



TUGAS AKHIR - EE 184801

ANALISIS TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE PADA
SWITCHING CIRCUIT BREAKER TEGANGAN
MENENGAH MENGGUNAKAN GELOMBANG BERJALAN
DENGAN VARIASI HUBUNGAN BELITAN TRAFKO DAYA

Yudistira Wahyu Pratama Putra
0711154000041

Dosen Pembimbing
IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



TUGAS AKHIR - EE 184801

ANALISIS TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE PADA SWITCHING CIRCUIT BREAKER TEGANGAN MENENGAH MENGGUNAKAN GELOMBANG BERJALAN DENGAN VARIASI BELITAN TRAF0 DAYA

Yudistira Wahyu Pratama Putra
0711154000041

Dosen Pembimbing
IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



FINAL PROJECT - EE 184801

**ANALYSIS OF TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE
ON SWITCHING OF MEDIUM VOLTAGE CIRCUIT
BREAKER BY CONSIDERING THE TRAVELING
WAVE WITH VARIATION OF POWER
TRANSFORMER WINDING**

Yudistira Wahyu Pratama Putra
0711154000041

Supervisors
IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

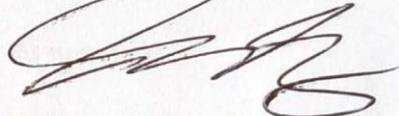
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul "**ANALISIS *TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE* PADA *SWITCHING CIRCUIT BREAKER* TEGANGAN MENENGAH MENGGUNAKAN GELOMBANG BERJALAN DENGAN VARIASI HUBUNGAN BELITAN TRAF0 DAYA**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2020



Yudistira Wahyu Pratama Putra
0711154000041

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

**ANALISIS TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE PADA
SWITCHING CIRCUIT BREAKER TEGANGAN
MENENGAH MENGGUNAKAN GELOMBANG
BERJALAN DENGAN VARIASI HUBUNGAN
BELITAN TRAF0 DAYA**

TUGAS AKHIR

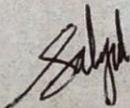
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.

NIP. 197301232002121001

Dosen Pembimbing II



Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

NIP. 197007121998021001



---Halaman ini sengaja dikosongkan---

ANALISIS *TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE* MENGUNAKAN GELOMBANG BERJALAN PADA *SWITCHING CIRCUIT BREAKER* TEGANGAN MENENGAH DENGAN VARIASI HUBUNGAN BELITAN TRAFODAYA

Nama mahasiswa : Yudistira Wahyu Pratama Putra
Dosen Pembimbing I : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Dosen Pembimbing II : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

ABSTRAK

Switching circuit breaker akan menyebabkan fenomena *transient recovery voltage* yang dapat mempengaruhi kinerja dari stabilitas sistem kelistrikan. Operasi pensaklaran akan menghasilkan gejala surja hubung yang merambat pada saluran transmisi yang akan dipantulkan dan diteruskan jika bertemu saluran transmisi dengan nilai impedansi surja yang berbeda. Nilai dari gelombang berjalan diperoleh dari tegangan sistem yang dipantulkan oleh impedansi saluran beban dan impedansi *circuit breaker* yang ditanahkan karena proses *switching*. Penghitungan gelombang berjalan dilakukan secara terus-menerus hingga tegangan pada saluran transmisi bernilai nol. Dari permasalahan tersebut, maka akan dilakukan analisis nilai tegangan puncak *transient recovery voltage* menggunakan nilai tegangan puncak gelombang berjalan untuk mengetahui karakteristik *transient recovery voltage* yang terjadi pada proses *switching circuit breaker* menurut pendekatan dari gelombang berjalan yang ditimbulkan saat terjadi gangguan pada sistem. Hasil dari tugas akhir ini adalah besarnya nilai tegangan puncak *transient recovery voltage* lebih dari 267 % dari nilai tegangan puncak gelombang berjalan pada fasa yang sama dan nilai tegangan puncak gelombang berjalan pada tiap-tiap fasa tidak selalu merepresentasikan nilai tegangan puncak *transient recovery voltage* pada fasa yang sama.

Kata kunci : *Circuit Breaker, Transient Recovery Voltage, Gelombang Berjalan*

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

ANALYSIS OF TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE ON SWITCHING OF MEDIUM VOLTAGE CIRCUIT BREAKER BY CONSIDERING THE TRAVELING WAVE WITH VARIATION OF POWER TRANSFORMER WINDING

Name : Yudistira Wahyu Pratama Putra
Supervisor I : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Supervisor II : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

ABSTRACT

Switching circuit breaker causing transient recovery voltage phenomena which can affect the performance of electrical system. Switching operation will produce a connecting surge which propagates on the transmission line and will be reflected and continued if encounter a transmission line with different surge impedances value. The value of traveling wave is obtained from system voltage reflection by the load line impedance and circuit breaker impedance that it grounded because of switching process. Calculation of traveling waves is carried out continuously until the voltage on the transmission line is zero. From these problems, peak value voltage of transient recovery voltage will be analyze using peak value voltage of traveling wave to determine the transient recovery voltage characteristics that happened on switching of circuit breaker which it caused when a disturbance in the system. The result of this final project is peak voltage value of transient recovery voltage more than 267% of peak voltage value of traveling wave at the same phase and peak voltage value of traveling wave in each phase doesn't always represent peak voltage value of transient recovery voltage in the same phase.

Key Word : Circuit Breaker, Transient Recovery Voltage, Traveling Wave

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**ANALISIS TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE PADA SWITCHING CIRCUIT BREAKER TEGANGAN MENENGAH MENGGUNAKAN GELOMBANG BERJALAN**”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu Witri Kusumawati, bapak Karjono selaku orang tua penulis yang senantiasa mendukung serta memberi semangat kepada penulis. Serta doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Bapak Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc. dan IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Dekan Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas.
5. Kepala Departemen Teknik Elektro ITS.
6. Kepala Program Studi Sarjana Teknik Elektro ITS
7. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
8. Brilliant Akbar Bima Nusantara sebagai adik yang selalu memberikan dukungan dan masukan kepada penulis.
9. Ratna Mutia Habsary sebagai teman yang selalu memberikan dukungan dan masukan kepada penulis.
10. Teman-teman seperjuangan e55 yang telah berjuang bersama selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.
11. Teman-teman lab Tegangan Tinggi yang telah menemani dan memberikan dukungan saat penyusunan tugas akhir ini.
12. Teman-teman kabinet dan departemen lingkaran kampus Himatektro serasi yang telah memberikan dukungan dan berjuang bersama.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat yang luas.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xix

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metodologi Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4

BAB II *TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE* DAN GELOMBANG BERJALAN

2.1 <i>Circuit Breaker</i>	7
2.1.1 Fungsi Bagian Utama <i>Circuit Breaker</i>	9
2.1.2 Proses Pemutusan <i>Circuit Breaker</i> pada Suatu Sistem.....	10
2.1.3 Surja Hubung	11
2.2 <i>Transient Recovery Voltage</i>	14
2.2.1 Gelombang <i>Transient Recovery Voltage</i>	15
2.2.2 Transien pada rangkaian R-L-C	18
2.3 Gelombang Berjalan.....	19
2.3.1 Gelombang Pantul.....	22

BAB III PEMODELAN RANGKAIAN *TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE* DAN PENURUNAN RUMUS GELOMBANG BERJALAN

3.1 Rangkaian <i>Circuit Breaker</i> Tegangan Menengah	25
3.2 Pemodelan Rangkaian <i>Transient Recovery Voltage</i>	26
3.2.1 Pemodelan Rangkaian <i>Switching Circuit Breaker</i> dengan hubungan belitan trafo daya yang berbeda.....	26
3.2.1.1 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Wye</i> pada Kondisi <i>Switching Circuit Breaker</i>	28
3.2.1.2 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Delta</i> pada Kondisi <i>Switching Circuit Breaker</i>	29
3.2.1.3 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Delta</i> pada Kondisi <i>Switching Circuit Breaker</i>	29
3.2.1.4 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Wye</i> pada Kondisi <i>Switching Circuit Breaker</i>	30
3.4 Penurunan Rumus Gelombang Berjalan dengan Metode <i>Bewley Lattice Diagram</i>	30

BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS *TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE* MENGGUNAKAN GELOMBANG BERJALAN

4.1 Parameter Impedansi Saluran	35
4.2 Pemodelan dan Simulasi <i>Switching Circuit Breaker</i> 20 kV Menggunakan perangkat lunak ATPDraw.....	36
4.2.1 Pemodelan dan Simulasi <i>Switching Circuit Breaker</i> 20 kV dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Delta – Wye</i>	37
4.2.1.1 Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Delta–Wye</i> pada kondisi normal.....	37

4.2.1.2 Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Wye</i> saat <i>Switching Circuit Breaker</i>	38
4.2.1.3 Analisis <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Wye</i> Menggunakan Gelombang Berjalan	39
4.2.2 Pemodelan dan Simulasi <i>Switching Circuit Breaker</i> 20 kV dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Delta</i>	43
4.2.2.1 Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Wye</i> pada kondisi normal.....	44
4.2.2.2 Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Delta</i> saat <i>Switching Circuit Breaker</i>	45
4.2.2.3 Analisis <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Delta</i> Menggunakan Gelombang Berjalan	46
4.2.3 Pemodelan dan Simulasi <i>Switching Circuit Breaker</i> 20 kV dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Delta</i>	51
4.2.3.1 Analisis Dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Delta</i> pada Kondisi Normal	51
4.2.3.2 Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Delta</i> pada <i>Switching Circuit Breaker</i>	52
4.2.3.3 Analisis <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Delta</i> menggunakan gelombang berjalan.....	53
4.2.4 Pemodelan dan Simulasi <i>Switching Circuit Breaker</i> 20 kV dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Wye</i>	58

4.2.4.1 Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Wye</i> pada Kondisi Normal	58
4.2.4.2 Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Wye</i> pada <i>Switching Circuit Breaker</i>	59
4.2.4.3 Analisis <i>Transient Recovery Voltage</i> dengan Hubungan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Wye</i> menggunakan gelombang berjalan.....	60

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran	66

DAFTAR PUSTAKA	67
BIOGRAFI PENULIS	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Circuit Breaker</i> Tegangan Menengah	7
Gambar 2.2	Proses <i>Switching Circuit Breaker</i>	11
Gambar 2.3	Standar Tegangan Impuls <i>Switching</i>	13
Gambar 2.4	Bentuk Tegangan Impuls <i>Switching</i>	14
Gambar 2.5	Gelombang Arus, <i>Transient Recovery Voltage</i> , dan <i>Recovery Voltage</i>	15
Gambar 2.6	Gelombang <i>Transient Recovery Voltage</i>	16
Gambar 2.7	Arus dan Gelombang <i>Transient Recovery Voltage</i> Ketika Gangguan pada Arus Resistif	16
Gambar 2.8	Arus dan Gelombang <i>Transient Recovery Voltage</i> Ketika Gangguan pada Arus Induktif	17
Gambar 2.9	<i>Transient Recovery Voltage</i> dan <i>Recovery Voltage</i> pada Rangkaian Resistif, Induktif, dan Kapasitif	17
Gambar 2.10	Rangkaian R-L-C	18
Gambar 2.11	Gelombang Pantul dan Maju dari Suatu Gelombang Datang	21
Gambar 2.12	Gelombang Pantul dan Maju Metode <i>Bewley Lattice Diagram</i>	22
Gambar 3.1	Rangkaian <i>Switching</i> dan Respon Gelombang Impuls	25
Gambar 3.2	Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya pada Kondisi Normal	26
Gambar 3.3	Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Wye</i> pada Kondisi <i>Switching Circuit Breaker</i>	28
Gambar 3.4	Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Delta</i> pada Kondisi <i>Switching Circuit Breaker</i>	29
Gambar 3.5	Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Delta</i> pada Kondisi <i>Switching Circuit Breaker</i>	29
Gambar 3.6	Pemodelan Rangkaian Dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Wye</i> pada Kondisi <i>Switching Circuit Breaker</i>	30
Gambar 3.7	Sistem Transmisi dengan Tiga Nilai Impedansi yang Berbeda	31

Gambar 3.8	Pemodelan Gelombang Pantul <i>Bewley Lattice Diagram</i>	32
Gambar 3.9	<i>Flowchart</i> Pengambilan dan Pengolahan Data.....	33
Gambar 4.1	Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Wye</i> pada Kondisi Normal	37
Gambar 4.2	Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Wye</i> pada Kondisi Normal	37
Gambar 4.3	Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Wye</i> saat <i>Switching Circuit Breaker</i>	38
Gambar 4.4	Hasil Analisis Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Wye</i> saat <i>Switching Circuit Breaker</i>	39
Gambar 4.5	Grafik Penghitungan Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Wye</i> Menggunakan MATLAB.....	42
Gambar 4.6	Visualisasi Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Wye</i>	43
Gambar 4.7	Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian Dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Delta</i> pada Kondisi Normal	44
Gambar 4.8	Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Delta</i> saat <i>Switching Circuit Breaker</i>	44
Gambar 4.9	Hasil Simulasi Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Delta</i> saat <i>Switching Circuit Breaker</i>	46
Gambar 4.10	Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Delta</i> saat <i>Switching Circuit Breaker</i>	45
Gambar 4.11	Grafik Penghitungan Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Delta</i> Menggunakan MATLAB.....	50
Gambar 4.12	Visualisasi Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Delta</i>	50
Gambar 4.13	Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Delta</i> pada Kondisi Normal	51

Gambar 4.14 Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Delta</i> pada Kondisi Normal.....	51
Gambar 4.15 Hasil Simulasi Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Delta</i> saat <i>Switching Circuit Breaker</i>	53
Gambar 4.16 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Delta</i> saat <i>Switching Circuit Breaker</i>	52
Gambar 4.17 Grafik Penghitungan Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Delta</i> Menggunakan MATLAB.....	56
Gambar 4.18 Visualisasi Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Delta</i>	57
Gambar 4.19 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Wye</i> pada Kondisi Normal.....	58
Gambar 4.20 Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Wye</i> pada Kondisi Normal.....	58
Gambar 4.21 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Wye</i> saat <i>Switching Circuit Breaker</i>	59
Gambar 4.22 Hasil Simulasi Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Wye</i> saat <i>Switching Circuit Breaker</i>	60
Gambar 4.23 Grafik Penghitungan Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Wye</i> Menggunakan MATLAB.....	64
Gambar 4.24 Visualisasi Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye - Wye</i>	64

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter Rangkaian.....	27
Tabel 3.2	Parameter Trafo Daya	28
Tabel 4.1	Tegangan Puncak Transient Recovery Voltage Tegangan 20 Kv dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta - Wye</i>	39
Tabel 4.2	Hasil Penghitungan Gelombang Berjalan di Saluran dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Wye</i>	41
Tabel 4.3	Persentase <i>Transient Recovery Voltage</i> terhadap Gelombang Berjalan.....	43
Tabel 4.4	Tegangan Puncak <i>Transient Recovery Voltage</i> Tegangan 20 kV dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye - Delta</i>	45
Tabel 4.5	Hasil Penghitungan Gelombang Berjalan di Saluran dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Delta</i>	48
Tabel 4.6	Persentase <i>Transient Recovery Voltage</i> terhadap Gelombang Berjalan.....	49
Tabel 4.7	Tegangan Puncak <i>Transient Recovery Voltage</i> Tegangan 20 kV dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Delta</i>	53
Tabel 4.8	Hasil Penghitungan Gelombang Berjalan di Saluran dengan Belitan Trafo Daya <i>Delta-Delta</i>	55
Tabel 4.9	Persentase <i>Transient Recovery Voltage</i> terhadap Gelombang Berjalan.....	57
Tabel 4.10	Tegangan puncak <i>Transient recovery voltage</i> tegangan 20 kV dengan belitan trafo daya <i>Wye-Wye</i>	60
Tabel 4.11	Hasil Penghitungan Gelombang Berjalan di Saluran dengan Belitan Trafo Daya <i>Wye-Wye</i>	62
Tabel 4.12	Persentase <i>Transient Recovery Voltage</i> Terhadap Gelombang Berjalan.....	63

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik pada zaman sekarang sudah seperti kebutuhan pokok bagi kehidupan manusia di dunia. Ketersediaan tenaga listrik yang cukup dan berkualitas adalah faktor penting untuk menunjang produktifitas. Untuk merealisasikan pelayanan kebutuhan tenaga listrik yang baik ke masyarakat, dibutuhkan instalasi yang baik dan sesuai standar keamanan. Sehingga keandalan dan keamanan sistem instalasi dapat terjamin dan masyarakat juga terpuaskan.

Sistem penyaluran tenaga listrik ada tiga bagian yang saling terkoneksi yaitu sistem pembangkitan, transmisi dan distribusi. Sistem pembangkitan adalah suatu *plant* yang berfungsi sebagai tempat untuk membangkitkan tenaga listrik. Sistem Transmisi adalah instalasi listrik yang berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari sistem pembangkitan ke sistem distribusi. Sedangkan sistem distribusi adalah sistem untuk menyalurkan tenaga listrik ke masyarakat. Idealnya, ketiga sistem tersebut harus beroperasi secara kooperatif dan kontinyu demi terjaminnya pelayanan tenaga listrik yang baik oleh masyarakat.

Dalam sistem penyaluran tenaga listrik dari gardu induk, tak jarang terjadi adanya gangguan dalam proses penyaluran tenaga listrik [1]. Gangguan yang ada bisa ditimbulkan dari dalam maupun luar sistem. Sehingga dibutuhkan sistem proteksi untuk menjamin lancar dan amannya penyaluran tenaga listrik. Salah satu alat proteksi yang digunakan pada sistem penyaluran tenaga listrik adalah *circuit breaker*. *Circuit breaker* adalah saklar listrik yang dioperasikan secara otomatis dirancang untuk melindungi sirkuit listrik dari kerusakan yang disebabkan oleh *overload* listrik atau sirkuit pendek. Sebuah fungsi pemutus arus adalah untuk mendeteksi kondisi gangguan pada sistem untuk segera menghentikan aliran listrik. *Circuit breaker* diklasifikasikan menjadi empat menurut tegangan kerjanya, yaitu *Circuit breaker* tegangan rendah, tegangan menengah, tegangan tinggi dan tegangan ekstra tinggi.

Pada saat adanya gangguan pada sistem penyaluran tenaga listrik, akan timbul suatu fenomena yaitu gelombang berjalan dan *transient recovery voltage*. Gelombang berjalan dalam sistem tenaga listrik adalah suatu gelombang tegangan yang terpantul dalam sistem karena akibat dari

penambahan tegangan pada sistem sehingga terjadi *reflected voltage* dan *transmitted voltage* setiap bertemu dengan *junction* (batas antar line yang berbeda nilai impedansinya). Sebagian besar fenomena tersebut terjadi jika sistem terdampak sambaran petir. Gelombang berjalan pada akhirnya akan bernilai nol jika sudah teredam akibat pemantulan tegangan dalam waktu tertentu. Tegangan puncak dari gelombang berjalan sangat berpengaruh terhadap karakteristik dan nilai TRV yang ditimbulkan.

Transient recovery voltage adalah tegangan transien yang terjadi di seluruh terminal kutub perangkat *switching* yaitu *circuit breaker* dari gangguan arus lebih. Dengan demikian *transient recovery voltage* adalah tegangan transien yang timbul sesaat setelah terjadinya gangguan dari sistem pada terminal *circuit breaker* karena terdampak interupsi. Fenomena ini adalah suatu parameter bagi *switching circuit breaker* berhasil atau tidaknya menahan efek gangguan untuk mempertahankan penyaluran listrik. Jadi tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kondisi sistem setelah terjadi gangguan karena *transient recovery voltage*, dan memodelkan sistem dan mensimulasikan *transient recovery voltage* yang ditimbulkan.

Studi ini akan menjelaskan tentang fenomena gelombang berjalan dan *transient recovery voltage*. Menurunkan rumus gelombang berjalan sebagai parameter terjadinya *transient recovery voltage* pada proses *switching circuit breaker*. Pada studi ini, masalah dibatasi oleh kondisi sistem yaitu *open ended* dan *close ended* dengan menggunakan nilai tegangan dan tiga nilai tipikal kapasitansi, nilai induktansi nonlinear, serta nilai resistansi sistem. Melakukan pemodelan dengan nilai tegangan yang berbeda-beda dan melakukan proses hubung singkat tiga fasa pada pemodelan sistem. Metode analisis yang dilakukan adalah membandingkan hasil plot tegangan *transient recovery voltage* pada kondisi berbeda nilai tegangan dan karakteristik *transient recovery voltage* pada sistem *open ended* dan *close ended*.

Tujuan yang ingin dicapai pada studi ini adalah mengetahui dampak dari gelombang berjalan terhadap terjadinya fenomena *transient recovery voltage* pada *switching circuit breaker*. Sehingga dapat mengetahui respon dari sistem terhadap analisis nilai gelombang berjalan yang terjadi. Metode yang digunakan dalam studi ini, yang pertama adalah melakukan studi literatur serta pengumpulan data mengenai gelombang berjalan dan *transient recovery voltage* dan metode umum yang biasa digunakan untuk menganalisis. Kemudian adalah menentukan parameter dari komponen yang akan digunakan dalam rangkaian

pemodelan, seperti nilai kapasitansi, nilai induktansi nonlinear, serta nilai resistansi dari suatu sistem. Langkah berikutnya adalah melakukan pemodelan rangkaian simulasi menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Setelah rangkaian pemodelan disimulasikan, akan dilakukan analisis terhadap hasil keluaran dari simulasi tersebut berupa grafik fungsi tegangan terhadap waktu dan dibandingkan dengan nilai gelombang berjalan yang terjadi sebagai rujukan untuk menarik kesimpulan studi ini.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian tugas akhir ini menjawab perumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mendapatkan nilai *transient recovery voltage* dengan pemodelan rangkaian *switching circuit breaker* tegangan menengah menggunakan perangkat lunak ATPDraw
2. Bagaimana mendapatkan nilai gelombang berjalan yang terjadi pada jaringan transmisi akibat *switching circuit breaker* menengah menggunakan metode *bewley lattice diagram*
3. Bagaimana presentase perbandingan nilai *transient recovery voltage* terhadap nilai gelombang berjalan yang terjadi pada jaringan transmisi

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk:

1. Mendapatkan nilai dari *transient recovery voltage* dari pemodelan rangkaian *switching circuit breaker* tegangan menengah menggunakan perangkat lunak ATPDraw
2. Mendapatkan nilai gelombang berjalan yang terjadi pada jaringan transmisi akibat *switching circuit breaker* menengah menggunakan metode *bewley lattice diagram*
3. Mendapatkan presentase perbandingan nilai *transient recovery voltage* terhadap nilai gelombang berjalan yang terjadi pada jaringan transmisi

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini adalah:

1. *Circuit breaker* yang digunakan adalah *circuit breaker* tegangan menengah 20 kV output dari trafo daya 150-20 kV

2. Parameter saluran yang digunakan adalah seperti yang dijelaskan pada bab 3 dengan ujung saluran berbeban.
3. Gelombang berjalan ditentukan dari penurunan rumus pemantulan gelombang *bewley lattice diagram*
4. Variasi tegangan ditentukan oleh jenis hubungan belitan trafo daya 150-20 kV

1.5 Metodologi Penelitian

Langkah-langkah yang dikerjakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur ini bertujuan untuk penguasaan materi tentang tugas akhir ini. Pada tahap ini penulis mempelajari tentang *transient recovery voltage*, gelombang berjalan, dan metode pemantulan gelombang *bewley lattice diagram*.

2. Membuat pemodelan *switching circuit breaker* tegangan menengah

Pemodelan *switching circuit breaker* tegangan menengah menggunakan perangkat lunak ATPDraw dengan variasi hubungan belitan pada trafo daya

3. Menentukan nilai gelombang berjalan pada jaringan transmisi tegangan menengah

Menentukan nilai gelombang berjalan dengan metode pemantulan gelombang *bewley lattice diagram* dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB

4. Membandingkan nilai *transient recovery voltage* dengan gelombang berjalan yang terjadi di jaringan transmisi

Karakteristik V_{peak} *transient recovery voltage* pada tiap fasa yang dihasilkan oleh simulasi akan dibandingkan dengan hasil perhitungan V_{peak} gelombang berjalan tiap fasa pada jaringan transmisi

1.6 Sistematika Penulisan

Bab 1 berisi pendahuluan yang mengandung latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, serta manfaat dan relevansi yang dicapai dalam pelaksanaan studi ini.

Bab 2 berisi tentang teori pendukung mengenai *circuit breaker*, proses pemutusan *circuit breaker* pada pemutusan suatu sistem, surja hubung, *transient recovery voltage*, gelombang berjalan dan pantulannya.

Bab 3 berisi penurunan rumus gelombang berjalan dan pemodelan simulasi rangkaian *transient recovery voltage* saat diberlakukan gangguan sesaat berupa *short circuit* tiga fasa, simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ATPDraw.

Bab 4 berisi hasil dari simulasi pemodelan rangkaian *transient recovery voltage* yang telah dilakukan, kemudian dilakukan analisis terhadap kemunculan *transient recovery voltage* pada tiap-tiap rangkaian pemodelan tersebut dengan parameter hasil gelombang berjalan yang terjadi.

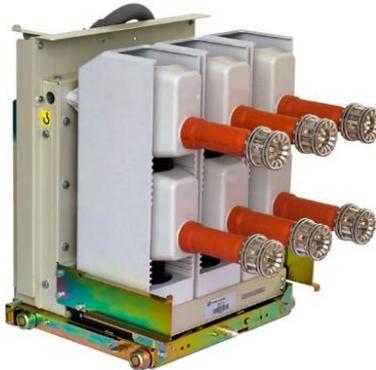
Bab 5 berisi kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan hasil analisis dan saran yang bersangkutan dengan studi ini baik yang telah dilakukan maupun untuk penelitian atau studi kedepannya.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB II

TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE DAN GELOMBANG BERJALAN

2.1 *Circuit Breaker*



Gambar 2.1 *Circuit Breaker* Tegangan Menengah

Circuit Breaker (CB) merupakan peralatan saklar atau *switching* mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal atau gangguan seperti kondisi *short circuit* atau hubung singkat [2].

Circuit breaker (CB) merupakan suatu alat listrik yang berfungsi untuk melindungi sistem tenaga listrik apabila terjadi kesalahan atau gangguan pada sistem tersebut, terjadinya kesalahan pada sistem akan menimbulkan berbagai efek seperti efek termis, efek magnetis dan dinamis stability. Fungsi utamanya adalah sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan (hubung singkat) pada jaringan atau peralatann lain.

Tegangan kerja dari *switchgear* tergantung dari kapasitas Unit Pembangkit dan tegangan kerja peralatan bantuannya, pada umumnya tegangan kerja yang digunakan antara 3.3 kV sampai 11 kV.

Dari uraian tersebut diatas maka switchgear berfungsi sebagai berikut :

Saat kondisi normal

1. Menghubungkan rangkaian listrik
2. Membaca parameter listrik
3. Mengatur penyaluran listrik
4. Mendeteksi parameter listrik

Saat kondisi gangguan

1. Memutus rangkaian listrik
2. Membaca parameter listrik
3. Mengamankan komponen rangkaian listrik

Circuit Breaker (CB) merupakan suatu alat listrik yang berfungsi untuk melindungi sistem tenaga listrik apabila terjadi kesalahan atau gangguan pada sistem tersebut, terjadinya kesalahan pada sistem akan menimbulkan berbagai efek seperti efek termis, efek magnetis dan dinamis stabilitas.

Fungsi utamanya adalah sebagai alat pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan (hubung singkat) pada jaringan atau peralatann lain.

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu *circuit breaker* (CB) agar dapat melakukan hal-hal diatas, adalah sebagai berikut :

1. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara terus menerus.
2. Mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri
3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, sehingga tidak membuat sistem kehilangan kestabilan, dan merusak pemutus tenaga itu sendiri.

Setiap *circuit breaker* dirancang sesuai dengan tugas yang akan dipikulnya, ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam rancangan suatu *circuit breaker*, yaitu :

1. Tegangan efektif tertinggi dan frekuensi daya jaringan dimana pemutus daya itu akan dipasang. Nilainya tergantung pada jenis pentanahan titik netral sistem.

2. Arus maksimum *continue* yang akan dialirkan melalui pemutus daya. Nilai arus ini tergantung pada arus maksimum sumber daya atau arus nominal beban dimana pemutus daya tersebut terpasang.
3. Arus hubung singkat maksimum yang akan diputuskan pemutus daya tersebut.
4. Lamanya maksimum arus hubung singkat yang boleh berlangsung. hal ini berhubungan dengan waktu pembukaan kontak yang dibutuhkan.
5. Jarak bebas antara bagian yang bertegangan tinggi dengan objek lain disekitarnya.
6. Jarak rambat arus bocor pada isolatornya.
7. Kekuatan dielektrik media isolator sela kontak.
8. Iklim dan ketinggian lokasi penempatan pemutus daya [4].

2.1.1 Fungsi Bagian Utama *Circuit Breaker*

Ruangan pemutus tenaga ini berfungsi sebagai ruangan pemadam busur api, yang terdiri dari :

1. Unit pemutus utama yang berfungsi sebagai pemutus utama
Unit pemutus utama ini berupa ruangan yang diselubungi bagian luar oleh isolator dari porselen dan disebelah dalamnya terdapat ruangan udara, kontak-kontak bergerak yang dilengkapi oleh pegas penekan dan kontak tetap sebagai penghubung yang terletak melekat pada isolator porselen.
2. Unit pemutus pembantu yang berfungsi sebagai pemutus arus yang melalui tahanan
Unit pemutus pembantu ini berupa ruangan yang diselubungi bagian luar oleh isolator dari porselen dan disebelah dalamnya terdapat ruangan udara, kontak-kontak bergerak yang dilengkapi oleh pegas penekan dan kontak tetap sebagai penghubung yang terletak melekat pada porselen.
3. Katup kelambatan
Berfungsi sebagai pengatur udara bertekanan dari pemutus utama ke unit pemutus pembantu, sehingga kontak pada unit pemutus pembantu akan terbuka kurang dari 25 μ s (micro detik) setelah kontak-kontak pada pemutus utama terbuka. Katup kelambatan ini berupa bejana berbentuk silinder yang

berongga sebagai ruang udara dan juga terdapat ruang pengatur, katup penahan, katup pengatur, rumah perapat, dan tempat katup.

4. Tahanan

Tahanan ini dipasang paralel dengan unit pemutus utama, yang berfungsi untuk :

- a. mengurangi kenaikan harga dari tegangan pukul
- b. mengurangi arus pukulan pada waktu pemutusan

5. Kapasitor

Kapasitor ini dipasang paralel dengan tahanan, unit pemutus utama dan unit pemutus pembantu, yang berfungsi untuk mendapatkan pembagian tegangan yang sama pada setiap celah kontak, sehingga kapasitas pemutusan pada setiap celah sama besarnya.

6. Kontak-kontak

a. Unit pemutus utama kontak bergerak dilapisi dengan perak terdiri dari:

1. Kepala kontak bergerak
2. Silinder kontak
3. Jari-jari kontak
4. Batang kontak
5. Pegangan kontak tetap, terdiri dari :
 - a. Kepala kontak
 - b. Pegangan kontak

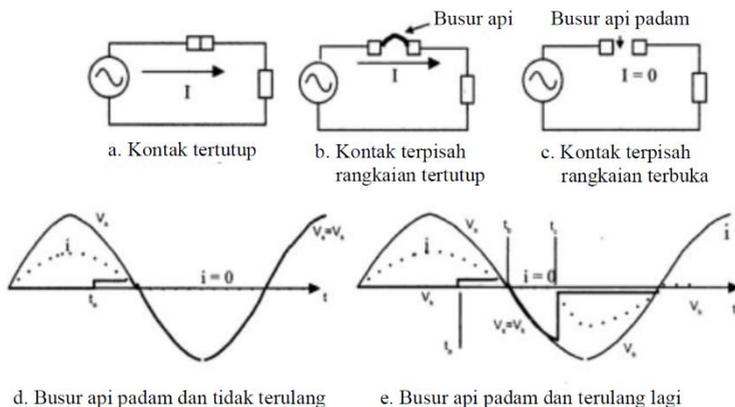
b. Unit pemutus pembantu

1. Kontak bergerak
2. Kontak tetap, yang terdiri dari:
 - a. Jari-jari kontak
 - b. Pegangan kontak

2.1.2 Proses Pemutusan *Circuit Breaker* pada Suatu Sistem

Proses pemutusan suatu sistem dapat divisualisasikan dengan Gambar 2.2. Gambar 2.2.a menunjukkan rangkaian saat arus bolak balik. Jika kontak tertutup sempurna, maka tahanan antar kontak sangat kecil sehingga tegangan antar kontak dapat diabaikan. Misalkan kontak daya dibuka pada $t = t_a$ (Lihat Gambar 2.2.d), keadaan rangkaian menjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.b. Sesaat setelah pembukaan

kontak akan timbul busur api diantara kontak, sehingga arus tetap mengalir pada rangkaian. Arus ini akan menimbulkan *drop tegangan* pada kontak sebesar perkalian arus dengan tahanan busur api. Tegangan jatuh ini sangat kecil dibandingkan dengan puncak tegangan sumber dan berlangsung dalam selang waktu $t_a - t_b$. Selanjutnya pada $t = t_b$ (Gambar 2.2.d) arus akan menjadi nol dan pada saat yang sama tegangan antar kontak akan menuju besar tegangan sumber, dan berangsur menuju harga maksimal. Adanya beda tegangan diantara kontak dapat mengulangi terjadinya busur api. Misalnya pada $t = t_c$ (Gambar 2.2.e) timbul lagi busur api, maka arus kembali mengalir pada rangkaian meskipun sebenarnya kontak pemutus daya sudah terpisah. Tegangan antar kontak yang menimbulkan perulangan busur api adalah tegangan sumber saat $t = t_c$ dan biasa disebut tegangan terpaan balik (*restrike voltage*). Hubungan rangkaian dinyatakan terputus setelah hilangnya busur api dan tidak terulang lagi. Dalam hal ini tegangan dan arus sesaat ditunjukkan pada Gambar 2.2.d dan rangkaiannya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.c. [5].



Gambar 2.2 Proses *Switching Circuit Breaker* [5]

2.1.3 Surja Hubung

Surja hubung dapat diartikan sebagai gejala tegangan lebih transien yang disebabkan oleh proses surja hubung pada sepanjang saluran transmisi yang mempunyai amplitudo lebih besar dari nilai puncak tegangan nominalnya atau dapat dijelaskan yaitu gejala transien yang disebabkan oleh pemasukan energi (*energization*), pemutusan

energi (*de-energization*) dan pemutusan disertai pemasukan kembali energi (*re-energization*) dari suatu rangkaian listrik. Salah satu sumber tegangan lebih surja hubung adalah peristiwa pembukaan dan penutupan pemutus tenaga. Proses pensaklaran dilakukan oleh saklar atau *circuit breaker* berupa operasi penutupan (*closing*), pembukaan (*opening*), dan penutupan kembali (*reclosing*). Operasi-operasi tersebut dikenal dengan istilah operasi *switching* [8]. Kenaikan tegangan yang terjadi karena surja hubung harus diperhatikan jangan sampai menyebabkan kerusakan koordinasi isolasi peralatan pada system.

Beberapa kemungkinan penyebab terjadinya surja *switching* pada sistem tenaga [9]:

1. Pengisian saluran transmisi dan kabel.
2. Pengisian saluran yang sisi jauhnya terbuka
3. Pengisian saluran yang memiliki terminal trafo pada keadaan tak berbeban
4. Pengisian saluran melalui sisi tegangan rendah trafo
5. Pengisian kembali saluran.
Pengisian saluran transmisi ketika digunakan *recloser* kecepatan tinggi.
6. *Load rejection*.
Ini dipengaruhi oleh pembukaan *circuit breaker* pada ujung saluran yang jauh. Ini dapat juga diikuti pembukaan saluran pada ujung sisi kirim.
7. Proses *switching* “*on-off*” dari peralatan.
Semua operasi *switching* pada elemen jaringan transmisi akan menghasilkan surja.
8. *switching reactor* tegangan tinggi

Bentuk gelombang surja hubung dapat didefinisikan sebagai tegangan impuls yaitu, tegangan yang naik dalam waktu singkat sekali disusul dengan penurunan yang lambat menuju nol, yang dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut :

$$V = V_0 e^{-at} - e^{-bt} \quad (2.1)$$

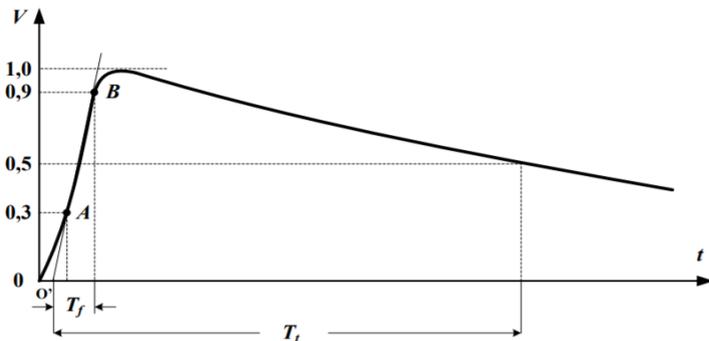
dengan :

- V = tegangan osilasi
 V_0 = tegangan sistem

a dan b = konstanta yang diperoleh dari rangkaian

Muka gelombang didefinisikan sebagai bagian dari gelombang yang dimulai dari titik nol nominal sampai ke titik puncak, sedangkan sisanya disebut ekor gelombang. Setengah puncak gelombang adalah titik-titik pada muka dan ekor dimana tegangannya adalah setengah puncak (titik 0.5). Waktu sampai puncak setengah puncak dari ekor gelombang didefinisikan sebagai waktu dari titik nol nominal sampai setengah puncak pada ekor. Kecuraman muka gelombang adalah kecepatan naiknya tegangan pada muka gelombang.

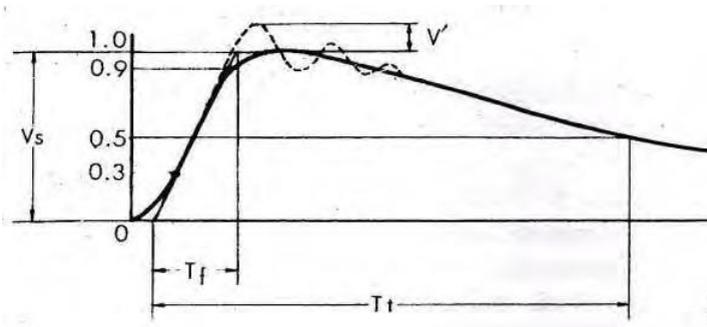
Kecuraman muka rata-rata untuk mudahnya dinyatakan sebagai perbandingan antara tegangan puncak dan lamanya muka gelombang. Gelombang penuh adalah gelombang yang tidak terputus karena lompatan api atau tembusan, mempunyai waktu mukagelombang T_{cr} (μs). Gelombang ini dinyatakan dengan huruf: $\pm (T_{cr} \times T_2)$ μs dengan polaritasnya. Besaran waktu standar untuk tegangan impuls surja hubung menurut IEC adalah 250/2500 μs . Dengan $T_{cr} = T_1 = 250 \mu s \pm 20\%$ dan $T_2 = 2500 \mu s \pm 60\%$. Bentuk standarisasi gelombang tegangan impuls surja hubung dapat ditunjukkan pada Gambar 2.3 [10].



Gambar 2.3 Standar Tegangan Impuls *Switching* [9]

Waktu ke puncak T_{cr} diperoleh dari rentang waktu antara awal impuls dan tercapainya nilai puncak. Osilasi frekuensi tinggi saat pembangkitan tegangan impuls masih ada akan tetapi hal ini tidak berpengaruh karena konstanta waktu tegangan impuls surja hubung jauh

lebih besar dari osilasi ini. Waktu punggong T_2 , adalah waktu antara mulainya tegangan impuls sampai dengan 50% nilai tegangan pada punggong impuls. Toleransi nilai puncak tegangan impuls surja hubung harus tetap 3%. Permasalahan penentuan nilai puncak seperti pada tegangan impuls surja hubung tidak ditemui karena proses osilasi telah hilang saat mencapai nilai puncak. Besaran lain yang biasa melengkapi besaran tegangan impuls kontak adalah waktu puncak (T_d) yang didefinisikan sebagai rentang waktu dimana nilai tegangan lebih besar dari 90%. Besarnya (amplitudo) osilasi frekuensi tinggi (v') pada muka gelombang menurut standar IEC harus kurang dari 5% dari harga puncak disekitar puncak yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.

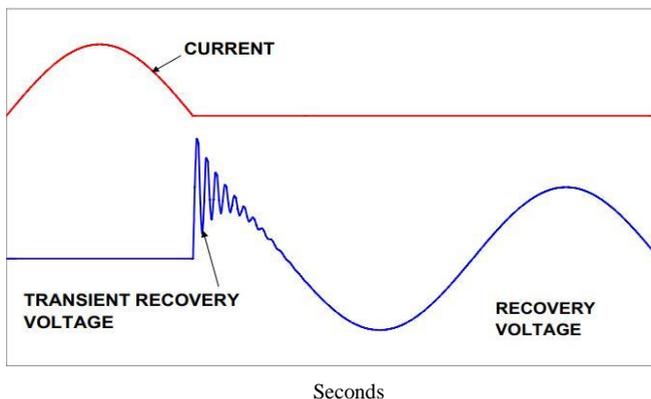


Gambar 2.4 Bentuk Tegangan Impuls *Switching* [9]

2. 2 *Transient Recovery Voltage*

Recovery voltage adalah tegangan yang muncul di seluruh terminal kutub pada circuit breaker. Tegangan ini dapat dianggap menjadi dua interval waktu yang berurutan, yang pertama yaitu saat di mana terdapat tegangan transien, dan di ikuti yang kedua dimana hanya terdapat tegangan frekuensi daya saja. Selama proses gangguan, busur dengan cepat kehilangan konduktivitasnya saat arus sesaat mendekati nilai nol. Dalam beberapa saat setelah nol saat, arus berhenti mengalir pada sirkuit. Respons sistem daya terhadap gangguan itulah yang menyebabkan munculnya *Transient recovery voltage*. Perbedaan antara respon tegangan sistem daya dari sisi sumber ke sisi beban circuit breaker adalah yang disebut *Transient recovery voltage (TRV)* sesuai dengan yang ditunjukkan. Tahap pemutusan berhasil jika circuit breaker mampu menahan TRV dan tegangan pemulihan frekuensi daya. Kemudian TRV terhubung

dengan respons sistem daya terhadap arus gangguan pada rangkaian yang paling dekat dengan frekuensi daya nol [6]



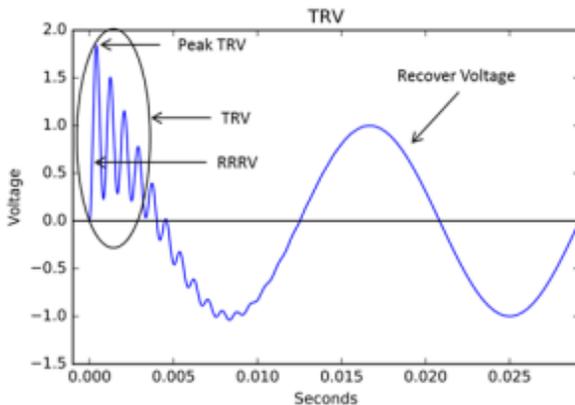
Gambar 2.5 Gelombang Arus, *Transient Recovery Voltage*, dan *Recovery Voltage* [6]

2.2.1 Gelombang *Transient Recovery Voltage*

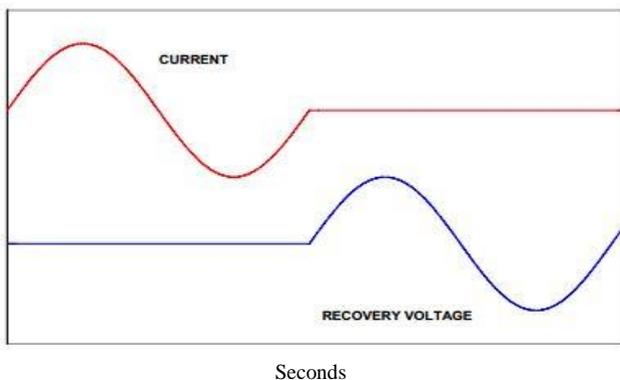
Kemudian pada saat terjadinya *transient recovery voltage* akan muncul sebuah gelombang transien yang terdapat beberapa bagian di dalamnya yaitu, *Rate of Rise Recovery Voltage* (RRRV) seperti yang terlihat pada 9. *Rate of Rise Recovery Voltage* (RRRV) didefinisikan sebagai puncak dari *Transient Recovery Voltage* dibagi dengan total waktu dari tegangan nol menuju tegangan puncak.

Sifat dari gelombang TRV tergantung pada rangkaian yang mengalami gangguan, terutama rangkain resistif, rangkaian kapasitif atau rangkaian induktif, atau beberapa dari kombinasi dari rangkaian tersebut. Ketika gangguan terjadi di terminal circuit breaker pada rangkaian induktif, tegangan suplai saat arus nol bernilai maksimum. Arus gangguan circuit breaker nol, pada saat daya input minimum, dan saat tegangan pada sisi terminal sumber mencapai tegangan sumber dalam proses yang disebut *transient recovery voltage*. Hal ini diilustrasikan pada Gambar 2.6. Pada gangguan rangkaian resistif murni, tegangan sumber bernilai nol saat gangguan terjadi, maka dari itu recovery voltage-nya tidak memiliki transien (lihat pada Gambar 2.7). Kebanyakan rangkaian *switching* arus beban aktif dapat disimulasikan dengan kombinasi

komponen resistif dan induktif. *Recovery voltage* adalah gabungan dari yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 untuk rangkaian resistif dan induktif.



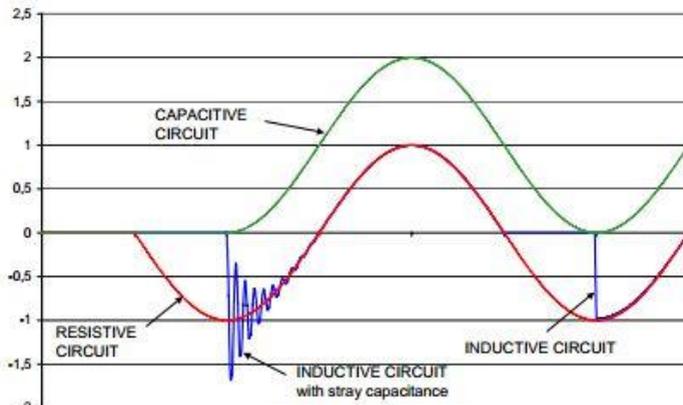
Gambar 2.6 Gelombang *Transient Recovery Voltage* [6]



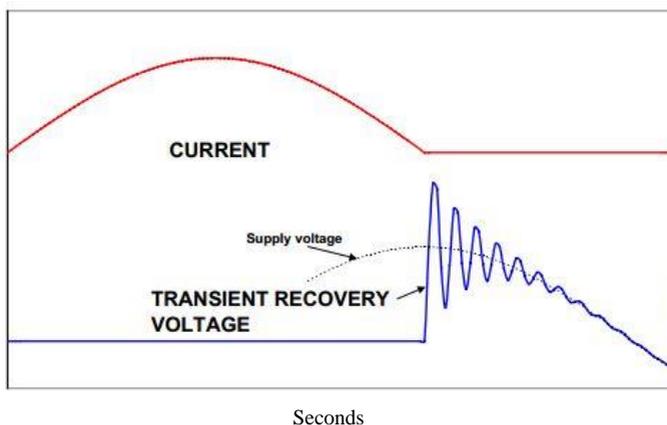
Gambar 2.7 Arus dan Gelombang *Transient Recovery Voltage* Ketika Gangguan pada Arus Resistif [6]

Awalnya memiliki transien frekuensi tinggi, karena penurunan tegangan dalam reaktansi trafo daya, diikuti oleh tegangan frekuensi daya, amplitudo yang merupakan fungsi dari faktor daya beban. Dengan cara

yang sama, gangguan dalam rangkaian seri LC pada awalnya menghasilkan TRV frekuensi tinggi dengan amplitudo kecil (tegangan sebelum gangguan cenderung memiliki nilai yang sama dengan tegangan suplai) yang disebut lompatan tegangan, diikuti oleh gelombang ditunjukkan pada Gambar 2.9 untuk rangkaian induktif[6]

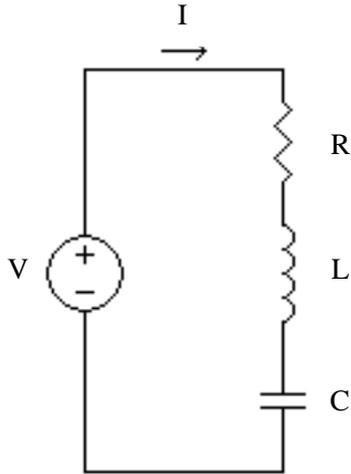


Gambar 2.8 Arus dan Gelombang *Transient Recovery Voltage* Ketika Gangguan pada Arus Induktif [6]



Gambar 2.9 *Transient Recovery Voltage* dan *Recovery Voltage* pada Rangkaian Resistif, Induktif, dan Kapasitif [6]

2.2.2 Transien pada rangkaian R-L-C



Gambar 2.10 Rangkaian R-L-C

Gejala tegangan lebih transien akibat surja hubung pada saluran transmisi dapat diselesaikan dengan membuat rangkaian ekuivalen satu fasa, sehingga tiga fasa saluran transmisi diasumsikan sebagai satu fasa tunggal. Metode rangkaian fasa tunggal ini dapat digunakan untuk menentukan tegangan lebih transien pada saluran transmisi, jika dilakukan pendekatan, pemutus tenaga pada masing-masing fasa menutup secara serentak. Tegangan lebih transien yang terjadi pada saluran transmisi bertambah nilainya, karena adanya sifat yang saling berhubungan satu sama lain pada saluran 3 fasa. Pemutus tenaga yang terdapat pada jaringan 3 fasa, pada hakikatnya menutup secara tidak serentak (*non simultaneous*), sehingga nilai tegangan maksimum yang terdapat di sepanjang saluran bervariasi menurut waktu menutupnya pada masing-masing fasa.

Rangkaian RLC seperti terlihat pada Gambar, baik energi elektromagnetik maupun elektrostatik terlibat di dalamnya, sehingga perubahan kondisi yang mendadak pada rangkaian melibatkan redistribusi kedua bentuk energi tersebut. Arus transien yang dihasilkan karena redistribusi ini dikenal dengan sebutan transien energi ganda (*double energi transient*). Arus yang dihasilkan sebagai arus non

direksional atau arus osilasi yang menurun. Dalam rangkaian RLC tegangan transien terjadi pada ketiga parameter rangkaian, sehingga persamaan tegangan transiennya adalah : $i.R + L \frac{di}{dt} + q/C = 0$, diperoleh persamaan diferensial sebagai berikut :

$$d^2 i/dt^2 + R/L \cdot di/dt + i/LC = 0 \quad (2.2)$$

Penyelesaian dari persamaan di atas adalah $it = k1 \cdot e^{\lambda1t} + k2 \cdot e^{\lambda2t}$, di mana $k1$ dan $k2$ adalah konstanta rangkaian. Sedangkan nilai $\lambda1$ dan $\lambda2$ ditentukan oleh persamaan :

$$\lambda1 = -R/2L + (R^2 /4L^2) - (1/LC) \quad (2.3)$$

$$\lambda2 = -R/2L - (R^2 /4L^2) - (1/LC) \quad (2.4)$$

Sesuai dengan nilai $\lambda1$ dan $\lambda2$ ada empat kondisi rangkaian RLC yang berbeda yaitu pada saat $R = 0$, $1/LC < R^2 /4L^2$, $1/LC > R^2 /4L^2$, dan pada saat $1/LC = R^2 /4L^2$.

2.3 Gelombang Berjalan

Jika suatu hantaran tenaga listrik (hantaran udara, kabel) yang digambarkan dengan dua kawat tiba-tiba dihubungkan dengan suatu sumber tegangan, maka seluruh seluruh hantaran tersebut tidak akan langsung bertegangan sehingga masih diperlukan beberapa waktu untuk dapat merasakan tegangan ini pada suatu titik dalam sistem yang mempunyai jarak tertentu dari sumber tegangan tersebut. Hal ini disebabkan adanya induktansi dan kapasitansi pada sistem tanpa rugi-rugi (*loss less line*). Proses ini sama dengan peluncuran sebuah gelombang tegangan yang merambat sepanjang hantaran dengan kecepatan tertentu. Gelombang tegangan ini merambat bersamaan gelombang arus. Kedua gelombang ini akan mencapai ujung yang lain dari hantaran dalam waktu tertentu. Dalam perambatannya kedua gelombang ini umumnya akan menemukan diskontinuitas dalam hantaran sehingga terjadi pemantulan gelombang. Umumnya pada setiap saat, tegangan dan arus pada setiap titik merupakan superposisi dari gelombang datang dan gelombang pantul. Gelombang berjalan ini timbul dalam sistem transmisi sebagai akibat adanya tegangan lebih pada sistem yang disebabkan oleh proses

sambaran petir atau proses *switching* (pembukaan dan penutupan saklar daya) [5].

Studi tentang surja hubung pada saluran transmisi adalah sangat kompleks, sehingga pada Tugas Akhir ini hanya mempelajari kasus suatu saluran yang tanpa rugi-rugi. Suatu saluran tanpa rugi-rugi adalah repersentase yang baik dari saluran-saluran frekuensi tinggi di mana ωL dan ωC menjadi sangat besar dibandingkan dengan R dan G. Untuk surja hubung pada saluran transmisi daya, studi saluran tanpa rugi-rugi merupakan penyerdehanaan yang memungkinkan untuk memahami beberapa gejala surja hubung tanpa terlalu melibatkan pada teori-teori yang terlalu rumit. Pendekatan yang dipilih untuk persoalan ini sama seperti yang telah digunakan untuk menurunkan hubungan-hubungan tegangan dan arus dalam keadaan *steady state* untuk yang saluran panjang dengan konstanta-konstanta yang tersebar merata. Sekarang variabel i dapat dihilangkan dengan menghitung turunan sebagian kedua suku dalam persamaan terhadap x dan turunan sebagian kedua suku dalam persamaan terhadap t . Prosedur ini menghasilkan $\partial^2 i / \partial x \partial t$ pada kedua persamaan yang dihasilkan, dan dengan mengeliminasi turunan. Sebagian kedua dari variabel i dari kedua persamaan tersebut, didapatkan :

$$V = f1(x-vt) + f2(x+vt) \tag{2.5}$$

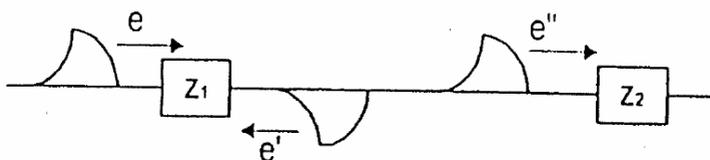
Persamaan (2.6) Suatu penyelesaian untuk terjadinya komponen-komponen ke depan dan ke belakang sebuah gelombang berjalan secara bersamaan pada sebuah saluran tanpa rugi-rugi. Variabel v yang menyatakan kecepatan gelombang berjalan dapat dinyatakan dengan :

$$V = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{2.6}$$

Dengan keterangan :

- V = kecepatan rambat gelombang (m/s)
- L = induktansi saluran (H/m)
- C = kapasitansi saluran (F/m)

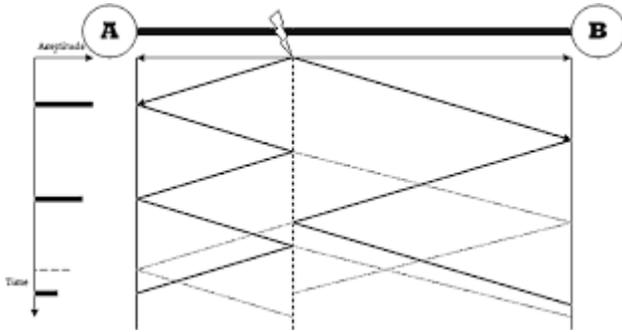
Perbandingan antara V dan i dinamakan impedansi karakteristik atau impedansi surja (ZC) dari saluran tanpa rugi-rugi. Jika suatu tegangan $v(t)$ diterapkan pada salah satu ujung saluran transmisi tanpa rugi-rugi, unit kapasitansi C pertama dimuati pada tegangan $v(t)$. Kapasitansi ini kemudian meluahkan ke dalam unit kapasitansi berikutnya melalui induktansi L . Proses bermuatan peluahan (*charge-discharge*) ini berlanjut hingga ujung saluran dan energi gelombang dialihkan dari bentuk elektronik (dalam kapasitansi) ke bentuk magnetik (dalam induktansi). Jadi, gelombang tegangan bergerak maju secara gradual ke ujung saluran dengan menimbulkan gelombang arus ekuivalen juga. Propagasi gelombang tegangan dan arus ini disebut gelombang berjalan (*traveling wave*) dan gelombang ini kelihatan seolah-olah tegangan dan arus berjalan sepanjang saluran dengan kecepatan yang diberikan oleh persamaan (2.6).



Gambar 2.11 Gelombang Pantul dan Maju dari Suatu Gelombang Datang [6]

Saat gelombang yang berjalan pada suatu saluran transmisi mencapai titik transisi, seperti suatu rangkaian terbuka, rangkaian hubungan singkat, suatu sambungan dengan saluran lain atau kabel, belitan mesin, dan lain-lain, maka pada titik itu terjadi perubahan parameter saluran. Akibatnya sebagian dari gelombang berjalan bergerak melewati bagian lain dari rangkaian. Pada titik transisi, tegangan atau arus dapat berharga nol sampai dua kali harga semula tergantung pada karakteristik terminalnya. Gelombang berjalan asal (*impinging wave*) disebut gelombang datang (*incident wave*) dan dua macam gelombang lain yang muncul pada titik transmisi disebut dengan gelombang pantul (*reflected wave*) dan gelombang maju (*transmitted wave*). Gelombang-gelombang tersebut diilustrasikan pada Gambar 2.11 di atas.

2.3.1 Gelombang Pantul



Gambar 2.12 Gelombang Pantul dan Maju Metode *Bewley Lattice Diagram* [13]

Jika suatu tegangan pertama-tama dihubungkan pada ujung pengirim suatu saluran transmisi yang ditutup dengan suatu impedansi Z_R . Jika saklar ditutup dan suatu tegangan terhubung pada suatu saluran, suatu gelombang tegangan V^+ mulai berjalan sepanjang saluran diikuti oleh suatu gelombang arus i . Perbandingan antara V_R dan I_R di ujung saluran pada setiap saat harus sama dengan resistansi penutup Z_R . Oleh karena itu kedatangan V^+ dan i^+ di ujung penerima di mana nilai-nilainya adalah V_R^+ dan i_R^+ harus menimbulkan gelombang-gelombang yang berjalan ke belakang atau gelombang-gelombang pantulan V^- dan i^- yang nilai-nilainya di ujung adalah V_R^- dan i_R^- sedemikian sehingga,

$$\frac{V_R^+}{i_R^+} = \frac{V_R^+ + V_R^-}{i_R^+ + V_R^-} \quad (2.7)$$

di mana V_R dan i_R adalah gelombang-gelombang V dan i yang diukur pada ujung penerima. Jika dibuat $Z_c = \sqrt{L/C}$, didapat persamaan 2.9 dan 2.10.

$$i_R^+ = \frac{V_R^+}{Z_c} \quad (2.8)$$

$$i_R^- = \frac{V_R^-}{Z_c} \quad (2.9)$$

Kemudian dengan memasukkan nilai iR^+ dan iR^- ke dalam persamaan (2.9) dihasilkan persamaan :

$$V_R^- = \frac{Z_R^- + Z_c}{Z_R^+ + Z_c} \quad (2.10)$$

Koefisien pantulan ρ_R untuk tegangan pada ujung penerima saluran didefinisikan sebagai V_R^- / V_R^+ , jadi :

$$\rho_R = \frac{Z_R - Z_c}{Z_R + Z_c} \quad (2.11)$$

dimana:

- ρ_R = koefisien pantulan ujung
- Z_R = impedansi ujung penerima
- Z_c = impedansi karakteristik (impedansi surja)

Jika saluran ditutup dengan impedansi karakteristiknya Z_c , terlihat bahwa koefisien pantulan untuk sama dengan nol, sehingga tidak ada gelombang pantulan, dan saluran berlaku seakan-akan panjangnya tidak terhingga. Jika ujung saluran merupakan suatu rangkaian terbuka Z_R adalah tak terhingga dan didapatkan harga ρ_R sama dengan 1 (satu). Dengan demikian tegangan yang terjadi pada ujung penerima menjadi 2 kalinya tegangan pada sumber tegangan atau pada ujung pengirim. Dari uraian di atas bisa disimpulkan bahwa besar tegangan lebih transien sangat tergantung pada impedansi karakteristik $Z_c = \sqrt{L/C}$, dimana impedansi karakteristik tersebut sangat berpengaruh terhadap koefisien pantulan ρ_R . Semakin besar nilai C (kapasitansi saluran) maka R akan semakin besar juga tegangan lebih transien yang ditimbulkan. Tetapi tegangan lebih transien tersebut dapat diperkecil dengan cara menambahkan nilai L (induktansi) ke dalam saluran transmisi, sehingga Z_c akan menjadi lebih besar yang pada akhirnya akan memperkecil koefisien pantulan (ρ_R). Penambahan nilai R dan L (induktansi) ke dalam saluran transmisi dilakukan dengan cara memasang reaktor shunt pada ujung pengirim saluran transmisi. Harus diperhatikan di sini bahwa gelombang-gelombang yang berjalan kembali ke arah ujung pengirim akan menyebabkan pantulan-pantulan baru yang ditentukan oleh koefisien pantulan pada ujung pengirim ρ_s dan impedansi ujung pengirim Z_R [13].

$$\rho_S = \frac{Z_R - Z_c}{Z_R + Z_c} \quad (2.12)$$

dimana:

ρ_S = koefisien pantulan pada ujung pengirim

Z_R = impedansi ujung pengirim

Z_c = impedansi karakteristik (impedansi surja)

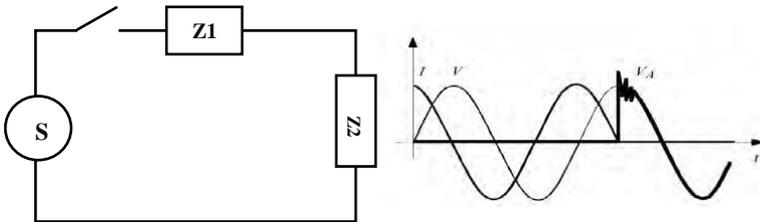
Oleh karena itu pemasangan reaktor pada ujung pengirim selain berpengaruh pada nilai impedansi surja (Z_c) juga berpengaruh pada nilai impedansi pengirim (Z_R). Sehingga hubungan antara nilai induktansi reaktor dan tegangan lebih transien yang terjadi tidak akan linear [9].

BAB III

PEMODELAN RANGKAIAN *TRANSIENT* *RECOVERY VOLTAGE* DAN PENURUNAN RUMUS GELOMBANG BERJALAN

3.1 Rangkaian *Circuit Breaker* Tegangan Menengah

Permodelan tegangan lebih *switching* akan dimodelkan dengan simulasi perangkat lunak ATPDraw. Tegangan lebih transien yang terjadi akibat proses pemberian tenaga pada sebuah saluran transmisi dalam keadaan tergantung karakteristik saluran transmisi yang dipakai. Gangguan tegangan lebih pada transmisi dan distribusi sistem tenaga listrik biasanya disebabkan oleh dua macam tegangan surja yaitu surja petir dan surja hubung yang mempunyai amplitudo lebih besar dari nilai puncak tegangan nominalnya. Salah satu sumber tegangan lebih surja hubung adalah peristiwa pembukaan dan penutupan pemutus tenaga. Besarnya amplitudo tegangan saat pelepasan beban selalu berkorelasi dengan tegangan sistem dan frekuensi osilasi yang dipengaruhi oleh impedansi sistem. Gejala surja hubung pada saluran transmisi dapat diselesaikan dengan membuat rangkaian ekivalen satu fasa. Sehingga tiap fasa diasumsikan dapat berdiri sendiri, hal tersebut berlaku jika pemutusan tenaga pada masing-masing fasa menutup secara serentak. Simulasi yang akan dilakukan adalah dengan memberikan trigger gangguan tiga fasa ke tanah dengan asumsi dilakukannya pembukaan *circuit breaker*.



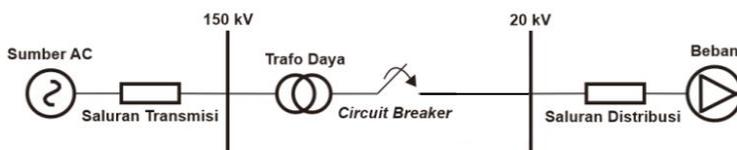
Gambar 3.1 Rangkaian *Switching* dan Respon Gelombang Impuls

Tegangan ini terdiri dari komponen frekuensi tinggi yang dilapiskan pada tegangan sistem normal dan totalnya dinamakan *restriking voltage* dan membentuk surja *switching*, ketika *circuit*

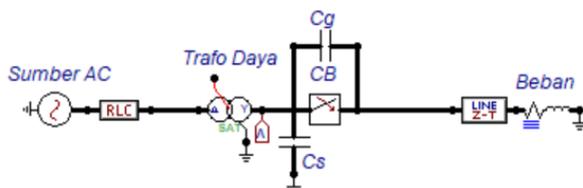
breaker membuka terjadi penghentian arus yang besarnya sama dan arahnya berlawanan ke dalam sistem, arus ini berbentuk sinusoidal. Tegangan restriking dapat mencapai harga maksimum dua kali lipat harga puncak tegangan pemulihan sistem.

3.2 Pemodelan Rangkaian Transient Recovery Voltage

Pada studi ini dilakukan simulasi untuk mengetahui respon *transient recovery voltage* yang terjadi pada *switching circuit breaker* tegangan menengah 20 kV sehingga perlu membuat pemodelan rangkaian sistem tersebut seperti pada Gambar 3.2 yang akan dimodelkan seperti Gambar 3.3 dengan menggunakan perangkat lunak ATPDraw



Gambar 3.5 Single Line Diagram Rangkaian Switching Circuit Breaker



Gambar 3.3 Pemodelan Rangkaian Switching Circuit Breaker

3.2.1 Pemodelan Rangkaian Switching Circuit Breaker dengan hubungan belitan trafo daya yang berbeda

Untuk pemodelan sistem, digunakan 3 jenis hubungan belitan trafo daya yang berbeda, yaitu

1. Trafo daya menggunakan belitan jenis *Delta – Wye*.
2. Trafo daya menggunakan belitan jenis *Wye – Delta*.
3. Trafo daya menggunakan belitan jenis *Delta – Delta*.
4. Trafo daya menggunakan belitan jenis *Wye – Wye*.

Dilakukannya simulasi dengan menggunakan jenis hubungan belitan trafo daya dimaksudkan untuk mencari tahu perbedaan dari

transient recovery voltage yang dihasilkan. Sehingga gelombang berjalan yang terjadi juga diketahui karakteristiknya. *Transient Recovery Voltage* yang dihasilkan saat proses pemutusan *circuit breaker* akan dianalisis menggunakan gelombang dengan parameter parameter inputnya adalah $V_{L-N\text{ peak}}$ sisi sekunder trafo daya yang berbeda berdasarkan jenis hubungan belitannya.

Setelah karakteristik gelombang pantul diketahui, maka akan dibandingkan hasilnya dengan *Transient Recovery Voltage* tersebut. Pemodelan sistem tersebut diilustrasikan pada Gambar 3.4, Gambar 3.5, Gambar 3.6 dan Gambar 3.7.

Tabel 3.1 Parameter Rangkaian

Parameter	Nilai	Satuan
Sumber Tegangan	150	kV
Frekuensi	50	Hz
<i>Grading Capacitance</i> (C_g)	0.05	μF
<i>Shunt Capacitance</i> (C_s)	1	μF
<i>Circuit breaker</i>	0.1	s
<i>Switching Short circuit</i>	0.05	s

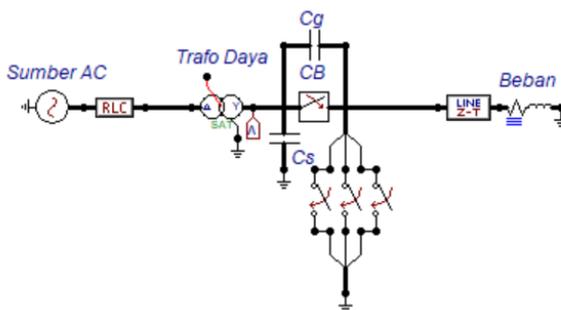
Berdasarkan pada rangkaian *single line diagram* transmisi tegangan menengah 20 kV seperti Gambar 3.2 diatas, dibuatlah pemodelan rangkaian *transient recovery voltage* yang berbeda hubungan belitan trafo daya untuk mengetahui beda respon *transient recovery voltage* yang ditunjukkan pada Gambar 3.4, Gambar 3.5, Gambar 3.6, dan Gambar 3.7. Pemodelan rangkaian tersebut dilengkapi dengan *trigger* berupa *switching* yang kemudian dihubungkan ke *ground* sebagai pemodelan dari *short circuit* sistem. Pemodelan rangkaian ini terdiri dari komponen-komponen utama seperti sumber tegangan 150 kV, resistor, kapasitor, induktor nonlinier, *circuit breaker*, trafo daya dengan parameter rangkaian yang ditunjukkan pada Tabel 3.1. Pemodelan rangkaian dilakukan pada *Alternative Transient Program* atau ATPDraw. Tujuan dari pemodelan rangkaian *transient recovery voltage* ini yaitu untuk mengetahui perbedaan respon tegangan *transient* saat terjadinya *switching circuit breaker* tegangan menengah dan mengetahui perbedaan respon gelombang berjalan yang akan dianalisis dengan metode *lattice bewley diagram* menggunakan perangkat lunak MATLAB.

Parameter yang digunakan dalam setiap komponen ditunjukkan oleh Tabel 3.1 dan Tabel 3.2. Kemudian pemodelan rangkaian menggunakan sebuah trafo daya yang digunakan untuk menurunkan tegangan dari tegangan sumber ke tegangan menengah. Trafo daya yang digunakan adalah trafo daya penurun tegangan (Step-Down) tiga fasa dengan rating tegangan sebesar 150 kV / 20 kV. Parameter trafo daya yang digunakan pada studi ini diambil dari referensi yang ditunjukkan pada Table 3.2.

Tabel 3.2 Parameter Trafo Daya

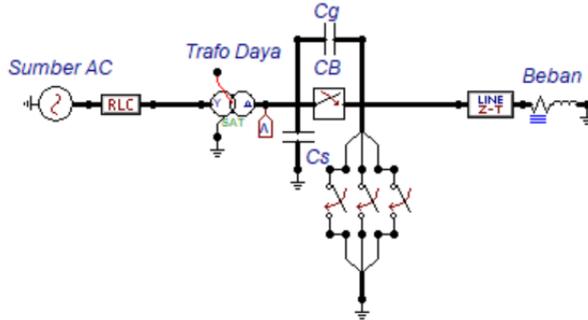
Parameter	Nilai	Satuan
Resistansi Primer	220	Ω
Induktansi Primer	1,745	mH
R magnetisasi	6500000	Ω
Resistansi Sekunder	5	Ω
Induktansi Sekunder	0,039	mH

3.2.1.1 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Wye* pada Kondisi *Switching Circuit Breaker*



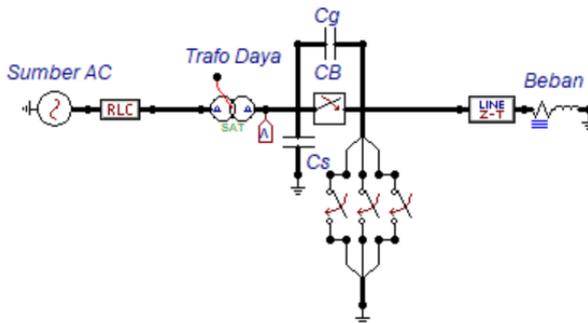
Gambar 3.4 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Wye* pada Kondisi *Switching Circuit Breaker*

3.2.1.2 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya Wye-Delta pada Kondisi *Switching Circuit Breaker*



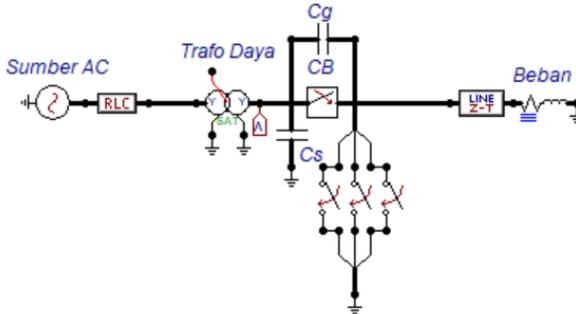
Gambar 3.5 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya Wye-Delta pada Kondisi *Switching Circuit Breaker*

3.2.1.3 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya Delta-Delta pada Kondisi *Switching Circuit Breaker*



Gambar 3.6 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya Delta-Delta pada Kondisi *Switching Circuit Breaker*

3.2.1.4 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya Wye-Wye pada Kondisi *Switching Circuit Breaker*



Gambar 3.7 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya Wye-Wye pada Kondisi *Switching Circuit Breaker*

3.3 Nilai Tegangan Trafo daya saat kondisi normal

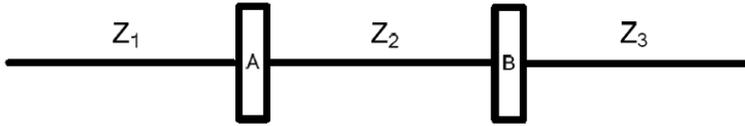
Nilai tegangan trafo yang digunakan untuk mendapatkan nilai dari gelombang berjalan adalah tegangan puncak fasa ke tanah ($V_{L-N \text{ peak}}$) pada sisi sekunder trafo (20 kV). Dalam kondisi normal, variasi sistem pentanahan diabaikan karena belum dilakukan proses *switching circuit breaker*. Sehingga nilai tegangannya bisa dihitung menggunakan rumus

$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{V_{L-L \text{ rms}}}{\sqrt{3}} \quad (3.1)$$

$$V_{L-N \text{ peak}} = V_{L-N \text{ rms}} \sqrt{3} \quad (3.2)$$

3.4 Penurunan Rumus Gelombang Berjalan dengan Metode *Bewley Lattice Diagram*

Contoh sistem dengan jalur transmisi yang bisa dibedakan nilai impedansi kabel yang berbeda. Z_1 , Z_2 dan Z_3 telah ditunjukkan seperti Gambar 3.8. Dalam praktiknya kasus ini dapat dibandingkan dengan tiga parameter impedansi surja yang berbeda yaitu Z_1 , Z_2 dan Z_3 . Nilai yang dihitung dalam gelombang berjalan adalah hasil tegangan pantul dari $V_{L-N \text{ peak}}$ jaringan tegangan menengah ke arah beban [13].



Gambar 3.8 Sistem Transmisi dengan Tiga Nilai Impedansi yang Berbeda

3.4.1 Perumusan Gelombang Pantul yang terjadi

Setelah terjadinya *switching circuit breaker*, maka akan menimbulkan arah tegangan ke kanan dan ke kiri yang menimbulkan adanya gelombang berjalan yang terjadi di *line*. Dengan mengalikan tegangan yang datang dengan koefisien pantul yang didapatkan dari parameter nilai impedansi surja saluran.

Ketika proses *switching* terjadi gelombang impuls akan bergerak ke arah kanan dan ke arah kiri *circuit breaker* dengan tegangan puncak dari *transient recovery voltage* yang dihasilkan. Setelah bertemu dengan nilai impedansi yang berbeda, gelombang akan dipantulkan sesuai dengan perumusan koefisien pantul dan menghasilkan umpan balik gelombang dengan nilai yang berbeda. Setelah dipantulkan, gelombang pantul akan merambat kembali ke arah *circuit breaker* dengan kondisi ditanahkan (*ground*). Maka koefisien pantul dari *circuit breaker* akan bernilai 0. Karena pada kondisi terbuka, harga dari impedansi surja *circuit breaker* bernilai tak terhingga (∞). Sehingga gelombang pantul berikutnya akan bernilai sama dengan sebelumnya. Gelombang pantul dari *circuit breaker* akan merambat ke arah berlawanan dan dipantulkan oleh koefisien pantul yang pertama dan menghasilkan nilai gelombang yang berbeda. Hal ini terjadi secara terus menerus sampai gelombang berjalan bernilai 0 seperti yang divisualisasikan pada Gambar 3.9. Rumus koefisien pantul akan dijelaskan pada rumus-rumus berikut

Rumus koefisien pantul Z_s dan Z_1 (ρ_s),

$$\frac{Z_s - Z_1}{Z_s + Z_1} \quad (3.1)$$

Rumus koefisien pantul Z_1 dan Z_2 (ρ_L),

$$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.2)$$

Berikut adalah rumus gelombang berjalan yang dipantulkan oleh koefisien pantul dan seterusnya seperti Gambar 3.9

Refleksi v_1 ,

$$v_1 = v (\rho_L) \quad (3.3)$$

Refleksi v_2 ,

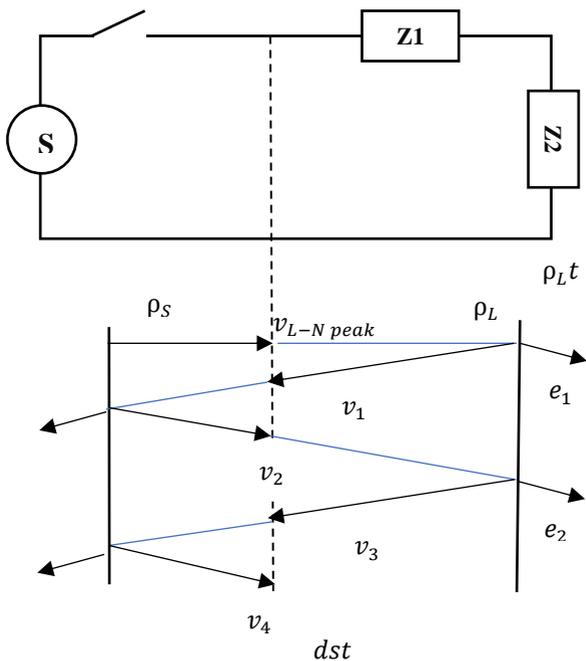
$$v_2 = v_1 (\rho_S) \quad (3.4)$$

Refleksi v_3 ,

$$v_3 = v_2 (\rho_L) \quad (3.5)$$

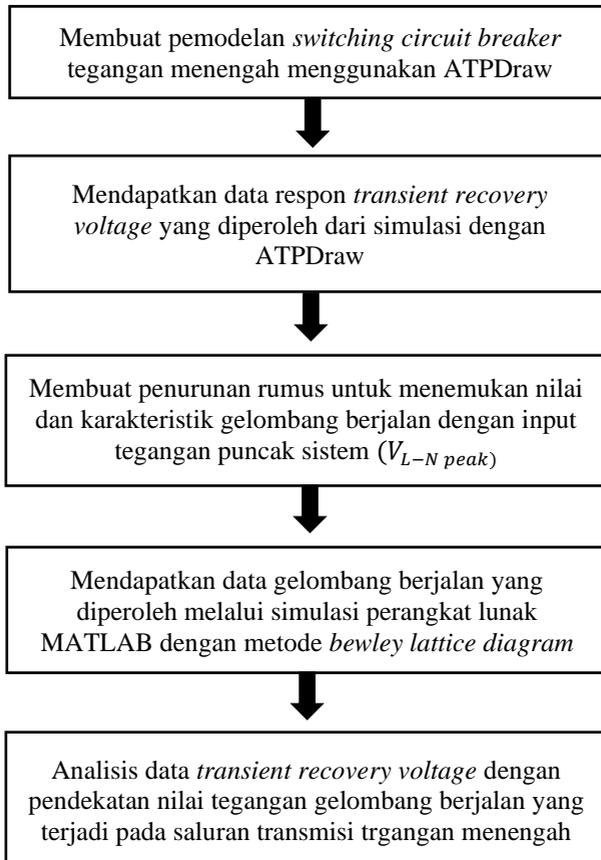
Terkirim v' ,

$$e_1 = v (\rho_{Lt}) \quad (3.6)$$



Gambar 3.9 Pemodelan Gelombang Pantul *Bewley Lattice Diagram*

Untuk mengetahui nilai dari gelombang berjalan yang dipantulkan, maka akan dihitung dengan program memakai aplikasi lunak MATLAB. Kemudian hasil dari gelombang berjalan akan dibandingkan dengan nilai *transient recovery voltage* yang ditimbulkan oleh *switching circuit breaker*.



Gambar 3.10 Flowchart Pengambilan dan Pengolahan Data

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS *TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE* MENGGUNAKAN GELOMBANG BERJALAN

4.1 Parameter Impedansi Saluran

Hantaran koaksial atau kabel terdiri dari beberapa lapis konduktor yang dipisahkan oleh lapisan dielektrik dan menyebabkan adanya perbedaan nilai jari-jari antara konduktor yang berada di bagian dalam dengan konduktor yang berada di luar. Pada penghantar koaksial, nilai perbandingan inilah yang berpengaruh pada besarnya impedansi surja saluran. Pada umumnya nilai impedansi surja untuk hantaran udara dan kabel untuk setiap level tegangan adalah sebagai berikut

1. 20 kV = 200 – 250 Ω
2. 70 kV = 250 – 300 Ω
3. 150 kV = 300 – 350 Ω
4. 270 kV = 350 – 400 Ω
5. 500 kV = 400 – 500 Ω
6. Kabel tanah = 200 – 400 Ω
7. Kabel tegangan rendah = 30-80 Ω [8]

Nilai impedansi saluran (Z_1) pada simulasi didapatkan pada penurunan rumus

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.1)$$

Dengan nilai $L = 7,9337 \times 10^{-3}$ dan $C = 0,12275 \times 10^{-6}$. Sehingga harga impedansi surja saluran adalah

$$\begin{aligned} Z_1 &= \sqrt{\frac{7,9337 \times 10^{-3}}{0,12275 \times 10^{-6}}} \\ &= 254,23 \Omega \end{aligned} \quad (4.2)$$

Nilai dari impedansi surja beban diasumsikan bernilai 80 Ω dan impedansi surja dari *circuit breaker* yang terbuka bernilai ∞ . Maka penentuan koefisien pantul maupun koefisien kirim dapat diketahui dengan penurunan rumus pada bab 3.

Untuk mengetahui nilai dari gelombang berjalan yang terjadi, pada awalnya kita mencari koefisien pantul dari ujung saluran (ρ_L) dan

koefisien pantul dari *circuit breaker* (ρ_S). Nilai dari koefisien pantul tersebut sangat dipengaruhi oleh nilai impedansi surja pada saluran.

Rumus koefisien pantul Z_S dan Z_1 (ρ_S),

$$\frac{\infty - Z_1}{\infty + Z_1} \quad (4.3)$$

$$= \frac{\infty - 254,23}{\infty + 254,23}$$

$$= 1$$

Rumus koefisien pantul Z_1 dan Z_2 (ρ_L),

$$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4.4)$$

$$= \frac{80 - 254,23}{80 + 254,23}$$

$$= -0,5213$$

Rumus koefisien kirim Z_1 dan Z_2 ($\rho_L t$),

$$\frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (4.5)$$

$$= \frac{2(80)}{80 + 254,23}$$

$$= 0,4787$$

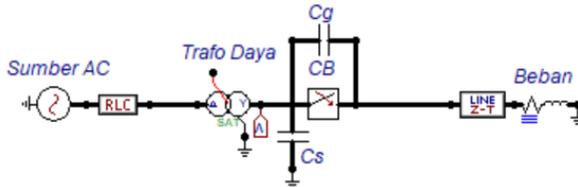
4.2 Pemodelan dan Simulasi *Switching Circuit Breaker* 20 kV Menggunakan perangkat lunak ATPDraw

Pemodelan *switching circuit breaker* disimulasikan dengan variasi hubungan belitan trafo yang berbeda yaitu *delta-wye*, *wye-delta*, *delta-delta*, dan *wye-wye* untuk mengetahui karakteristik *transient recovery voltage* yang ditimbulkan. Hasil dari gelombang berjalan yang dihasilkan juga akan berbeda nilai karena parameter inputnya adalah $V_{L-N \text{ peak}}$ sisi sekunder trafo daya yang berbeda berdasarkan jenis hubungan belitannya.

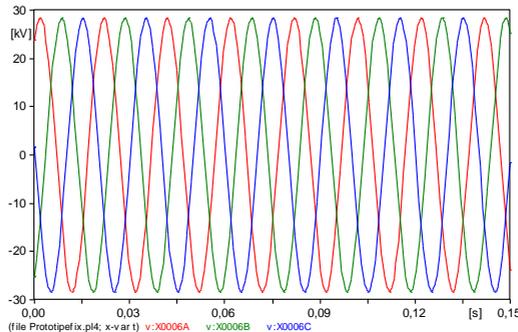
4.2.1 Pemodelan dan Simulasi *Switching Circuit Breaker* 20 kV dengan Hubungan Belitan Trafo Daya Delta – Wye

Pada simulasi *transient recovery voltage* ini, dibuktikan respon tegangan puncak fasa ke tanah ($V_{L-N \text{ peak}}$) pada kondisi normal sebelum terjadinya *switching circuit breaker* seperti yang divisualisasikan oleh Gambar 4.1. Nilai dari tegangan tersebut sudah sesuai dengan hasil yang semestinya berdasarkan penurunan rumus yang ada di bab 3. Kemudian dilakukan simulasi pemodelan sistem saat terjadinya *switching circuit breaker* yang divisualisasikan oleh Gambar 4.2.

4.2.1.1 Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya Delta–Wye pada kondisi normal



Gambar 4.1 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Wye* pada Kondisi Normal



Gambar 4.2 Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Wye* pada Kondisi Normal

Nilai tegangan *line-netral* ($V_{L-N \text{ rms}}$) pada sisi sekunder trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{20.000}{\sqrt{3}} \quad (3.6)$$

$$= 11.547.005 \text{ V}$$

Sehingga nilai tegangan puncak ($V_{L-N \text{ peak}}$) pada sisi primer trafo adalah:

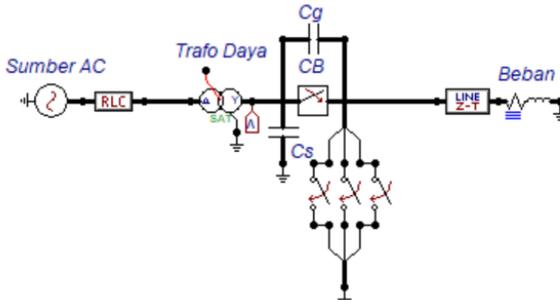
$$V_{L-N \text{ peak}} = V_{L-N \text{ rms}} \times \sqrt{2} \times \sqrt{3} \quad (3.7)$$

$$= 11.547.005 \times \sqrt{2} \times \sqrt{3}$$

$$= 28.284,27 \text{ V}$$

Tegangan ini adalah tegangan kerja sistem yang selanjutnya digunakan sebagai tegangan input untuk mencari gelombang berjalan yang terjadi.

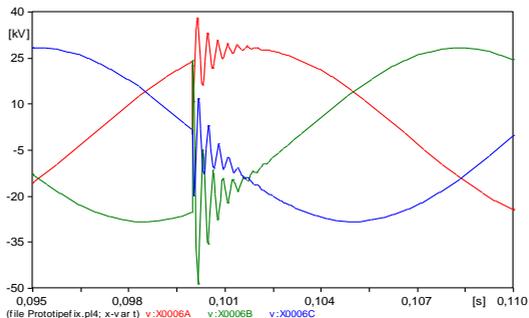
4.2.1.2 Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya *Delta-Wye* saat *Switching Circuit Breaker*



Gambar 4.3 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Wye* saat *Switching Circuit Breaker*

Hasil simulasi pada ATPDraw diperoleh nilai tegangan puncak transien fasa R sebesar 37.907,3 V , fasa S sebesar -48.517,6 V dan fasa T sebesar 11.831,5 V. Karena tegangan sistem bernilai 28.284,27 V, maka *transient recovery voltage* yang melebihi tegangan sistem adalah pada fasa R dan T. Dan tegangan transien tertinggi terjadi pada fasa S

yang bernilai -48.517,6 V pada detik ke 0.000158 setelah terjadinya proses *switching circuit breaker*.



Gambar 4.4 Hasil Analisis Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Wye* saat *Switching Circuit Breaker*

Tabel 4.1 Tegangan Puncak Transient Recovery Voltage Tegangan 20 Kv dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Wye*

<i>Fasa</i>	<i>t (detik)</i>	V_{peak} (V)
R	0,000142	37.907,3
S	0,000158	-48.517,6
T	0,000172	11.831,5

4.2.1.3 Analisis *Transient Recovery Voltage* dengan Hubungan Belitan Trafo Daya *Delta-Wye* Menggunakan Gelombang Berjalan

Gelombang berjalan yang terjadi di saluran transmisi adalah akibat dari tegangan $V_{L-N peak}$ yang dipantulkan oleh koefisien pantul ρ_L dan ρ_S . Analisa transien pada gelombang berjalan dalam perhitungan menggunakan diagram lattice, dimana besar impedansi surja Z_1 sebesar 254,23 Ω/m (*perhitungan ditunjukkan pada sub bab 4.1*) dan peralatan trafo dianggap sebagai jepitan terbuka sehingga memiliki nilai $ZL = Z2 = \infty$ (tak terhingga) sedangkan impedansi pentanahan (Zs) = 0, dengan

waktu puncak berlangsungnya surja hubung menurut standar IEC adalah 250 μs (0,25 ms).

$$V_{L-N \text{ peak}} = 28.284,27$$

Refleksi v_1 ,

$$\begin{aligned} v_1 &= v (\rho_L) & (4.8) \\ &= 28.284,27 \times -0,5213 \\ &= -14.744,59 \text{ V} \end{aligned}$$

Refleksi v_2 ,

$$\begin{aligned} v_2 &= v_1 (\rho_S) & (4.9) \\ &= -14744,59 \times 1 \\ &= -14.744,59 \text{ V} \end{aligned}$$

Refleksi v_3 ,

$$\begin{aligned} v_3 &= v_2 (\rho_L) & (4.10) \\ &= -14744,59 \times -0,5213 \\ &= 7.686,355 \text{ V} \end{aligned}$$

Terkirim e^1 ,

$$\begin{aligned} e^1 &= v (\rho_L t) & (4.11) \\ &= 28.284,27 \times 0,4787 \\ &= 13539,68 \text{ V} \end{aligned}$$

Terkirim e^2 ,

$$\begin{aligned} e^2 &= v_2 (\rho_L t) & (4.12) \\ &= -14.744,59 \times 0,4787 \\ &= -7.058,235 \text{ V} \end{aligned}$$

Terkirim e^3 ,

$$\begin{aligned} e^3 &= v_4 (\rho_L t) & (4.13) \\ &= 7.686 \times 0,4787 \\ &= 3.679,29 \text{ V} \end{aligned}$$

Penghitungan ini akan berlanjut sampai gelombang berjalan bernilai 0 V. Yang selanjutnya akan diselesaikan menggunakan program di perangkat lunak MATLAB dengan menampilkan data pantulan pertama sampai pantulan ketigapuluh.

Pada pemodelan *transient recovery voltage* dengan hubungan belitan trafo daya *Delta-Wye* didapatkan hasil persentase nilai V_{peak} *transient recovery voltage* terhadap V_{peak} nilai gelombang berjalan seperti pada Tabel 4.3. Data yang dihasilkan menyatakan nilai dari V_{peak} *transient recovery voltage* pada fasa R sebesar 289,20 % dari V_{peak} gelombang berjalan pada fasa yang sama. Nilai dari V_{peak} *transient*

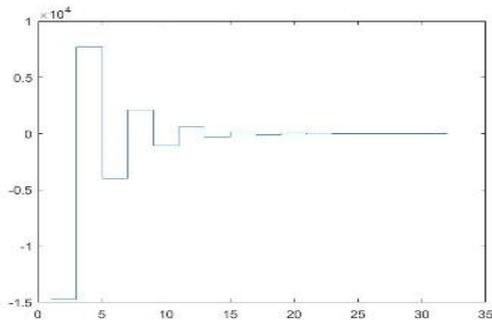
recovery voltage pada fasa S sebesar 267,25 % dari V_{peak} gelombang berjalan pada fasa yang sama. Nilai dari V_{peak} *transient recovery voltage* pada fasa T sebesar 189,65 % dari V_{peak} gelombang berjalan pada fasa yang sama.

Tabel 4.2 Hasil Penghitungan Gelombang Berjalan di Saluran dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Wye*

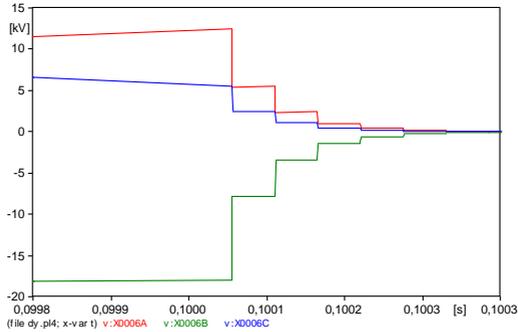
Gelombang Pantul	V	Gelombang Maju	V
v	28.284,27	e^1	13.539,68
v_1	-14.744		
v_2	-14.744	e^2	-7.0579,5
v_3	7.686		
v_4	7.686	e^3	3.679,29
v_5	-4.007		
v_6	-4.007	e^4	-1.918,15
v_7	2.089		
v_8	2.089	e^5	1.000
v_9	-1.089		
v_{10}	-1.089	e^6	-521,3
v_{11}	568		
v_{12}	568	e^7	271,9
v_{13}	-296		
v_{14}	-296	e^8	-141,7
v_{15}	154		
v_{16}	154	e^9	73,72
v_{17}	-80		
v_{18}	-80	e^{10}	-38,3

Tabel 4.2 Hasil Penghitungan Gelombang Berjalan di Saluran dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Wye*

Gelombang Pantul	V	Gelombang Maju	V
v_{19}	42		
v_{20}	42	e^{11}	20,11
v_{21}	-22		
v_{22}	-22	e^{12}	-10,53
v_{23}	11		
v_{24}	11	e^{13}	5,27
v_{25}	-6		
v_{26}	-6	e^{14}	-2,87
v_{27}	3		
v_{28}	3	e^{15}	1,44
v_{29}	-2		
v_{30}	-2	e^{16}	-0,957



Gambar 4.5 Grafik Penghitungan Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Wye* Menggunakan Perangkat Lunak MATLAB



Gambar 4.6 Visualisasi Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Wye*

Tabel 4.3 Persentase *Transient Recovery Voltage* terhadap Gelombang Berjalan

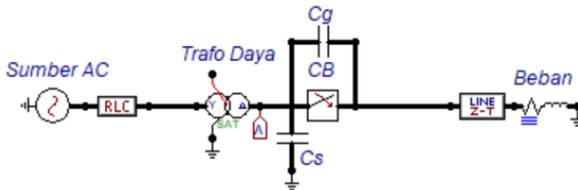
<i>Fasa</i>	V_{peak} TRV (V)	V_{peak} Gelombang Berjalan (V)	Persentase TRV terhadap Gelombang berjalan
R	37.907,3	13.107,5	289,20 %
S	-48.517,6	-18.154,4	267,25 %
T	11.831,5	6.238,2	189.65 %

4.2.2 Pemodelan dan Simulasi *Switching Circuit Breaker* 20 kV dengan Hubungan Belitan Trafo Daya *Wye-Delta*

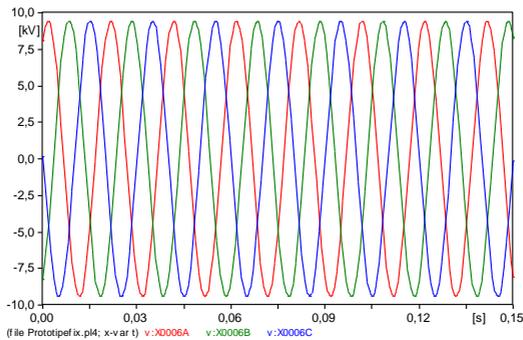
Pada simulasi *transient recovery voltage* ini, dibuktikan respon tegangan puncak fasa ke tanah ($V_{L-N peak}$) pada kondisi normal sebelum terjadinya *switching circuit breaker* seperti yang divisualisasikan oleh Gambar 4.7 Nilai dari tegangan tersebut sudah sesuai dengan hasil yang semestinya berdasarkan penurunan rumus yang ada di bab 3. Kemudian dilakukan simulasi pemodelan sistem saat terjadinya *switching circuit*

breaker yang divisualisasikan oleh Gambar 4.8. Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya *Wye-Delta* saat Kondisi Normal

4.2.2.1 Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya *Delta-Wye* pada kondisi normal



Gambar 4.7 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya *Wye-Delta* saat *Switching Circuit Breaker*



Gambar 4.8 Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya *Wye-Delta* pada Kondisi Normal

Nilai tegangan *line-netral* ($V_{L-N \text{ rms}}$) pada sisi sekunder trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{20.000}{\sqrt{3}} \quad (4.14)$$

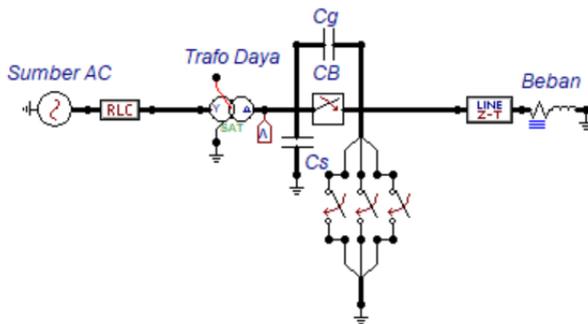
$$= 11.547.005 \text{ V}$$

Sehingga nilai tegangan puncak ($V_{L-N \text{ peak}}$) pada sisi primer trafo adalah:

$$\begin{aligned}
 V_{L-N \text{ peak}} &= \frac{V_{L-N \text{ rms}} \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} & (4.15) \\
 &= \frac{11.547,005 \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \\
 &= 9.428,09 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Tegangan ini adalah tegangan kerja sistem yang selanjutnya digunakan sebagai tegangan input untuk mencari gelombang berjalan yang terjadi.

4.2.2.2 Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya Wye-Delta saat Switching Circuit Breaker

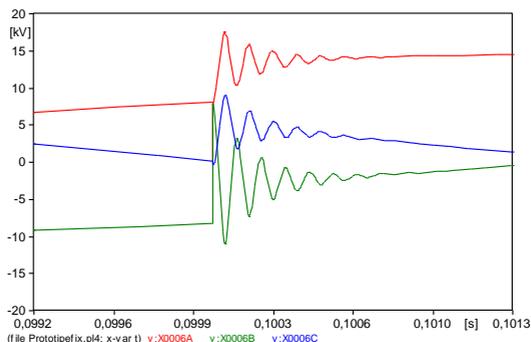


Gambar 4.9 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya Wye-Delta Saat Switching Circuit Breaker

Tabel 4.4 Tegangan Puncak *Transient Recovery Voltage* Tegangan 20 kV dengan Belitan Trafo Daya Wye-Delta

<i>Fasa</i>	<i>T (detik)</i>	<i>V_{peak} (V)</i>
R	0,000051	17.547
S	0,000053	-11.067
T	0,000056	8.961,85

Hasil simulasi pada ATPDraw diperoleh nilai tegangan puncak transien fasa R sebesar 17.547 V , fasa S sebesar -11.067 V dan fasa T sebesar 11.831,5 V. Karena tegangan sistem bernilai 28.284,27 V, maka *transient recovery voltage* yang melebihi tegangan sistem adalah pada fasa R dan S. Dan tegangan transien tertinggi terjadi pada fasa R yang bernilai 17.547 V pada ke 0,00051 detik setelah terjadinya proses *switching circuit breaker*.



Gambar 4.10 Hasil Simulasi Rangkaian Dengan Belitan Trafo Daya Wye-Delta Saat *Switching Circuit Breaker*

4.2.2.3 Analisis *Transient Recovery Voltage* dengan Hubungan Belitan Trafo Daya Wye-Delta Menggunakan Gelombang Berjalan

Gelombang berjalan yang terjadi di saluran transmisi adalah akibat dari tegangan $V_{L-N \text{ peak}}$ yang dipantulkan oleh koefisien pantul ρ_L dan ρ_S . Analisa transien pada gelombang berjalan dalam perhitungan menggunakan diagram lattice, dimana besar impedansi surja z_1 sebesar 254,23 Ω/m (*perhitungan ditunjukkan pada sub bab 4.1*) dan peralatan trafo dianggap sebagai jepitan terbuka sehingga memiliki nilai $Z_L = Z_2 = \infty$ (tak terhingga) sedangkan impedansi pentanahan (Z_s) = 0, dengan waktu puncak berlangsungnya surja hubung menurut standar IEC adalah 250 μs (0,25 ms).

$$V_{L-N \text{ peak}} = 9.428,09 \text{ V}$$

Refleksi v_1 ,

$$\begin{aligned} v_1 &= v (\rho_L) \\ &= 9.428,09 x - 0,5213 \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} &= -4.914,863 \text{ V} \\ \text{Refleksi } v_2, & \\ v_2 = v_1 (\rho_S) & \quad (4.17) \\ &= -4.914,863 \times 1 \\ &= -4.914,863 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Refleksi } v_3, & \\ v_3 = v_2 (\rho_L) & \quad (4.18) \\ &= -4.914,863 \times -0,5213 \\ &= 2.562,118 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Terkirim } e^1, & \\ e^1 = v (\rho_L t) & \quad (4.19) \\ &= 9.428,09 \times 0,4787 \\ &= 4.513,323 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Terkirim } e^2, & \\ e^2 = v_2 (\rho_L t) & \quad (4.20) \\ &= -4.914,863 \times 0,4787 \\ &= -2.352,667 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Terkirim } e^3, & \\ e^3 = v_4 (\rho_L t) & \quad (4.21) \\ &= 2.5620 \times 0,4787 \\ &= 1.226,429 \text{ V} \end{aligned}$$

Penghitungan ini akan berlanjut sampai gelombang berjalan bernilai 0 V. Yang selanjutnya akan diselesaikan menggunakan program di perangkat lunak MATLAB dengan menampilkan data pantulan pertama sampai pantulan ketigapuluh.

Pada pemodelan *transient recovery voltage* dengan hubungan belitan trafo daya *Wye-Delta* didapatkan hasil persentase nilai V_{peak} *transient recovery voltage* terhadap V_{peak} nilai gelombang berjalan seperti pada Tabel 4.6. Data yang dihasilkan menyatakan nilai dari V_{peak} *transient recovery voltage* pada fasa R sebesar 359,69 % dari V_{peak} gelombang berjalan pada fasa yang sama. Nilai dari V_{peak} *transient recovery voltage* pada fasa S sebesar 220,29 % dari V_{peak} gelombang berjalan pada fasa yang sama. Nilai dari V_{peak} *transient recovery voltage* pada fasa T sebesar 1123 % dari V_{peak} gelombang berjalan pada fasa yang sama.

Tabel 4.5 Hasil Penghitungan Gelombang Berjalan di Saluran dengan Belitan Trafo Daya *Wye-Delta*

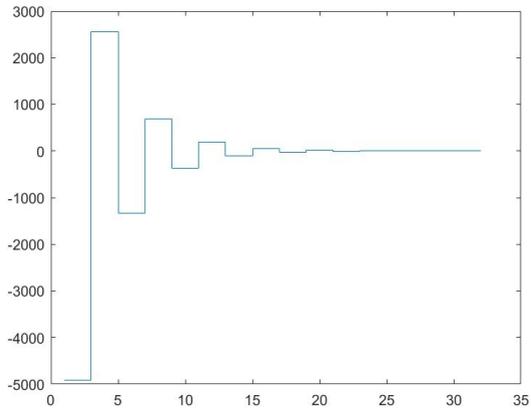
Gelombang Pantul	V	Gelombang Maju	V
v	9.428,09	e^1	4.513,227
v_1	-4.914,7		
v_2	-4.914,7	e^2	-2.352,667
v_3	2.562		
v_4	2.562	e^3	1.226,429
v_5	-1.335,5		
v_6	- 1.335,5	e^4	-639,304
v_7	696,2		
v_8	696,2	e^5	333,271
v_9	-362,9		
v_{10}	-362,9	e^6	173,72
v_{11}	189,2		
v_{12}	189,2	e^7	90,57
v_{13}	-98,6		
v_{14}	-98,6	e^8	-47,2
v_{15}	51,4		
v_{16}	51,4	e^9	24,605
v_{17}	-26,8		
v_{18}	-26,8	e^{10}	-12,829
v_{19}	14		
v_{20}	14	e^{11}	6,702
v_{21}	-7,3		
v_{22}	-7,3	e^{12}	-3,495

Tabel 4.5 Hasil Penghitungan Gelombang Berjalan di Saluran dengan Belitan Trafo Daya Wye-Delta

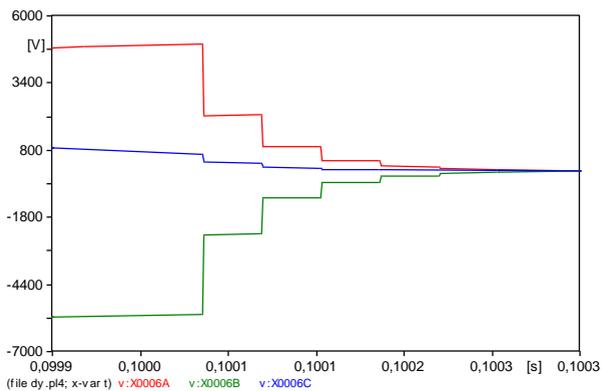
Gelombang Pantul	V	Gelombang Maju	V
v_{23}	3,8		
v_{24}	3,8	e^{13}	1,819
v_{25}	2		
v_{26}	2	e^{14}	-0,957
v_{27}	1		
v_{28}	1	e^{15}	0,479
v_{29}	-0.2		
v_{30}	-0.2	e^{16}	-0,0957

Tabel 4.6 Persentase *Transient Recovery Voltage* terhadap Gelombang Berjalan

Fasa	V_{peak} TRV (V)	V_{peak} Gelombang Berjalan (V)	Persentase TRV terhadap Gelombang berjalan
R	17.547	4.878,4	359,69 %
S	-11.067	-5023,7	220,29 %
T	8.961,85	797,6	1123 %



Gambar 4.11 Grafik Penghitungan Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya *Wye-Delta* Menggunakan Perangkat Lunak MATLAB

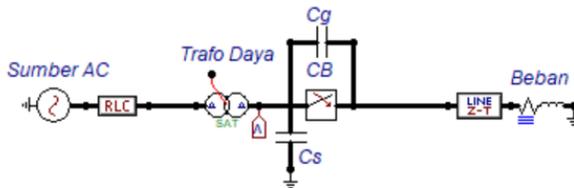


Gambar 4.12 Visualisasi Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya *Wye-Delta*

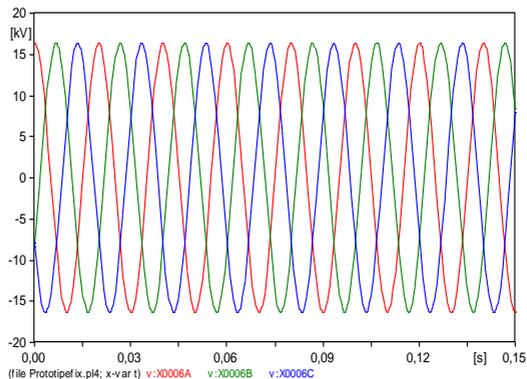
4.2.3 Pemodelan dan Simulasi *Switching Circuit Breaker* 20 kV dengan Hubungan Belitan Trafo Daya *Delta-Delta*

Pada simulasi *transient recovery voltage* ini, dibuktikan respon tegangan puncak fasa ke tanah ($V_{L-N \text{ peak}}$) pada kondisi normal sebelum terjadinya *switching circuit breaker* seperti yang divisualisasikan oleh Gambar 4.13. Nilai dari tegangan tersebut sudah sesuai dengan hasil yang semestinya berdasarkan penurunan rumus yang ada di bab 3. Kemudian dilakukan simulasi pemodelan sistem saat terjadinya *switching circuit breaker* yang divisualisasikan oleh Gambar 4.14.

4.2.3.1 Analisis Dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya *Delta-Delta* pada Kondisi Normal



Gambar 4.13 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Delta* pada Kondisi Normal



Gambar 4.14 Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Delta* pada Kondisi Normal

Nilai tegangan *line-netral* ($V_{L-N \text{ rms}}$) pada sisi sekunder trafo daya adalah:

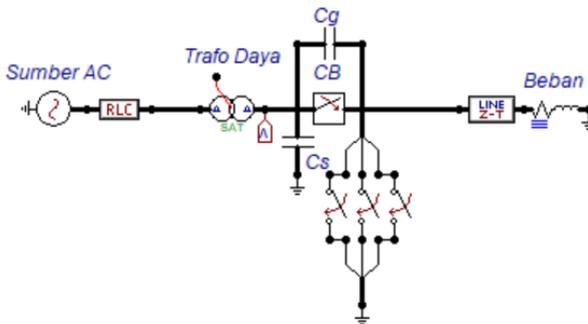
$$\begin{aligned} V_{L-N \text{ rms}} &= \frac{20.000}{\sqrt{3}} \\ &= 11.547.005 \text{ V} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Sehingga nilai tegangan puncak ($V_{L-N \text{ peak}}$) pada sisi primer trafo adalah:

$$\begin{aligned} V_{L-N \text{ peak}} &= V_{L-N \text{ rms}} \times \sqrt{2} \\ &= 11.547.005 \times \sqrt{2} \\ &= 16.329,93 \text{ V} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Tegangan ini adalah tegangan kerja sistem yang selanjutnya digunakan sebagai tegangan input untuk mencari gelombang berjalan yang terjadi

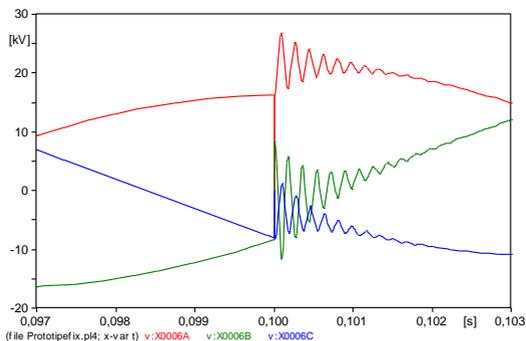
4.2.3.2 Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya *Delta-Delta* pada *Switching Circuit Breaker*



Gambar 4.15 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Delta* Saat *Switching Circuit Breaker*

Hasil simulasi pada ATPDraw diperoleh nilai tegangan puncak transien fasa R sebesar 26.801,1 V , fasa S sebesar -11.634,5V dan fasa R sebesar -8.081,53 V. Karena tegangan sistem bernilai 16.329,93 V, maka

transient recovery voltage yang melebihi tegangan sistem adalah pada fasa R dan T. Dan tegangan transien tertinggi terjadi pada fasa R yang bernilai 26.801,1 V pada detik ke 0,000088 setelah terjadinya proses *switching circuit breaker*.



Gambar 4.16 Hasil Simulasi Rangkaian Dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Delta* Saat *Switching Circuit Breaker*

Tabel 4.7 Tegangan Puncak *Transient Recovery Voltage* Tegangan 20 kV dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Delta*

Fasa	t (detik)	V_{peak} (V)
R	0,000088	26.801,1
S	0,000094	-11.634,5
T	0,000013	-8.081,53

4.2.3.3 Analisis *Transient Recovery Voltage* dengan Hubungan Belitan Trafo Daya *Delta-Delta* menggunakan gelombang berjalan

Gelombang berjalan yang terjadi di saluran transmisi adalah akibat dari tegangan V_{L-N} peak yang dipantulkan oleh koefisien pantul ρ_L dan ρ_S . Analisa transien pada gelombang berjalan dalam perhitungan menggunakan diagram lattice, dimana besar impedansi surja z_1 sebesar

254,23 Ω/m (perhitungan ditunjukkan pada sub bab 4.1) dan peralatan trafo dianggap sebagai jepitan terbuka sehingga memiliki nilai $Z_L = Z_2 = \infty$ (tak terhingga) sedangkan impedansi pentanahan (Z_s) = 0, dengan waktu puncak berlangsungnya surja hubung menurut standar IEC adalah 250 μs (0,25 ms).

$$V_{L-N \text{ peak}} = 16.329,93 \text{ V}$$

Refleksi v_1 ,

$$\begin{aligned} v_1 &= v(\rho_L) \\ &= 16.329,93 \times -0,5213 \\ &= -8.512,308 \text{ V} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Refleksi v_2 ,

$$\begin{aligned} v_2 &= v_1(\rho_S) \\ &= -8512,308 \times 1 \\ &= -8.512,308 \text{ V} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Refleksi v_3 ,

$$\begin{aligned} v_3 &= v_2(\rho_L) \\ &= -8512,308 \times -0,5213 \\ &= 4.437,466 \text{ V} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Terkirim e^1 ,

$$\begin{aligned} e^1 &= v(\rho_L t) \\ &= 16.329,93 \times 0,4787 \\ &= 7817,137 \text{ V} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Terkirim e^2 ,

$$\begin{aligned} e^2 &= v_2(\rho_L t) \\ &= -8512,308 \times 0,4787 \\ &= -4.074,842 \text{ V} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Terkirim e^3 ,

$$\begin{aligned} e^3 &= v_4(\rho_L t) \\ &= 4437,466 \times 0,4787 \\ &= 2.124,215 \text{ V} \end{aligned} \quad (4.29)$$

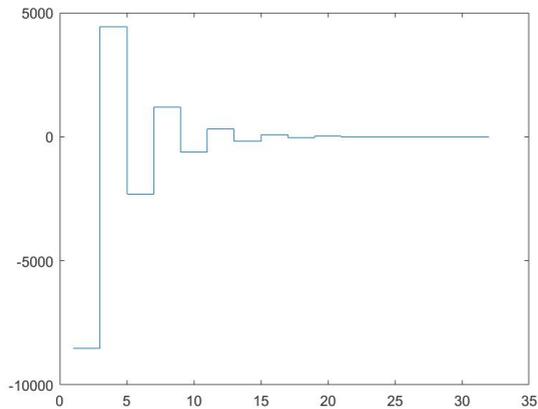
Penghitungan ini akan berlanjut sampai gelombang berjalan bernilai 0 V. Yang selanjutnya akan diselesaikan menggunakan program di perangkat lunak MATLAB dengan menampilkan data pantulan pertama sampai pantulan ketigapuluh.

Tabel 4.8 Hasil Penghitungan Gelombang Berjalan di Saluran dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Delta*

Gelombang Pantul	V	Gelombang Maju	V
v	16.329,93	e^1	7.817,137
v_1	-8.512,6		
v_2	-8.512,6	e^2	-4.074,982
v_3	4.437,5		
v_4	4.437,5	e^3	2.124,231
v_5	-2.313,2		
v_6	-2.313,2	e^4	-1.107,329
v_7	1.205,9		
v_8	1.205,9	e^5	577,264
v_9	628,6		
v_{10}	628,6	e^6	-300,911
v_{11}	327,7		
v_{12}	327,7	e^7	156,87
v_{13}	-170,8		
v_{14}	-170,8	e^8	-81,762
v_{15}	89		
v_{16}	89	e^9	42,604
v_{17}	-46,4		
v_{18}	-46,4	e^{10}	-22,212
v_{19}	24,2		
v_{20}	24,2	e^{11}	11,585
v_{21}	-12,6		
v_{22}	-12,6	e^{12}	-6,032

Tabel 4.8 Hasil Penghitungan Gelombang Berjalan di Saluran dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Delta*

Gelombang Pantul	V	Gelombang Maju	V
v_{23}	6,6		
v_{24}	6,6	e^{13}	3,159
v_{25}	-3,4		
v_{26}	-3,4	e^{14}	-1,628
v_{27}	1,8		
v_{28}	1,8	e^{15}	0,0862
v_{29}	-0,9		
v_{30}	-0,9	e^{16}	-0,04

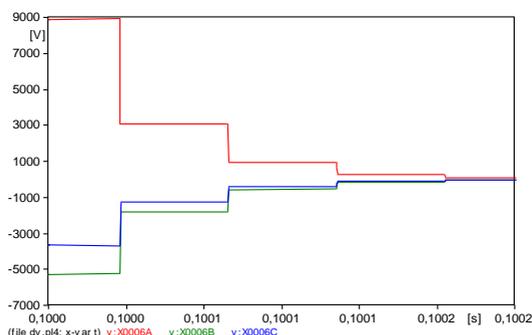


Gambar 4.17 Grafik Penghitungan Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Delta* Menggunakan Perangkat Lunak MATLAB

Pada pemodelan *transient recovery voltage* dengan hubungan belitan trafo daya *Wye-Delta* didapatkan hasil persentase nilai V_{peak} *transient recovery voltage* terhadap V_{peak} nilai gelombang berjalan seperti pada Tabel 4.9. Data yang dihasilkan menyatakan nilai dari V_{peak} *transient recovery voltage* pada fasa R sebesar 305,79 % dari V_{peak} gelombang berjalan pada fasa yang sama. Nilai dari V_{peak} *transient recovery voltage* pada fasa S sebesar 220,25 % dari V_{peak} gelombang berjalan pada fasa yang sama. Nilai dari V_{peak} *transient recovery voltage* pada fasa T sebesar 230,66 % dari V_{peak} gelombang berjalan pada fasa yang sama.

Tabel 4.9 Persentase *Transient Recovery Voltage* terhadap Gelombang Berjalan

Fasa	V_{peak} TRV (V)	V_{peak} Gelombang Berjalan (V)	Persentase TRV terhadap Gelombang berjalan
R	26.801,1	8.764,5	305,79 %
S	-11.634,5	-5.282,2	220,25 %
T	-8.081,53	-3.503,6	230,66 %

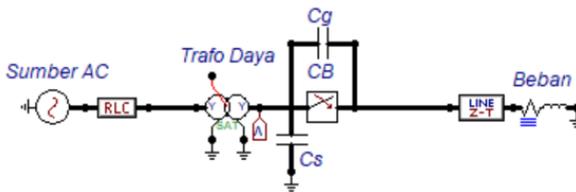


Gambar 4.18 Visualisasi Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya *Delta-Delta*

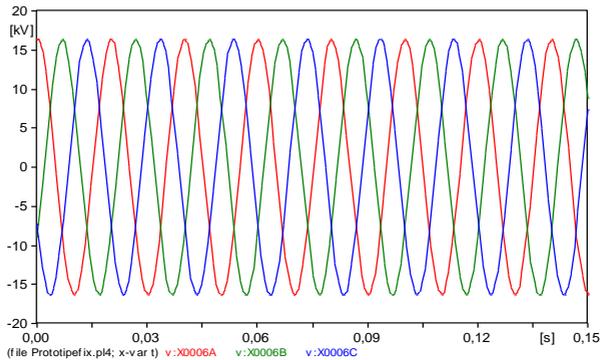
4.2.4 Pemodelan dan Simulasi *Switching Circuit Breaker* 20 kV dengan Hubungan Belitan Trafo Daya Wye-Wye

Pada simulasi *transient recovery voltage* ini, dibuktikan respon tegangan puncak fasa ke tanah ($V_{L-N \text{ peak}}$) pada kondisi normal sebelum terjadinya *switching circuit breaker* seperti yang divisualisasikan oleh Gambar 4.19. Nilai dari tegangan tersebut sudah sesuai dengan hasil yang semestinya berdasarkan penurunan rumus yang ada di bab 3. Kemudian dilakukan simulasi pemodelan sistem saat terjadinya *switching circuit breaker* yang divisualisasikan oleh Gambar 4.20.

4.2.4.1 Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya Wye-Wye pada Kondisi Normal



Gambar 4.19 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya Wye-Wye pada Kondisi Normal



Gambar 4.20 Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya Wye-Wye pada Kondisi Normal

Nilai tegangan *line-neutral* ($V_{L-N \text{ rms}}$) pada sisi sekunder trafo daya adalah:

$$V_{L-N \text{ rms}} = \frac{20.000}{\sqrt{3}} \quad (4.30)$$

$$= 11.547.005 \text{ V}$$

Sehingga nilai tegangan puncak ($V_{L-N \text{ peak}}$) pada sisi sekunder trafo adalah:

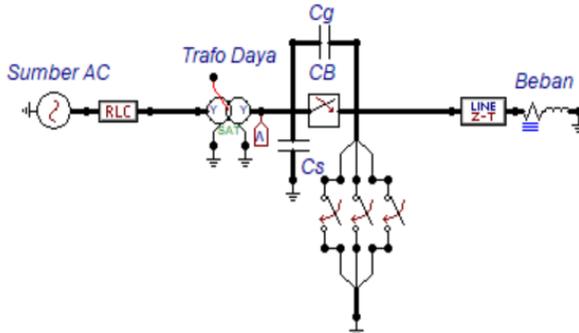
$$V_{L-N \text{ peak}} = V_{L-N \text{ rms}} \times \sqrt{2} \quad (4.31)$$

$$= 11.547.005 \times \sqrt{2}$$

$$= 16.329,93 \text{ V}$$

Tegangan ini adalah tegangan kerja sistem yang selanjutnya digunakan sebagai tegangan input untuk mencari gelombang berjalan.

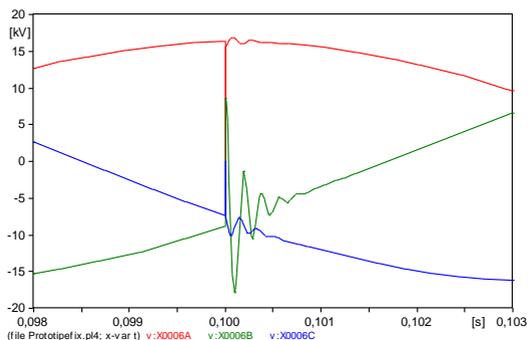
4.2.4.2 Analisis dan Simulasi dengan Hubungan Belitan Trafo Daya Wye-Wye pada *Switching Circuit Breaker*



ambar 4.21 Pemodelan Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya Delta-Delta saat *Switching Circuit Breaker*

Hasil simulasi pada ATPDraw diperoleh nilai tegangan puncak transien fasa R sebesar 16859.3 V, fasa S sebesar -17798.1 V dan fasa T sebesar -10163.6 V. Karena tegangan sistem bernilai 16.329,93 V, maka *transient recovery voltage* yang melebihi tegangan sistem adalah pada fasa R dan T. Dan tegangan transien tertinggi terjadi pada fasa S

yang bernilai -17798.1 V pada detik ke 0.000096 s setelah terjadinya proses *switching circuit breaker*.



Gambar 4.22 Hasil Simulasi Rangkaian dengan Belitan Trafo Daya Wye-Wye saat *Switching Circuit Breaker*

Tabel 4.10 Tegangan puncak *Transient recovery voltage* tegangan 20 kV dengan belitan trafo daya Wye-Wye

Fasa	t (detik)	V_{peak} (V)
R	0.000081	16.859.3
S	0.000096	-17.798.1
T	0.000057	-10.163.6

4.2.4.3 Analisis *Transient Recovery Voltage* dengan Hubungan Belitan Trafo Daya Wye-Wye menggunakan gelombang berjalan

Gelombang berjalan yang terjadi di saluran transmisi adalah akibat dari tegangan $V_{L-N peak}$ yang dipantulkan oleh koefisien pantul ρ_L dan ρ_S . Analisa transien pada gelombang berjalan dalam perhitungan menggunakan diagram lattice, dimana besar impedansi surja z_1 sebesar 254,23 Ω/m (*perhitungan ditunjukkan pada sub bab 4.1*) dan peralatan

trafo dianggap sebagai jepitan terbuka sehingga memiliki nilai $Z_L = Z_2 = \infty$ (tak terhingga) sedangkan impedansi pentanahan (Z_s) = 0, dengan waktu puncak berlangsungnya surja hubung menurut standar IEC adalah 250 μ s (0,25 ms).

$$V_{L-N \text{ peak}} = 16.329,93 \text{ V}$$

Refleksi v_1 ,

$$\begin{aligned} v_1 &= v(\rho_L) & (4.31) \\ &= 16.329,93 \times -0,5213 \\ &= -8.512,308 \text{ V} \end{aligned}$$

Refleksi v_2 ,

$$\begin{aligned} v_2 &= v_1(\rho_S) & (4.32) \\ &= -8512,308 \times (-1) \\ &= 8.512,308 \text{ V} \end{aligned}$$

Refleksi v_3 ,

$$\begin{aligned} v_3 &= v_2(\rho_L) & (4.33) \\ &= 8512,308 \times -0,5213 \\ &= -4.437,466 \text{ V} \end{aligned}$$

Terkirim e^1 ,

$$\begin{aligned} e^1 &= v(\rho_L t) & (4.34) \\ &= 16.329,93 \times 0,4787 \\ &= 7817,137 \text{ V} \end{aligned}$$

Terkirim e^2 ,

$$\begin{aligned} e^2 &= v_2(\rho_L t) & (4.35) \\ &= 8512,308 \times 0,4787 \\ &= 4.074,842 \text{ V} \end{aligned}$$

Terkirim e^3 ,

$$\begin{aligned} e^3 &= v_4(\rho_L t) & (4.36) \\ &= 4437,466 \times 0,4787 \\ &= 2.124,215 \text{ V} \end{aligned}$$

Penghitungan ini akan berlanjut sampai gelombang berjalan bernilai 0 V. Yang selanjutnya akan diselesaikan menggunakan program di perangkat lunak MATLAB dengan menampilkan data pantulan pertama sampai pantulan ketigapuluh.

Pada pemodelan *transient recovery voltage* dengan hubungan belitan trafo daya *Wye-Wye* didapatkan hasil persentase nilai V_{peak} *transient recovery voltage* terhadap V_{peak} nilai gelombang berjalan seperti pada Tabel 4.12. Data yang dihasilkan menyatakan nilai dari

V_{peak} transient recovery voltage pada fasa R sebesar 193,71 % dari V_{peak} gelombang berjalan pada fasa yang sama. Nilai dari V_{peak} transient recovery voltage pada fasa S sebesar 267,74 % dari V_{peak} gelombang berjalan pada fasa yang sama. Nilai dari V_{peak} transient recovery voltage pada fasa T sebesar 434,14 % dari V_{peak} gelombang berjalan pada fasa yang sama.

Tabel 4.11 Hasil Penghitungan Gelombang Berjalan di Saluran dengan Belitan Trafo Daya Wye-Wye

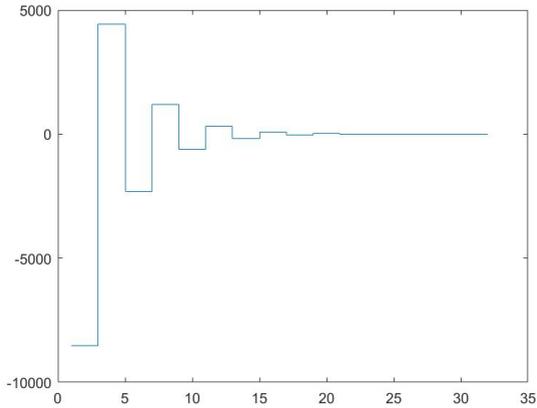
Gelombang Pantul	V	Gelombang Maju	V
v	16.329,93	e^1	7.817,137
v_1	-8.512,6		
v_2	-8.512,6	e^2	-4.074,982
v_3	4.437,5		
v_4	4.437,5	e^3	2.124,231
v_5	-2.313,2		
v_6	-2.313,2	e^4	-1.107,329
v_7	1.205,9		
v_8	1.205,9	e^5	577,264
v_9	-628,6		
v_{10}	-628,6	e^6	-300,911
v_{11}	327,7		
v_{12}	327,7	e^7	156,87
v_{13}	-170,8		
v_{14}	-170,8	e^8	-81,762
v_{15}	89		
v_{16}	89	e^9	42,604

Tabel 4.11 Hasil Penghitungan Gelombang Berjalan di Saluran dengan Belitan Trafo Daya *Wye-Wye*

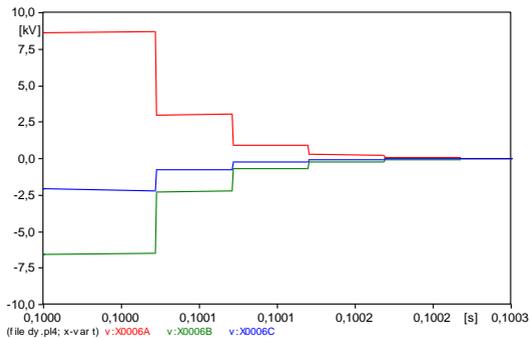
Gelombang Pantul	V	Gelombang Maju	V
v_{17}	-46,4		
v_{18}	-46,4	e^{10}	-22,212
v_{19}	24,2		
v_{20}	24,2	e^{11}	11,585
v_{21}	-12,6		
v_{22}	-12,6	e^{12}	-6,032
v_{23}	6,6		
v_{24}	6,6	e^{13}	3,159
v_{25}	-3,4		
v_{26}	-3,4	e^{14}	-1,628
v_{27}	1,8		
v_{28}	1,8	e^{15}	0,862
v_{29}	-0,9		
v_{30}	-0,9	e^{16}	-0,44

Tabel 4.12 Persentase *Transient Recovery Voltage* Terhadap Gelombang Berjalan

Fasa	V_{peak} TRV	V_{peak} Gelombang Berjalan	Persentase TRV terhadap Gelombang berjalan
R	16.859,3	8.703,3	193,71 %
S	-17.798,1	-6.647,5	267,74 %
T	-10.163,6	-2.341,1	434,14 %



Gambar 4.23 Grafik Penghitungan Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya Wye-Wye Menggunakan Perangkat Lunak MATLAB



Gambar 4.24 Visualisasi Gelombang Berjalan pada Saluran Transmisi Tegangan Menengah dengan Belitan Trafo Daya Wye-Wye

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berikut adalah kesimpulan berdasarkan hasil simulasi dan analisis *transient recovery voltage* menggunakan gelombang berjalan pada *switching circuit breaker* tegangan menengah :

1. Nilai tegangan puncak *transient recovery voltage* pada simulasi dengan empat variasi hubungan belitan trafo daya, yaitu :
 - a. *Delta-Wye* = 48.517,6 V
 - b. *Wye-Delta* = 17.547 V
 - c. *Delta-Delta* = 26.801,1 V
 - d. *Wye-Wye* = 17.798,1 V
2. Nilai tegangan puncak gelombang berjalan pada simulasi dengan empat variasi hubungan belitan trafo daya, yaitu :
 - a. *Delta-Wye* = 18.154,4 V
 - b. *Wye-Delta* = 5.023,7 V
 - c. *Delta-Delta* = 8.764,5 V
 - d. *Wye-Wye* = 8.703,3 V
3. Nilai Tegangan puncak *transient recovery voltage* terjadi tidak pada fasa yang sama, yaitu :
 - a. *Delta-Wye* = Fasa S
 - b. *Wye-Delta* = Fasa R
 - c. *Delta-Delta* = Fasa R
 - d. *Wye-Wye* = Fasa S
4. Besarnya nilai tegangan puncak *transient recovery voltage* lebih dari 267 % nilai tegangan puncak gelombang berjalan pada fasa yang sama
5. Nilai tegangan puncak gelombang berjalan pada tiap-tiap fasa, tidak selalu merepresentasikan nilai tegangan puncak *transient recovery voltage* pada fasa yang sama
6. Nilai tegangan puncak *transient recovery voltage* dan gelombang berjalan pada tiap hubungan belitan trafo daya bernilai variatif karena adanya perbedaan parameter yaitu $V_{L-N\ peak}$ dari tiap hubungan belitan trafo daya.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari studi ini untuk di masa yang akan datang adalah melakukan pengembangan tentang studi ini, yaitu tentang studi atau simulasi terkait dengan besarnya gelombang berjalan pada ujung saluran transmisi untuk menentukan koordinasi proteksi akibat tegangan lebih surja atau melakukan analisis *transient recovery voltage* akibat dari fenomena tegangan lebih surja petir yang menyambar pada saluran transmisi tegangan menengah menggunakan gelombang berjalan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aslimeri., “Teknik Transmisi Tenaga Listrik Jilid 2” Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2008.
- [2] H. Ito, *Switching Equipment*, Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2018.
- [3] K. S. Anugrah, I. Negara and I. Satriyadi, STUDI PENGARUH SISTEM PENTANAHAN TERHADAP FERORESONANSI DI GARDU INDUK TEGANGAN TINGGI, Surabaya: Institut Teknologi Surabaya, 2018.
- [4] B. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi*, Medan: Erlangga, 2012.
- [5] Zoro, Reynaldo, “Proteksi Terhadap Tegangan Lebih Pada Sistem Tenaga Listrik”. Catatan Kuliah, ITB, Indonesia, 2018.
- [6] D. F. Peelo, *Current Interruption Transients Calculation*, Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2014.
- [7] SPLN 1:1995 , “Tegangan Standar”, PT. PLN (PERSERO), 1995.
- [8] Artono Arismunandar., “Teknik Tegangan Tinggi”. Cetakan Ketiga. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 1975.
- [9] Arismunandar A, “Teknik Tenaga Listrik, jilid III Gardu Induk”, Jakarta, Pradnya Paramita, 1979.
- [10] Negara, I Made Yulistya, “Teknik Tegangan Tinggi: Prinsip dan Aplikasi Praktis”, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2013.
- [11] L. V. Bewley, *Traveling Waves on Transmission Systems*. New York: Wiley, 1951.
- [12] O. PLN, *Himpunan Buku Petunjuk Operasi dan Pemeliharaan Peralatan Penyaluran Tenaga Listrik*, Jakarta: Perusahaan Listrik negara, 2014.
- [13] Brajagopal Datta, Saibal Chatterjee, " *Simulation of Bewley's Lattice Diagram Using MATLAB*", IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, 2013.
- [14] Hutauruk, T.S., “Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja”, Jakarta, Erlangga, 1989
- [15] E. Haginomori, T. Koshiduka and J. I. H. Arai, *Power system transient analysis : theory and practice using simulation programs (ATP-EMTP)*, Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2016.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BIOGRAFI PENULIS



Yudistira Wahyu Pratama Putra, lahir di Kabupaten Tuban pada tanggal 25 April 1997. Penulis adalah anak pertama dari dua bersaudara. Jenjang pendidikan formal yang telah penulis tempuh yaitu TK PKK Desa Cendoro Kecamatan Palang Kabupaten Tuban, SDN Perbon 1 Tuban, SMP Negeri 3 Tuban, SMA Negeri 1 Tuban dan Departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Pada masa perkuliahan, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Departemen Teknik Elektro ITS (HIMATEKTRO ITS) sebagai anggota sekaligus Kepala Departemen Lingkar Kampus HIMATEKTRO ITS periode kepengurusan 2017-2018. Penulis juga aktif di organisasi mahasiswa daerah Kabupaten Tuban (RUMAH ROTAN) sebagai anggota sekaligus Kepala Departemen Dalam Negeri RUMAH ROTAN periode kepengurusan 2017-2018. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email yudistira.wahyu11@gmail.com

---Halaman ini sengaja dikosongkan---