017125	-1,698314	0,442112	-0,10569787	0,0212267	-0,0023682	4,85867122
2,21E-08	6,7513481	-1,883062	0,504211	-0,12657095	0,0282427	-0,0047265	5,2694426
2,38E-08	7,298667	-2,067031	0,566048	-0,14735605	0,0352291	-0,0070748	5,67927187
2,55E-08	7,8436789	-2,250224	0,627625	-0,16805356	0,0421861	-0,0094133	6,08737364
2,72E-08	8,3863934	-2,432646	0,688941	-0,18866384	0,0491138	-0,0117419	6,49349205
2,0825E-06	133,30815	-44,43155	14,80901	-4,9358339	1,6451094	-0,5483133	99,9887134
2,0842E-06	133,30821	-44,43158	14,80903	-4,93583922	1,6451115	-0,5483142	99,9887512
2,0859E-06	133,30825	-44,43161	14,80904	-4,93584401	1,6451134	-0,5483149	99,9887784
2,0876E-06	133,30828	-44,43163	14,80905	-4,93584825	1,6451152	-0,5483157	99,988795
2,0893E-06	133,30829	-44,43164	14,80905	-4,93585197	1,6451168	-0,5483163	99,9888012
2,091E-06	133,3083	-44,43165	14,80906	-4,93585515	1,6451182	-0,5483169	99,9887969
2,0927E-06	133,30828	-44,43165	14,80907	-4,93585781	1,6451195	-0,5483174	99,9887821
2,0944E-06	133,30826	-44,43165	14,80907	-4,93585994	1,6451205	-0,5483179	99,988757
2,0961E-06	133,30822	-44,43165	14,80907	-4,93586154	1,6451214	-0,5483183	99,9887216
2,1114E-06	133,30724	-44,43141	14,80902	-4,93585275	1,6451216	-0,5483194	99,9879448
2,1131E-06	133,30707	-44,43136	14,809	-4,93584923	1,6451207	-0,5483192	99,9878084
2,1148E-06	133,30688	-44,4313	14,80899	-4,93584522	1,6451197	-0,548319	99,9876621
2,1165E-06	133,30668	-44,43125	14,80897	-4,9358407	1,6451185	-0,5483187	99,987506
2,1182E-06	133,30646	-44,43118	14,80895	-4,93583569	1,6451172	-0,5483184	99,9873402
2,1199E-06	133,30623	-44,43112	14,80893	-4,93583018	1,6451157	-0,548318	99,9871646
2,1216E-06	133,30599	-44,43104	14,80891	-4,93582418	1,645114	-0,5483176	99,9869793
2,1233E-06	133,30574	-44,43097	14,80889	-4,93581769	1,6451122	-0,5483171	99,9867843
2,125E-06	133,30547	-44,43089	14,80887	-4,93581072	1,6451102	-0,5483165	99,9865798
2,5000E-06	133,01196	-44,33429	14,77708	-4,92535564	1,6416721	-0,5471863	99,7657378
7,5000E-06	123,88091	-41,29156	13,76316	-4,5874912	1,529087	-0,5096701	92,9165623
1,0000E-05	119,42332	-39,80578	13,26793	-4,42242046	1,4740662	-0,4913308	89,5731649
1,2500E-05	115,12614	-38,37345	12,79051	-4,26328938	1,4210252	-0,4736513	86,3500714
1,5000E-05	110,98358	-36,99267	12,33027	-4,10988428	1,3698927	-0,456608	83,2429538
1,7500E-05	106,99008	-35,66157	11,88659	-3,96199912	1,3206001	-0,440178	80,2476391
2,0000E-05	103,14027	-34,37837	11,45888	-3,81943529	1,2730812	-0,4243391	77,3601041
2,2500E-05	99,428998	-33,14134	11,04656	-3,68200131	1,2272722	-0,4090702	74,5764708
3,7500E-05	79,803466	-26,59982	8,866162	-2,95523912	0,9850303	-0,328327	59,8563894
4,0000E-05	76,931913	-25,64268	8,547133	-2,84890134	0,9495861	-0,3165128	57,7025888
4,2500E-05	74,163688	-24,71999	8,239583	-2,74638988	0,9154174	-0,3051238	55,6262879

Sumber: Hasil perhitungan

Keterangan: nilai V_A (%) yang diblok adalah tegangan surja tertinggi pada arrester

Total Tegangan surja pada trafo di titik T untuk sistem-1 dan sistem-3

t(s)	$e_3 \cdot (1 + \Gamma_T)$	$e_3 \cdot \Gamma_C \cdot (\Gamma_T + \Gamma_T^2)$	$e_3 \cdot \Gamma_C^2 \cdot (\Gamma_T^2 + \Gamma_T^3)$	$e_3 \cdot \Gamma_C^3 \cdot (\Gamma_T^3 + \Gamma_T^4)$	V_T (%)
0	0	0	0	0	0
7E-09	0	0	0	0	0
1,4E-08	2,144734787	0	0	0	2,144734787
2,1E-08	4,252496877	0	0	0	4,252496877
2,8E-08	6,323919867	-0,587026694	0	0	5,736893173
3,5E-08	8,359626492	-1,16393374	0	0	7,195692752
4,2E-08	10,36022882	-1,730894558	0,160672705	0	8,790006965
4,9E-08	12,32632842	-2,288079594	0,318575602	0	10,35682443
5,6E-08	14,25851658	-2,835656375	0,473756157	-0,043977077	11,85263928
6,3E-08	16,15737442	-3,373789555	0,626261022	-0,087196041	13,32264984
2,051E-06	121,3859997	-33,22314435	9,093044206	-2,488709357	95,30278708
2,058E-06	121,3873306	-33,22364146	9,093217904	-2,488767565	95,30375082
2,065E-06	121,3884252	-33,22407158	9,09337262	-2,488820394	95,30453038
2,072E-06	121,3892875	-33,22443587	9,09350868	-2,488867936	95,30512894
2,079E-06	121,3899215	-33,22473546	9,093626406	-2,488910282	95,3055496
2,086E-06	121,3903311	-33,22497147	9,093726115	-2,488947523	95,30579545
2,093E-06	121,3905203	-33,225145	9,093808115	-2,488979745	95,30586949
0,0000021	121,3904927	-33,22525712	9,093872713	-2,489007036	95,30577468
2,107E-06	121,3902522	-33,22530889	9,093920209	-2,48902948	95,30551393
2,114E-06	121,3898024	-33,22530134	9,093950896	-2,489047161	95,30509011
2,121E-06	121,3891469	-33,22523551	9,093965065	-2,489060161	95,30450602
2,128E-06	121,3882893	-33,2251124	9,093963	-2,48906856	95,30376444
2,135E-06	121,387233	-33,22493299	9,093944982	-2,489072438	95,30286806
8,250E-05	37,57588395	-10,28685422	2,816151178	-0,77095556	29,50017704
8,500E-05	36,22379834	-9,916704381	2,714818166	-0,743214418	28,43867799
8,750E-05	34,92036456	-9,559873565	2,6171314	-0,71647148	27,41537466
9,000E-05	33,66383197	-9,215882522	2,522959678	-0,690690829	26,42889264
9,250E-05	32,45251296	-8,884269242	2,432176518	-0,665837837	25,47790702
9,500E-05	31,28478059	-8,564588336	2,344659991	-0,641879125	24,56114052
9,750E-05	30,15906651	-8,256410445	2,260292553	-0,618782516	23,67736185
1,000E-04	29,07385877	-7,959321659	2,178960893	-0,596516987	22,82538402
1,025E-04	28,02769986	-7,672922959	2,100555773	-0,575052634	22,00406273
1,050E-04	27,01918467	-7,396829687	2,024971889	-0,554360628	21,21229489
1,075E-04	26,04695868	-7,130671025	1,952107726	-0,534413179	20,44901707
1,125E-04	24,20619815	-6,626740493	1,814150627	-0,496645749	19,0038678
1,150E-04	23,33519131	-6,388291799	1,748872403	-0,478775043	18,32005537
1,175E-04	22,49552572	-6,158423156	1,685943073	-0,461547376	17,66084844
1,200E-04	21,68607366	-5,936825832	1,625278116	-0,444939608	17,02536162
1,225E-04	20,90574796	-5,723202201	1,566796055	-0,428929434	16,41274139
1,250E-04	20,15350056	-5,517265346	1,510418342	-0,41349535	15,82216496
1,275E-04	19,42832113	-5,318738677	1,456069257	-0,398616629	15,25283912
1,300E-04	18,72923569	-5,127355553	1,403675804	-0,384273285	14,70399922
1,325E-04	18,0553053	-4,942858931	1,353167615	-0,370446056	14,17490812
1,425E-04	15,59351285	-4,268913373	1,16866684	-0,31993673	12,24219742
1,450E-04	15,03241455	-4,115305906	1,126614932	-0,308424509	11,80168885
1,475E-04	14,49150615	-3,967225666	1,086076169	-0,297326531	11,37703101

Sumber: Hasil perhitungan

Keterangan: nilai V_T (%) yang diblok adalah tegangan surja tertinggi pada trafo



Total Tegangan surja pada arrester di titik A untuk sistem-2

t(s)	$e_2.(1+\Gamma_A)$	$e_2.\Gamma_T.(\Gamma_A+\Gamma_A^2)$	$e_2.\Gamma_T^2.(\Gamma_A^2+\Gamma_A^3)$	$e_2.\Gamma_T^3.(\Gamma_A^3+\Gamma_A^4)$	V_A (%)
0	0	0	0	0	0
1,7E-09	0	0	0	0	0
3,4E-09	0,823197537	0	0	0	0,823197537
5,1E-09	1,642926249	0	0	0	1,642926249
6,8E-09	2,459200666	-0,038525645	0	0	2,420675022
8,5E-09	3,272035259	-0,076888948	0	0	3,195146311
1,02E-08	4,081444438	-0,115090591	0,001803	0	3,968156847
1,19E-08	4,887442552	-0,15313125	0,003598403	0	4,737909704
1,36E-08	5,690043889	-0,1910116	0,00538624	-8,43804E-05	5,504334149
1,53E-08	6,489262681	-0,228732311	0,007166543	-0,000168405	6,267528506
1,7E-08	7,285113095	-0,266294054	0,008939343	-0,000252076	7,027510257
1,87E-08	8,077609243	-0,303697493	0,010704672	-0,000335394	7,784288909
2,04E-08	8,866765175	-0,340943293	0,012462562	-0,000418361	8,537877695
2,21E-08	9,652594885	-0,378032113	0,014213043	-0,000500979	9,288290164
2,38E-08	10,43511231	-0,41496461	0,015956146	-0,000583248	10,03553963
2,55E-08	11,21433131	-0,451741441	0,017691903	-0,00066517	10,77963933
2,72E-08	11,99026573	-0,488363256	0,019420344	-0,000746748	11,52060247
2,0791E-06	190,5942366	-8,919795883	0,417445593	-0,019536405	182,0732233
2,0808E-06	190,5943595	-8,919803559	0,417446043	-0,019536431	182,073339
2,0825E-06	190,594462	-8,919810272	0,417446447	-0,019536454	182,0734352
2,0842E-06	190,5945442	-8,919816025	0,417446807	-0,019536475	182,073512
2,0859E-06	190,5946062	-8,919820823	0,417447121	-0,019536494	182,0735694
2,0876E-06	190,594648	-8,91982467	0,41744739	-0,019536511	182,0736076
2,0893E-06	190,5946697	-8,919827569	0,417447615	-0,019536525	182,0736267
2,091E-06	190,5946714	-8,919829525	0,417447795	-0,019536538	182,0736266
2,0927E-06	190,5946533	-8,919830542	0,41744793	-0,019536548	182,0736075
2,0944E-06	190,5946153	-8,919830623	0,417448022	-0,019536557	182,0735696
2,0995E-06	190,5943833	-8,919825294	0,417448033	-0,01953657	182,0733429
2,1199E-06	190,5917233	-8,91972224	0,417444222	-0,019536439	182,0707823
2,1216E-06	190,5913793	-8,91970788	0,417443632	-0,019536415	182,0704521
2,1233E-06	190,5910169	-8,91969265	0,417443001	-0,01953639	182,0701043
2,125E-06	190,5906362	-8,919676553	0,417442329	-0,019536362	182,069739
2,500E-06	190,1709872	-8,900283444	0,416546364	-0,01949498	181,6686267
5,000E-06	183,7262165	-8,598815137	0,402444589	-0,018835345	175,5118527
7,500E-06	177,1160623	-8,289444839	0,387965354	-0,018157683	169,1972369
1,000E-05	170,7429317	-7,991167464	0,374005277	-0,017504319	163,1090478
1,250E-05	164,5991225	-7,703622864	0,360547519	-0,016874465	157,2399272
1,500E-05	158,6763848	-7,426424923	0,347574009	-0,016267274	151,5819939
1,750E-05	152,9667638	-7,159201342	0,335067322	-0,015681932	146,127649
2,000E-05	147,4625909	-6,901593214	0,32301066	-0,015117652	140,8695666
2,250E-05	142,1564736	-6,653254548	0,311387832	-0,014573677	135,8006848
2,500E-05	137,0412853	-6,413851804	0,300183225	-0,014049275	130,9141956
3,750E-05	114,0972904	-5,340019324	0,24992536	-0,01169709	108,9960223
4,000E-05	109,9917501	-5,147870463	0,240932345	-0,011276196	105,07404
4,250E-05	106,0339387	-4,962635657	0,232262924	-0,010870447	101,2931815

Sumber : Hasil perhitungan

Keterangan: nilai V_A (%) yang diblok adalah tegangan surja tertinggi pada arrester

Total Tegangan surja pada trafo di titik T untuk sistem-2

t(s)	e_2	$e_2 \cdot \Gamma_A^1 \cdot (\Gamma_T^0 + \Gamma_T^1)$	$e_2 \cdot \Gamma_A^2 \cdot (\Gamma_T^1 + \Gamma_T^2)$	$e_2 \cdot \Gamma_A^3 \cdot (\Gamma_T^2 + \Gamma_T^3)$	V_T (%)
0	0	0	0	0	0
1,7E-09	0,411598769	0	0	0	0,411598769
3,4E-09	0,821463124	0	0	0	0,821463124
5,1E-09	1,229600333	0,392335946	0	0	1,621936279
6,8E-09	1,63601763	0,78301865	0	0	2,41903628
8,5E-09	2,040722219	1,172055038	-0,018361322	0	3,194415934
1,02E-08	2,443721276	1,559452005	-0,036645273	0	3,966528008
1,19E-08	2,845021945	1,945216419	-0,054852176	0,00085931	4,736245498
1,36E-08	3,24463134	2,32935512	-0,072982354	0,001714999	5,502719105
1,53E-08	3,642556547	2,711874918	-0,091036128	0,002567082	6,265922203
1,7E-08	4,038804621	3,092782594	-0,10901382	0,003415574	7,025908708
1,87E-08	4,433382588	3,472084901	-0,126915746	0,004260491	7,782693976
2,04E-08	4,826297443	3,849788565	-0,144742225	0,005101847	8,536289536
2,21E-08	5,217556153	4,225900283	-0,162493573	0,005939657	9,286708663
2,38E-08	5,607165657	4,600426722	-0,180170105	0,006773936	10,03396475
2,0791E-06	95,29717976	90,83714479	-4,251170598	0,198954333	182,0732135
2,0808E-06	95,29723102	90,83721315	-4,251174718	0,19895457	182,0733292
2,0825E-06	95,29727211	90,83727174	-4,251178376	0,198954784	182,0734255
2,0842E-06	95,29730309	90,8373206	-4,251181576	0,198954977	182,0735023
2,0859E-06	95,29732399	90,83735978	-4,251184318	0,198955148	182,0735598
2,0876E-06	95,29733485	90,8373893	-4,251186604	0,198955298	182,073598
2,0893E-06	95,29733572	90,83740922	-4,251188438	0,198955426	182,0736171
2,091E-06	95,29732664	90,83741958	-4,251189819	0,198955533	182,0736171
2,0927E-06	95,29730764	90,83742041	-4,251190752	0,198955619	182,0735981
2,0944E-06	95,29727879	90,83741175	-4,251191236	0,198955684	182,0735601
2,0961E-06	95,2972401	90,83739365	-4,251191275	0,198955727	182,0735034
2,0978E-06	95,29719163	90,83736614	-4,25119087	0,19895575	182,0734278
2,0995E-06	95,29713342	90,83732926	-4,251190023	0,198955752	182,0733336
2,1012E-06	95,2970655	90,83728306	-4,251188735	0,198955733	182,0732207
2,1131E-06	95,29632185	90,83670179	-4,251167553	0,198955026	182,0719163
2,1148E-06	95,29617778	90,83658238	-4,25116281	0,198954844	182,0716574
2,1182E-06	95,29586165	90,83631666	-4,251152055	0,19895442	182,0710859
2,1199E-06	95,29568967	90,83617042	-4,251146047	0,198954178	182,0707734
2,1216E-06	95,29550847	90,83601532	-4,25113962	0,198953916	182,0704433
2,1233E-06	95,29531808	90,83585139	-4,251132776	0,198953635	182,0700956
2,125E-06	95,29511855	90,83567867	-4,251125517	0,198953334	182,0697303
2,5000E-06	95,08398582	90,63692627	-4,241941869	0,198529107	181,6686233
5,0000E-06	91,8608209	87,56609513	-4,098297339	0,191809867	175,5118528
7,5000E-06	88,55582436	84,41561884	-3,950847862	0,184908895	169,197237
1,0000E-05	85,36933848	81,37810912	-3,808685322	0,178255357	163,1090479
1,2500E-05	82,29751044	78,44989669	-3,671638151	0,17184123	157,2399272
3,0000E-05	63,67664428	60,69960245	-2,840882977	0,13295995	121,6623791
3,2500E-05	61,38538017	58,51546064	-2,738660046	0,128175678	117,2846257
3,7500E-05	57,0472236	54,38012371	-2,545116632	0,119117395	108,9960224
4,0000E-05	54,99450462	52,42337446	-2,453536203	0,114831217	105,07404
4,2500E-05	53,01564822	50,53703453	-2,365251094	0,110699268	101,2931816

Sumber: Hasil perhitungan

Keterangan: nilai V_T (%) yang diblok adalah tegangan surja tertinggi pada trafo

**Total Tegangan surja pada trafo dan arrester di titik T dan titik A
untuk sistem-4**

t(s)	$e_2.(1+\Gamma_T)$	$e_2.\Gamma_C.(\Gamma_T+\Gamma_T^2)$	$e_2.\Gamma_C^2.(\Gamma_T^2+\Gamma_T^3)$	$e_2.\Gamma_C^3.(\Gamma_T^3+\Gamma_T^4)$	V (%)
0	0	0	0	0	0
8,3E-09	0	0	0	0	0
1,66E-08	3,808238822	0	0	0	3,808238822
2,49E-08	7,538759752	0	0	0	7,538759752
3,32E-08	11,19313945	-3,127325721	0	0	8,065813724
4,15E-08	14,77292257	-6,190829509	0	0	8,582093062
4,98E-08	18,27962247	-9,191806112	2,568159882	0	11,65597624
5,81E-08	21,71472176	-12,13152402	5,083909193	0	14,66710694
6,64E-08	25,07967302	-15,01122597	7,548311179	-2,108972895	15,50778534
7,47E-08	28,37589934	-17,83212951	9,962407521	-4,174906229	16,33127112
8,3E-08	31,60479493	-20,59542749	12,32721877	-6,198673141	18,86980161
9,13E-08	34,76772574	-23,30228854	14,64374476	-8,181129057	21,35648589
9,96E-08	37,86602999	-25,9538576	16,91296505	-10,12311205	22,37014891
1,079E-07	40,90101876	-28,55125637	19,13583935	-12,02544319	23,36307255
1,162E-07	43,87397655	-31,09558382	21,31330786	-13,8889269	25,50361027
1,245E-07	46,78616178	-33,58791661	23,44629173	-15,71435127	27,6004066
2,075E-06	182,0750897	-149,5172437	122,779897	-100,8226896	116,9464963
2,0833E-06	182,0760827	-149,5188546	122,7819007	-100,8249176	116,947805
2,0916E-06	182,076606	-149,5200637	122,7835605	-100,8268514	116,9487983
2,0999E-06	182,0766692	-149,5208791	122,7848834	-100,8284968	116,9494828
2,1082E-06	182,0762819	-149,5213088	122,7858763	-100,8298599	116,9498647
2,1165E-06	182,075453	-149,5213608	122,7865459	-100,8309463	116,9499501
2,1248E-06	182,0741917	-149,5210427	122,7868988	-100,8317616	116,9497452
2,1331E-06	182,0725068	-149,520362	122,7869415	-100,8323115	116,9492558
2,1414E-06	182,070407	-149,5193263	122,7866802	-100,8326013	116,9484878
2,1497E-06	182,0679006	-149,5179426	122,7861213	-100,8326363	116,9474468
2,158E-06	182,0649961	-149,5162182	122,7852707	-100,8324218	116,9461385
8,750E-05	52,37892606	-43,02404186	35,33994142	-29,02822248	33,65240002
9,000E-05	50,49418551	-41,47591626	34,06831128	-27,98370568	32,44149236
9,250E-05	48,6772632	-39,98349656	32,84243797	-26,97677353	31,27415654
9,500E-05	46,92571885	-38,5447783	31,66067501	-26,00607361	30,14882474
9,750E-05	45,23719998	-37,15782915	30,52143519	-25,0703022	29,06398554
1,000E-04	43,60943874	-35,82078632	29,42318841	-24,16820247	28,01818188
1,075E-04	39,06922909	-32,09145881	26,35991936	-21,65203374	25,10118906
1,100E-04	37,66340874	-30,93671818	25,41141559	-20,87293288	24,19797793
1,125E-04	36,30817374	-29,82352836	24,49704164	-20,12186626	23,32726687
1,150E-04	35,00170389	-28,75039423	23,61556943	-19,39782512	22,48788643
1,175E-04	33,74224449	-27,71587447	22,76581506	-18,69983701	21,67870926
1,200E-04	32,52810397	-26,71857963	21,94663723	-18,02696447	20,89864854
1,225E-04	31,35765163	-25,75717026	21,15693572	-17,37830377	20,1466566
1,400E-04	24,26258119	-19,92928048	16,36990794	-13,44623988	15,58821742
1,425E-04	23,38954552	-19,21216912	15,78087278	-12,96240649	15,02730967
1,450E-04	22,54792412	-18,52086143	15,21303275	-12,49598278	14,48658495
1,475E-04	21,73658662	-17,85442893	14,6656252	-12,0463423	13,96531703
1,500E-04	20,95444332	-17,21197654	14,1379149	-11,61288114	13,46280578
1,525E-04	20,20044372	-16,59264139	13,6291931	-11,19501713	12,9783763

Sumber: Hasil perhitungan

Keterangan: nilai V (%) yang diblok adalah tegangan surja tertinggi pada trafo dan arrester

Total arus surja pada kawat lebur (titik C) untuk sistem-1

t(s)	i_3	$i_3 \cdot \Gamma_T \cdot (1 + \Gamma_C)$	$i_3 \cdot \Gamma_T^2 \cdot (\Gamma_C + \Gamma_C^2)$	$i_3 \cdot \Gamma_T^3 \cdot (\Gamma_C^2 + \Gamma_C^3)$	I_C (%)
0	0	0	0	0	0
7E-09	5,779E-10	0	0	0	5,77947E-10
1,4E-08	4,615E-09	0	0	0	4,6153E-09
2,1E-08	1,555E-08	-6,32797E-10	0	0	1,4916E-08
2,8E-08	3,679E-08	-5,05332E-09	0	0	3,17372E-08
3,5E-08	7,173E-08	-1,70245E-08	1,732E-10	0	5,48767E-08
4,2E-08	1,237E-07	-4,02821E-08	1,38313E-09	0	8,48253E-08
4,9E-08	1,961E-07	-7,85354E-08	4,6597E-09	-4,7406E-11	1,22195E-07
5,6E-08	2,922E-07	-1,35466E-07	1,10255E-08	-3,7857E-10	1,67405E-07
6,3E-08	4,153E-07	-2,14731E-07	2,14956E-08	-1,27539E-09	2,20835E-07
7E-08	5,687E-07	-3,19958E-07	3,7078E-08	-3,01773E-09	2,82917E-07
7,7E-08	7,556E-07	-4,54751E-07	5,87732E-08	-5,88347E-09	3,54086E-07
8,4E-08	9,792E-07	-6,22685E-07	8,75745E-08	-1,01485E-08	4,3476E-07
9,1E-08	1,243E-06	-8,27312E-07	1,24468E-07	-1,60866E-08	5,25353E-07
9,8E-08	1,549E-06	-1,07216E-06	1,70433E-07	-2,39697E-08	6,26278E-07
1,05E-07	1,902E-06	-1,36071E-06	2,2644E-07	-3,40676E-08	7,37947E-07
1,12E-07	2,305E-06	-1,69646E-06	2,93455E-07	-4,66485E-08	8,60767E-07
1,19E-07	2,759E-06	-2,08284E-06	3,72436E-07	-6,19781E-08	9,95141E-07
1,26E-07	3,27E-06	-2,52328E-06	4,64331E-07	-8,03205E-08	1,14147E-06
1,33E-07	3,838E-06	-3,02116E-06	5,70086E-07	-1,01938E-07	1,30015E-06
1,4E-07	4,469E-06	-3,57987E-06	6,90636E-07	-1,2709E-07	1,47158E-06
2,142E-06	0,0095934	-0,010336183	0,002783551	-0,000749516	0,001450177
2,149E-06	0,0096704	-0,010419854	0,002806266	-0,000755683	0,001461407
2,156E-06	0,0097478	-0,010503864	0,002829075	-0,000761874	0,001472681
2,163E-06	0,0098254	-0,010588212	0,002851976	-0,000768092	0,001483996
2,17E-06	0,0099034	-0,010672898	0,00287497	-0,000774335	0,001495355
2,500E-06	0,0139181	-0,015038164	0,0040614	-0,001096768	0,002077669
5,000E-06	0,0587569	-0,0640232	0,017438647	-0,004749828	0,008438906
7,500E-06	0,1046458	-0,114345513	0,03123339	-0,008531287	0,014832007
1,000E-05	0,1308963	-0,143229821	0,039178197	-0,010716498	0,018428906
1,250E-05	0,1349107	-0,147746725	0,040447814	-0,011073135	0,018917562
1,500E-05	0,123021	-0,134801326	0,036924558	-0,010114288	0,017203813
1,750E-05	0,1030882	-0,11300496	0,03096655	-0,008485693	0,014388451
2,000E-05	0,0812033	-0,089041576	0,024407244	-0,006690275	0,011317427
2,750E-05	0,0310205	-0,034034325	0,009334525	-0,002560159	0,004311369
3,250E-05	0,0142587	-0,015647662	0,004292662	-0,001177616	0,00197947
1,225E-04	7,742E-11	-8,50409E-11	2,33517E-11	-6,41221E-12	1,0698E-11
1,250E-04	4,341E-11	-4,76806E-11	1,30929E-11	-3,59524E-12	5,99789E-12
1,275E-04	2,431E-11	-2,67014E-11	7,33213E-12	-2,01338E-12	3,35872E-12
1,300E-04	1,36E-11	-1,49357E-11	4,10132E-12	-1,12622E-12	1,87866E-12
1,325E-04	7,597E-12	-8,34517E-12	2,29159E-12	-6,2927E-13	1,04965E-12
1,350E-04	4,24E-12	-4,65779E-12	1,27904E-12	-3,51227E-13	5,85832E-13
1,375E-04	2,364E-12	-2,59704E-12	7,13156E-13	-1,95835E-13	3,26631E-13
1,425E-04	7,328E-13	-8,05004E-13	2,21059E-13	-6,07043E-14	1,01239E-13
1,450E-04	4,074E-13	-4,47557E-13	1,22903E-13	-3,37501E-14	5,62842E-14
1,475E-04	2,263E-13	-2,48606E-13	6,82696E-14	-1,87475E-14	3,12635E-14

Sumber: Penulis

Keterangan: nilai I_C (%) yang diblok adalah arus surja tertinggi pada kawat lebur

Total arus surja pada kawat lebur (titik T) untuk sistem-2

t(s)	$i_{1.}(1+\Gamma_T)$	$i_{1.}\Gamma_C.(\Gamma_T+\Gamma_T^2)$	$i_{1.}\Gamma_C^2.(\Gamma_T^2+\Gamma_T^3)$	$i_{1.}\Gamma_C^3.(\Gamma_T^3+\Gamma_T^4)$	I_T (%)
0	0	0	0	0	0
8,3E-09	0	0	0	0	0
1,66E-08	1,5123E-09	0	0	0	1,5123E-09
2,49E-08	1,2073E-08	0	0	0	1,20728E-08
3,32E-08	4,0659E-08	7,07757E-11	0	0	4,073E-08
4,15E-08	9,6173E-08	5,65005E-10	0	0	9,67381E-08
4,98E-08	1,8744E-07	1,90285E-09	3,3123E-12	0	1,89346E-07
5,81E-08	3,2321E-07	4,5009E-09	2,64423E-11	0	3,27737E-07
6,64E-08	5,1216E-07	8,77218E-09	8,90534E-11	1,55016E-13	5,21018E-07
7,47E-08	7,6288E-07	1,51262E-08	2,10642E-10	1,2375E-12	7,78219E-07
8,3E-08	1,0839E-06	2,39689E-08	4,10538E-10	4,1677E-12	1,10829E-06
9,13E-08	1,4837E-06	3,57028E-08	7,07906E-10	9,85805E-12	1,52011E-06
9,96E-08	1,9706E-06	5,07269E-08	1,12175E-09	1,92132E-11	2,02247E-06
1,079E-07	2,553E-06	6,94367E-08	1,67089E-09	3,313E-11	2,6241E-06
1,162E-07	3,239E-06	9,22244E-08	2,37402E-09	5,24977E-11	3,33363E-06
1,245E-07	4,0368E-06	1,19478E-07	3,24964E-09	7,81978E-11	4,15964E-06
1,328E-07	4,9546E-06	1,51584E-07	4,3161E-09	1,11104E-10	5,11062E-06
1,411E-07	6,0003E-06	1,88924E-07	5,59159E-09	1,52083E-10	6,19498E-06
2,5149E-06	0,02199061	0,00101314	4,66706E-05	2,14961E-06	0,023052669
2,5232E-06	0,0221627	0,001021135	4,70421E-05	2,16686E-06	0,023233145
2,5315E-06	0,0223354	0,00102916	4,74149E-05	2,18418E-06	0,023414267
2,5398E-06	0,02250872	0,001037214	4,77891E-05	2,20157E-06	0,023596035
2,5481E-06	0,02268266	0,001045297	4,81647E-05	2,21902E-06	0,023778447
2,5564E-06	0,02285721	0,001053408	4,85416E-05	2,23653E-06	0,023961501
2,5647E-06	0,02303236	0,001061548	4,89199E-05	2,25411E-06	0,024145195
5,000E-06	0,09199647	0,004280755	0,000199184	9,26777E-06	0,096486133
7,500E-06	0,16411792	0,007662228	0,000357724	1,67007E-05	0,172155386
1,17445E-05	0,21314227	0,00997504	0,000466828	2,18473E-05	0,223607059
1,250E-05	0,21186426	0,009917778	0,000464268	2,17331E-05	0,22226911
1,500E-05	0,19325682	0,009052751	0,000424057	1,9864E-05	0,202754468
1,750E-05	0,16198222	0,007591358	0,000355771	1,66732E-05	0,169946842
2,000E-05	0,12761731	0,005982965	0,000280493	1,31501E-05	0,13389456
3,000E-05	0,03341335	0,00156779	7,35623E-05	3,45162E-06	0,035058328
3,250E-05	0,02241936	0,001052075	4,93707E-05	2,31682E-06	0,023523237
1,250E-04	6,8288E-11	3,20821E-12	1,50723E-13	7,081E-15	7,16547E-11
1,275E-04	3,8242E-11	1,79662E-12	8,44067E-14	3,96548E-15	4,01269E-11
1,300E-04	2,1391E-11	1,00496E-12	4,72143E-14	2,21818E-15	2,24454E-11
1,325E-04	1,1952E-11	5,61516E-13	2,63808E-14	1,23941E-15	1,25411E-11
1,350E-04	6,6708E-12	3,13408E-13	1,47244E-14	6,91779E-16	6,9997E-12
1,375E-04	3,7194E-12	1,74747E-13	8,20997E-15	3,85721E-16	3,9028E-12
1,400E-04	2,0718E-12	9,73372E-14	4,57313E-15	2,14856E-16	2,17392E-12
1,425E-04	1,1529E-12	5,41667E-14	2,5449E-15	1,19566E-16	1,20975E-12
1,450E-04	6,4098E-13	3,01152E-14	1,4149E-15	6,6476E-17	6,72581E-13
1,475E-04	3,5605E-13	1,67282E-14	7,85946E-16	3,69262E-17	3,736E-13
1,500E-04	1,976E-13	9,28412E-15	4,362E-16	2,04942E-17	2,07346E-13
1,525E-04	1,0958E-13	5,14836E-15	2,41889E-16	1,13648E-17	1,1498E-13

Sumber: Penulis

Keterangan: nilai I_T (%) yang diblok adalah arus surja tertinggi pada kawat lebur

Total arus surja pada kawat lebur (titik C) untuk sistem-3

t(s)	$i_{11} \cdot (1 + \Gamma_C)$	$i_{11} \cdot \Gamma_{01} \cdot (\Gamma_C + \Gamma_C^2)$	$i_{11} \cdot \Gamma_{02} \cdot (\Gamma_C^2 + \Gamma_C^3)$	$i_{11} \cdot \Gamma_{03} \cdot (\Gamma_C^3 + \Gamma_C^4)$	I_C (%)
0	0	0	0	0	0
5,0000E-09	0	0	0	0	0
1,0000E-08	4,2145E-10	0	0	0	4,21449E-10
1,5000E-08	3,3673E-09	0	0	0	3,36728E-09
2,0000E-08	1,135E-08	1,40469E-10	0	0	1,14905E-08
2,5000E-08	2,6869E-08	1,12232E-09	0	0	2,79918E-08
3,0000E-08	5,2412E-08	3,78297E-09	4,68183E-11	0	5,62422E-08
3,5000E-08	9,0453E-08	8,9556E-09	3,74068E-10	0	9,97826E-08
4,0000E-08	1,4345E-07	1,7469E-08	1,26087E-09	1,56045E-11	1,62198E-07
4,5000E-08	2,1386E-07	3,01479E-08	2,9849E-09	1,24677E-10	2,47117E-07
5,0000E-08	3,0411E-07	4,78127E-08	5,82243E-09	4,20246E-10	3,5817E-07
5,5000E-08	4,1663E-07	7,12793E-08	1,00483E-08	9,94867E-10	4,98991E-07
6,0000E-08	5,5382E-07	1,0136E-07	1,5936E-08	1,94062E-09	6,73201E-07
6,5000E-08	7,1809E-07	1,38862E-07	2,37574E-08	3,3491E-09	8,84408E-07
7,0000E-08	9,1183E-07	1,84589E-07	3,37832E-08	5,31146E-09	1,1362E-06
7,5000E-08	1,1374E-06	2,39341E-07	4,62827E-08	7,91834E-09	1,43217E-06
1,2300E-06	0,004537	0,001479229	0,000482185	0,000157145	0,006731222
1,4350E-06	0,00684865	0,002240822	0,00073307	0,000239783	0,010178403
1,6400E-06	0,00971372	0,003186679	0,001045302	0,000342843	0,0144552
1,8450E-06	0,01313778	0,004318843	0,001419626	0,000466596	0,019570365
2,0500E-06	0,01711529	0,005635641	0,001855543	0,000610895	0,025516
4,1000E-06	0,08136265	0,026988909	0,008952364	0,002969493	0,121741302
6,1500E-06	0,16277516	0,054126746	0,017998332	0,005984793	0,243854304
8,2000E-06	0,22857483	0,076099769	0,025335899	0,008435044	0,342638124
1,0250E-05	0,26440915	0,088094723	0,029350943	0,009778967	0,396499671
1,2300E-05	0,2705735	0,090192599	0,030064617	0,010021658	0,405842651
1,4350E-05	0,25442535	0,084839398	0,028290077	0,009433439	0,381688079
1,6400E-05	0,22488064	0,075007189	0,025018037	0,008344553	0,337409352
1,8450E-05	0,18958887	0,063248765	0,021100409	0,007039297	0,284486798
2,0500E-05	0,15398545	0,051379467	0,017143488	0,005720164	0,231081061
2,2550E-05	0,12135166	0,040496123	0,013513907	0,004509705	0,182120704
2,4600E-05	0,09328129	0,031132247	0,010390254	0,003467701	0,140001366
2,6650E-05	0,07021992	0,023437808	0,007823003	0,002611138	0,105394622
2,8700E-05	0,05192672	0,017333351	0,005785941	0,001931369	0,0779411
3,0750E-05	0,03781419	0,01262341	0,004214038	0,00140676	0,056760416
4,3050E-04	4,2292E-43	1,41309E-43	4,72155E-44	1,57761E-44	6,35099E-43
4,3460E-04	1,5252E-43	5,09609E-44	1,70276E-44	5,68943E-45	2,29039E-43
4,3665E-04	9,1582E-44	3,06005E-44	1,02245E-44	3,41633E-45	1,37531E-43
4,3870E-04	5,4989E-44	1,83734E-44	6,13912E-45	2,05127E-45	8,25776E-44
4,4075E-04	3,3015E-44	1,10312E-44	3,68586E-45	1,23156E-45	4,95787E-44
4,4280E-04	1,982E-44	6,6226E-45	2,21281E-45	7,39368E-46	2,97646E-44
4,4485E-04	1,1898E-44	3,97563E-45	1,32838E-45	4,43852E-46	1,78681E-44
4,4690E-04	7,1423E-45	2,38646E-45	7,97392E-46	2,66433E-46	1,07257E-44
4,4895E-04	4,2871E-45	1,43244E-45	4,78623E-46	1,59923E-46	6,43797E-45
4,5100E-04	2,5731E-45	8,5975E-46	2,87269E-46	9,59855E-47	3,86406E-45
4,5305E-04	1,5443E-45	5,15989E-46	1,72408E-46	5,76069E-47	2,31906E-45

Sumber: Penulis

Keterangan: nilai I_C (%) yang diblok adalah arus surja tertinggi pada kawat lebur

Total arus surja pada kawat lebur (titik T) untuk sistem-4

t(s)	$i_{L1}(1+\Gamma_T)$	$i_{L1}\Gamma_C(\Gamma_T+\Gamma_T^2)$	$i_{L1}\Gamma_C^2(\Gamma_T^2+\Gamma_T^3)$	$i_{L1}\Gamma_C^3(\Gamma_T^3+\Gamma_T^4)$	I_T (%)
0	0	0	0	0	0
8,3E-09	0	0	0	0	0
1,66E-08	2,58311E-10	0	0	0	2,58311E-10
2,49E-08	2,0621E-09	0	0	0	2,0621E-09
3,32E-08	6,94485E-09	-2,12125E-10	0	0	6,73272E-09
4,15E-08	1,6427E-08	-1,6934E-09	0	0	1,47336E-08
4,98E-08	3,20159E-08	-5,70311E-09	1,74197E-10	0	2,6487E-08
5,81E-08	5,52062E-08	-1,34898E-08	1,39062E-09	0	4,3107E-08
6,64E-08	8,74795E-08	-2,62915E-08	4,68339E-09	-1,4305E-10	6,57284E-08
7,47E-08	1,30305E-07	-4,53353E-08	1,10778E-08	-1,14198E-09	9,49054E-08
8,3E-08	1,85138E-07	-7,18382E-08	2,15905E-08	-3,846E-09	1,31162E-07
9,13E-08	2,53424E-07	-1,07006E-07	3,72294E-08	-9,09712E-09	1,75487E-07
9,96E-08	3,36592E-07	-1,52036E-07	5,89935E-08	-1,77302E-08	2,28881E-07
1,079E-07	4,36061E-07	-2,08112E-07	8,78736E-08	-3,05728E-08	2,91951E-07
1,162E-07	5,53238E-07	-2,76409E-07	1,24852E-07	-4,84455E-08	3,65281E-07
1,245E-07	6,89517E-07	-3,58094E-07	1,70901E-07	-7,21618E-08	4,49766E-07
1,328E-07	8,46277E-07	-4,54319E-07	2,26987E-07	-1,02528E-07	5,46309E-07
1,411E-07	1,02489E-06	-5,66231E-07	2,94066E-07	-1,40344E-07	6,55542E-07
2,5232E-06	0,003785527	-0,003060485	0,002473982	-0,001999607	0,002400693
2,5315E-06	0,003815027	-0,003084537	0,002493591	-0,002015591	0,002419523
2,5398E-06	0,003844631	-0,003108675	0,00251327	-0,002031634	0,00243842
2,5481E-06	0,00387434	-0,0031329	0,002533021	-0,002047737	0,002457385
2,5564E-06	0,003904154	-0,003157211	0,002552844	-0,002063898	0,002476417
2,5647E-06	0,003934072	-0,003181608	0,002572737	-0,002080117	0,002495516
5,000E-06	0,015713574	-0,012830018	0,010475266	-0,008552405	0,010044046
7,500E-06	0,028032369	-0,022964762	0,018812984	-0,015411573	0,017968607
1,174E-05	0,036406036	-0,029896581	0,024550879	-0,020160902	0,023384542
1,250E-05	0,036187744	-0,029724958	0,024416235	-0,020055515	0,023249527
1,500E-05	0,033009476	-0,027132352	0,022301531	-0,018330752	0,021219917
1,750E-05	0,027667578	-0,022752356	0,018710286	-0,015386268	0,017793331
2,000E-05	0,021797835	-0,017931778	0,014751373	-0,012135024	0,014022829
2,250E-05	0,016380236	-0,013478777	0,01109124	-0,0091266	0,010540193
2,750E-05	0,008329833	-0,006857118	0,005644773	-0,004646767	0,00536191
3,000E-05	0,00570721	-0,004698885	0,003868703	-0,003185191	0,00367422
1,200E-04	3,7058E-11	-3,05488E-11	2,51829E-11	-2,07596E-11	2,38839E-11
1,225E-04	2,08036E-11	-1,71496E-11	1,41374E-11	-1,16543E-11	1,3408E-11
1,300E-04	3,65369E-12	-3,01202E-12	2,48304E-12	-2,04696E-12	2,35487E-12
1,325E-04	2,04146E-12	-1,68294E-12	1,38739E-12	-1,14374E-12	1,31577E-12
1,350E-04	1,13942E-12	-9,39326E-13	7,7437E-13	-6,38382E-13	7,34388E-13
1,375E-04	6,35304E-13	-5,23741E-13	4,31769E-13	-3,55948E-13	4,09473E-13
1,400E-04	3,53874E-13	-2,91733E-13	2,40505E-13	-1,98272E-13	2,28084E-13
1,425E-04	1,96924E-13	-1,62345E-13	1,33838E-13	-1,10337E-13	1,26925E-13
1,450E-04	1,09484E-13	-9,02593E-14	7,44107E-14	-6,13449E-14	7,05668E-14
1,475E-04	6,08151E-14	-5,01368E-14	4,13335E-14	-3,4076E-14	3,91981E-14
1,500E-04	3,3752E-14	-2,78258E-14	2,29401E-14	-1,89123E-14	2,17548E-14
1,525E-04	1,87165E-14	-1,54304E-14	1,27211E-14	-1,04876E-14	1,20638E-14

Sumber: Penulis

Keterangan: nilai I_T (%) yang diblok adalah arus surja tertinggi pada kawat lebur

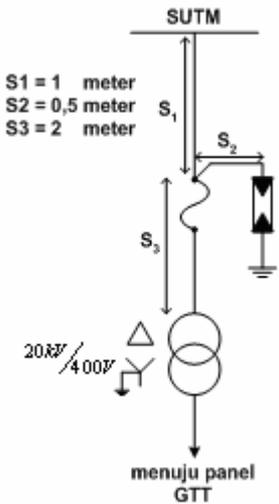
Data Lapangan

Data lapangan tersebut meliputi:

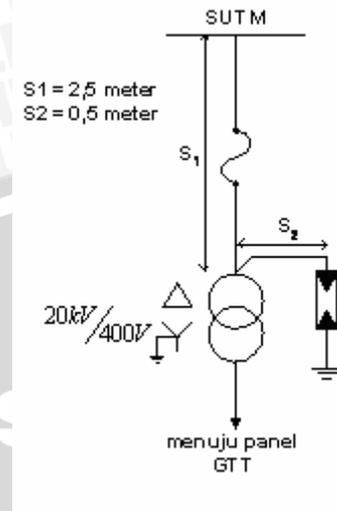
1. Spesifikasi transformator distribusi yang berupa:
 - a. Plat nama (name plate) : UNINDO
 - b. Tegangan kerja : ≤ 24 kV
 - c. Test tegangan frekuensi daya : 50 kV
 - d. BIL : 125 kV
2. Spesifikasi arester yang berupa:
 - a. Plat nama : SUZHOU PORCELAIN
INSULATOR
 - b. Jenis arester : Katup
 - c. Pengenal tegangan : 24 kV
 - d. Arus pelepasan nominal (rated current) : 5 kA
 - e. P.F Voltage : ≥ 40 kV
 - f. Tegangan Impuls (Voltage Impuls) : ≤ 66 kV
 - g. Tegangan sisa (Residual Voltage) : ≤ 76 kV
3. Spesifikasi fuse cut out yang berupa:
 - a. Plat nama : SI CUT OUT U.S.A
 - b. Pengenal arus atau rating arus : 100/200 AMP
 - c. Tegangan pengenal : 27 kV
 - d. Karakteristik pemutusan fuse link
dari cut out berupa kurva pemutusan : SPLN 52-3 : 1983 hal. 22
4. Spesifikasi kawat penghantar yang digunakan sebagai pengawatan, yaitu berupa:
 - a. Jenis : AAAC
 - b. Luas penampang atau diameter kawat : 70 mm²
 - c. Panjang kawat yang digunakan
sebagai pengawatan : Lampiran 11
 - d. Ketinggian kawat di atas tanah : rata-rata 8,5 meter
5. Spesifikasi Transformator daya di GI sisi 20 kV
 - a. Hubungan kumparan sisi 20 kV : Bintang (Y)
 - b. Sistem pembumian titik netral transformator : ditanahkan melalui tahanan dg
nilai 500 ohm (SPLN 52-3 : 1983
hal 7, 44 dan 56)

Pengawatan Arrestor

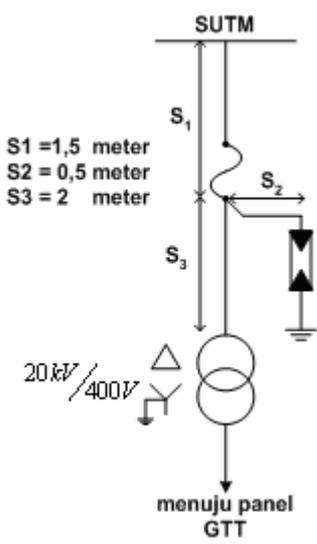
Sistem-1



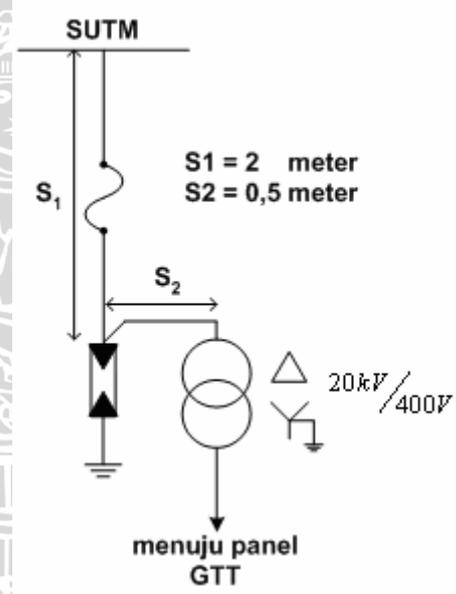
Sistem-2



Sistem-3



Sistem-4



Sumber: Data lapangan

Keterangan: S : panjang kawat atau saluran

SUTM : Saluran Udara Tegangan Menengah

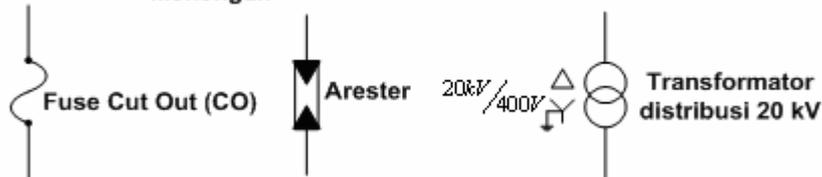


Foto Gardu Transformator Tiang

Sistem-1



Sistem-2



Sistem-3



Sistem-4



Sumber: Data lapangan