



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

STUDI PENGARUH PENAMBAHAN KOMPONEN
INDUKTIF TERHADAP TRANSIENT RECOVERY
VOLTAGE CIRCUIT BREAKER TEGANGAN TINGGI

Bagas Rahmadi
0711154000033

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

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - EE 184801

**STUDI PENGARUH PENAMBAHAN KOMPONEN
INDUKTIF TERHADAP *TRANSIENT RECOVERY*
VOLTAGE CIRCUIT BREAKER TEGANGAN TINGGI**

Bagas Rahmadi
0711154000033

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

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - EE 184801

**STUDY OF ADDITION EFFECT OF INDUCTIVE
COMPONENTS TO *TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE*
ON HIGH VOLTAGE *CIRCUIT BREAKER***

Bagas Rahmadi
0711154000033

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

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul “**STUDI PENGARUH PENAMBAHAN KOMPONEN INDUKTIF TERHADAP *TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE CIRCUIT BREAKER* TEGANGAN TINGGI**” 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, Juli 2019



Bagas Rahmadi
0711154000033

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

**STUDI PENGARUH PENAMBAHAN KOMPONEN
INDUKTIF TERHADAP *TRANSIENT RECOVERY*
VOLTAGE CIRCUIT BREAKER TEGANGAN TINGGI**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
NIP. 197007121998021001

IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.
NIP. 197301232002121001



**SURABAYA
JULI, 2019**

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

STUDI PENGARUH PENAMBAHAN KOMPONEN INDUKTIF TERHADAP *TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE CIRCUIT BREAKER* TEGANGAN TINGGI

Nama mahasiswa : Bagas Rahmadi

Dosen Pembimbing I : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

Dosen Pembimbing II : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.

ABSTRAK

Circuit breaker merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mengurangi resiko kerusakan pada peralatan listrik, sebuah *circuit breaker* harus mampu bekerja optimal saat kondisi normal maupun saat gangguan terjadi. Saat beroperasi, terdapat beberapa fenomena yang muncul, salah satunya adalah *transient recovery voltage*. *Transient recovery voltage* adalah tegangan transien yang terjadi di seluruh terminal pada peralatan *switching* pada *circuit breaker* setelah gangguan arus terjadi. Fenomena *transient recovery voltage* perlu diperhatikan karena berpengaruh terhadap kinerja dari *circuit breaker*. Kemudian seiring dengan kebutuhan beban yang meningkat, kompleksitas dari sistem tenaga listrik juga akan bertambah, penambahan peralatan atau komponen akan mempengaruhi kinerja dan keandalan dari sistem, seperti penambahan komponen yang bersifat induktif akan berdampak pula pada karakteristik transien pada *circuit breaker*. Oleh karena itu perlu di pelajari dan dianalisa mengenai dampak penambahan komponen yang bersifat induktif terhadap fenomena *transient recovery voltage* pada *circuit breaker* tegangan tinggi. Hasil dari tugas akhir ini saat kondisi penambahan komponen induktif pada sisi sumber memiliki rata-rata kenaikan nilai TRV sebesar 0,0175%, rata-rata penurunan nilai RRRV sebesar 0,08% setiap penambahan.

Kata kunci : (*Circuit Breaker, Transient Recovery Voltage, Sistem Transmisi, Komponen Induktif*)

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

STUDY OF ADDITION EFFECT OF INDUCTIVE COMPONENTS TO TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE ON HIGH VOLTAGE CIRCUIT BREAKER

Student Name : Bagas Rahmadi
Supervisor I : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Supervisor II : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.

ABSTRACT

Circuit breaker is an important part of an electrical power system that serves to reduce the risk of damage to electrical equipment, a *circuit breaker* must be able to work optimally during normal conditions and when interference occurs. When operating, there are several phenomena that arise, one of which is *transient recovery voltage*. *Transient recovery voltage* is a transient voltage that occurs in all terminals on the switching equipment on the *circuit breaker* after a fault current occurs. The *transient recovery voltage* phenomenon needs to be considered because it affects the performance of the *circuit breaker*. Then along with the increased load requirements, the complexity of the electric calm system will also increase, the addition of equipment or components will affect the performance and reliability of the system, such as the addition of inductive components will also have an impact on transient characteristics of the *circuit breaker*. Therefore, it needs to be studied and analyzed regarding the impact of adding inductive components to the phenomenon of *transient recovery voltage* on high voltage *circuit breakers*. The results of this thesis when conditions inductive component additions on the source side had an average increase in value of TRV at 0.0175%, the average decline in value by 0.08% RRRV each addition.

Key Word: :(Circuit Breaker, Transient Recovery Voltage, Transmission System, Inductive Component)

---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 “**STUDI PENGARUH PENAMBAHAN KOMPONEN INDUKTIF TERHADAP TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE CIRCUIT BREAKER TEGANGAN TINGGI**”.

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 Tarwiyah, bapak Raharjo 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. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST, MT selaku dekan Fakultas Teknologi Elektro ITS.
5. Bapak Dr. Eng Ardyono Priyadi, ST, M.Eng selaku Kepala Departemen Teknik Elektro ITS.
6. Bapak Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D selaku 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. Anisa Rahmawati sebagai kakak yang selalu memberikan dukungan dan masukan kepada penulis.
9. Teman-teman seperjuangan e55 yang telah berjuang bersama selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.
10. Teman-teman lab B202, Ayik, Petra, Adif yang telah menemani dan memberikan dukungan saat penyusunan tugas akhir ini.

11. Teman-teman kasih ibu tiada tara, Andre, Fauzi, Fachrul, Tanto, Sandro, Wildan, Ekky, Fiya yang 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, Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan.....	2
BAB II <i>CIRCUIT BREAKER, TRANSIENT RECOVERY</i>	
<i>VOLTAGE, DAN CURRENT LIMITING</i>	
<i>REACTOR.....</i>	5
2.1 <i>Circuit breaker</i>	5
2.1.1 Fungsi Bagian Utama <i>Circuit Breaker</i>	6
2.1.2 Klasifikasi <i>Circuit breaker</i> (CB).....	7
2.2 <i>Transient Recovery Voltage (TRV)</i>	11
2.2.1 Gelombang <i>Transien Recovery Voltage</i>	12
2.3 <i>Current Limiting Reactor</i>	16
2.3.1 Penempatan Reaktor.....	16
BAB III PEMODELAN RANGKAIAN <i>TRANSIENT</i>	
<i>RECOVERY VOLTAGE DAN PENAMBAHAN</i>	
<i>KOMPONEN INDUKTIF</i>	19
3.1 Pemodelan Rangkaian <i>Transient Recovery Voltage</i>	19
3.2 Konfigurasi Komponen Induktif	21
3.2.1 Simulasi Rangkaian <i>Transient recovery voltage</i> pada <i>Circuit</i>	
<i>breaker</i> Tegangan Tinggi tanpa Penambahan Komponen Induktif	
.....	21

3.2.2 Simulasi Rangkaian <i>Transient recovery voltage</i> pada <i>Circuit breaker</i> Tegangan Tinggi dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Beban	22
3.2.3 Simulasi Rangkaian <i>Transient recovery voltage</i> pada <i>Circuit breaker</i> Tegangan Tinggi dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Sumber	23
3.2.4 Nilai Parameter Komponen Induktif	23
3.3 Konfigurasi Hubung Singkat atau <i>Short circuit</i>	24
3.3.1 Simulasi Rangkaian <i>Transient recovery voltage</i> pada <i>Circuit breaker</i> Tegangan Tinggi tanpa Penambahan Komponen Induktif Konfigurasi Gangguan <i>Short circuit</i> Tiga Fasa ke Tanah.....	24
3.4 Pengambilan Data dan Pengolahan Data.....	25

BAB IV ANALISIS HASIL SIMULASI STUDI	
PENGARUH PENAMBAHAN KOMPONEN	
INDUKTIF TERHADAP <i>TRANSIENT</i>	
<i>RECOVERY VOLTAGEE CIRCUIT BREAKER</i>	
TEGANGAN TINGGI	27
4.1 Simulasi Rangkaian <i>Transient recovery voltage</i> pada <i>Circuit breaker</i> Tegangan Tinggi saat Kondisi Normal	27
4.1.1 Respon Tegangan Rangkaian <i>Transient recovery voltage</i> pada <i>Circuit breaker</i> Tegangan Tinggi saat Kondisi Normal	27
4.2 Simulasi Rangkaian <i>Transient recovery voltage</i> pada <i>Circuit breaker</i> Tegangan Tinggi Tanpa Penambahan Komponen Induktif	30
4.2.1 Respon Tegangan Rangkaian <i>Transient recovery voltage</i> pada <i>Circuit breaker</i> Tegangan Tinggi Tanpa Penambahan Komponen Induktif	30
4.3 Simulasi Rangkaian <i>Transient recovery voltage</i> pada <i>Circuit breaker</i> Tegangan Tinggi dengan Penambahan Komponen Induktif di Sisi Sumber.....	35
4.3.1 Respon Tegangan Rangkaian <i>Transient recovery voltage</i> pada <i>Circuit breaker</i> Tegangan Tinggi dengan Penambahan Komponen Induktif di Sisi Sumber.....	35

4.4	Simulasi Rangkaian <i>Transient recovery voltage</i> pada <i>Circuit breaker</i> Tegangan Tinggi dengan Penambahan Komponen Induktif di Sisi Beban	41
4.4.1	Respon Tegangan Rangkaian <i>Transient recovery voltage</i> pada <i>Circuit breaker</i> Tegangan Tinggi dengan Penambahan Komponen Induktif 0.1 mH di Sisi Beban	42
4.5	Perbandingan Hasil Respon Tegangan pada Sisi Sumber dan Sisi Beban	48
4.6	Perbandingan Hasil Arus Short Circuit pada Sisi Sumber dan Sisi Beban	52
	BAB V PENUTUP.....	59
5.1	Kesimpulan	59
5.2	Saran	60
	DAFTAR PUSTAKA	61
	BIOGRAFI PENULIS	63

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Oil Circuit Breaker	8
Gambar 2.2 Air Blast Circuit Breaker.....	9
Gambar 2.3 Vacuum Circuit Breaker.....	10
Gambar 2.4 SF6 Circuit Breaker.....	11
Gambar 2.5 Gelombang Arus, Transient Recovery Voltage, dan Recovery Voltage	12
Gambar 2.6 Gelombang Transient Recovery Voltage	13
Gambar 2.7 Arus dan Gelombang TRV Ketika Gangguan pada Arus Resistif.....	14
Gambar 2.8 Arus dan Gelombang TRV Ketika Gangguan pada Arus Induktif.....	14
Gambar 2.9 TRV dan Recovery Voltage pada Rangkaian Resistif, Induktif, dan Kapasitif.....	15
Gambar 2.10 Reaktor Generator	16
Gambar 2.11 Sistem Star Bus	17
Gambar 2.12 Sistem Ring Bus	17
Gambar 2.13 Sistem Straight Bus	18
Gambar 2.14 Reaktor Penyulang	18
Gambar 3.1 Single Line Diagram Sistem Transmisi 150 kV	19
Gambar 3.2 Pemodelan Single Line Diagram Sistem Transmisi 150 kV pada ATP Draw.....	19
Gambar 3.3 Simulasi Rangkaian Transient recovery voltage	20
Gambar 3.4 Rangkaian Simulasi TRV tanpa Komponen Induktif.....	22
Gambar 3.5 Rangkaian Simulasi TRV dengan Komponen Induktif pada Sisi Beban.....	22
Gambar 3.6 Rangkaian Simulasi TRV dengan Komponen Induktif pada Sisi Sumber	23
Gambar 3.7 Rangkaian Kondisi Normal Konfigurasi Short circuit Tiga Fasa ke Tanah.....	25
Gambar 3.8 Flowchart Pemngambilan dan Pengolahan Data	26
Gambar 4.1 Rangkaian Simulasi TRV saat Kondisi Normal	27
Gambar 4.2 Respon Tegangan pada Kondisi Normal (a) Fasa ABC; (b) Fasa A; (c) Fasa B; (d) Fasa C.....	29
Gambar 4.3 Rangkaian Simulasi TRV tanpa Penambahan Komponen Induktif.....	30

Gambar 4.4 Respon Tegangan tiga fasa tanpa Penambahan Komponen Induktif.....	31
Gambar 4.5 (a) Respon Tegangan Fasa A tanpa Penambahan Komponen induktif (b) Close Up Respon Tegangan Fasa A.....	32
Gambar 4.6 (a) Respon Tegangan Fasa B tanpa Penambahan Komponen induktif (b) Close Up Respon Tegangan Fasa B.....	33
Gambar 4.7 (a) Respon Tegangan Fasa C tanpa Penambahan Komponen induktif (b) Close Up Respon Tegangan Fasa C.....	34
Gambar 4.8 Rangkaian Simulasi TRV dengan Penambahan Komponen Induktif.....	35
Gambar 4.9 Respon Tegangan tiga fasa dengan Penambahan Komponen Induktif 0.1 mH.....	36
Gambar 4.10 (a) Respon Tegangan Fasa A dengan Penambahan Komponen Induktif 0.1 mH (b) Close Up Respon Tegangan Fasa A.....	37
Gambar 4.11 (a) Respon Tegangan Fasa B dengan Penambahan Komponen Induktif 0.1 mH (b) Close Up Respon Tegangan Fasa B.....	38
Gambar 4.12 (a) Respon Tegangan Fasa C dengan Penambahan Komponen Induktif 0.1 mH (b) Close Up Respon Tegangan Fasa C.....	39
Gambar 4.13 Rangkaian Simulasi TRV dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Beban.....	42
Gambar 4.14 Respon Tegangan Tiga Fasa dengan Penambahan Komponen Induktif 0,1 mH pada Sisi Beban.....	43
Gambar 4.15 (a) Respon Tegangan Fasa A dengan Penambahan Komponen Induktif 0,1 mH (b) Close Up Respon Tegangan Fasa A.....	44
Gambar 4.16 (a) Respon Tegangan Fasa B dengan Penambahan Komponen Induktif 0,1 mH (b) Close Up Respon Tegangan Fasa B.....	45
Gambar 4.17 (a) Respon Tegangan Fasa C dengan Penambahan Komponen Induktif 0,1 mH (b) Close Up Respon Tegangan Fasa C.....	46
Gambar 4.18 Grafik Perbandingan Nilai Puncak Transient Recovery Voltage (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C.....	49
Gambar 4.19 Grafik Perbandingan Rise Time (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C.....	50

Gambar 4.20 Grafik Perbandingan Rate of Rise of Recovery Voltage (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C.....	51
Gambar 4.21 Perhitungan TRV standar IEEE C37.011-2011.....	52
Gambar 4.22 Perbandingan Perhitungan (a) Versi IEEE (b) Versi Gradien Tiap Titik untuk Penambahan Komponen Induktif Pada Sisi Sumber	54
Gambar 4.23 Perbandingan Perhitungan (a) Versi IEEE (b) Versi Gradien Tiap Titik untuk Penambahan Komponen Induktif Pada Sisi Beban.....	56

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter Rangkaian	20
Tabel 3.2 Parameter transformator daya	21
Tabel 3.3 Parameter Nilai Induktansi.....	24
Tabel 4.1 Nilai Respon Tegangan Fasa A dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Sumber	40
Tabel 4.2 Nilai Respon Tegangan Fasa B dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Sumber	40
Tabel 4.3 Nilai Respon Tegangan Fasa C dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Sumber	41
Tabel 4.4 Nilai Respon Tegangan Fasa A dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Beban	47
Tabel 4.5 Nilai Respon Tegangan Fasa B dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Beban	47
Tabel 4.6 Nilai Respon Tegangan Fasa C dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Beban	48
Tabel 4.7 Nilai RRRV Perhitungan IEEE untuk Penambahan pada Sisi Sumber	53
Tabel 4.8 Nilai RRRV Perhitungan Gradien pada Tiap Titik untuk Penambahan pada Sisi Sumber	53
Tabel 4.9 Nilai RRRV Perhitungan IEEE untuk Penambahan pada Sisi Beban	55
Tabel 4.10 Nilai RRRV Perhitungan Gradien Tiap Titik untuk Penambahan pada Sisi Beban	55
Tabel 4.12 Nilai Arus Short Circuit Kondisi Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Sumber	57
Tabel 4.13 Nilai Arus Short Circuit Kondisi Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Beban	58

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada era sekarang kebutuhan akan energi listrik semakin meningkat dan menjadi salah satu bagian penting dalam aktivitas sehari-hari masyarakat. Maka dari itu pemenuhan kebutuhan energi listrik masyarakat dengan kualitas yang stabil dan kontinyu sangat penting untuk diperhatikan. Untuk mendukung hal tersebut diperlukan infrastruktur yang baik dan peralatan-peralatan listrik penunjang. Perkiraan kebutuhan energi listrik dihitung berdasarkan intensitas dan besarnya penggunaannya. Hubungan antara aktivitas masyarakat dengan penggunaan energi listrik tersebut erat kaitannya dengan banyaknya jumlah penduduk dan tingkat perekonomian dari masyarakat itu sendiri.

Dalam proses penyaluran tenaga listrik terdapat tiga sistem yang saling berhubungan yaitu sistem pembangkitan, sistem transmisi dan sistem distribusi. Sistem tenaga listrik haruslah stabil dan andal agar dapat menyalurkan energi listrik secara efektif. Namun, tidak dapat dihindari bahwa akan terdapat gangguan seperti *short circuit*, petir, yang dapat mengganggu kestabilan pada sistem kelistrikan. Untuk mengantisipasi gangguan tersebut maka terdapat alat-alat pengaman yang diaplikasikan.

Salah satu alat pengaman di aplikasikan pada sistem tenaga listrik adalah *circuit breaker* atau CB. *Circuit breaker* adalah peralatan saklar, 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/gangguan seperti kondisi *short circuit*/hubung singkat. *Circuit breaker* dibedakan menjadi empat kategori menurut tegangan kerjanya, yaitu *circuit breaker* tegangan rendah, menengah, tinggi, extra tinggi.

Pada *circuit breaker* tegangan tinggi dan tegangan extra tinggi, ketika terjadi suatu gangguan akan muncul suatu tegangan yang dinamakan *transient recovery voltage*. *Transient recovery voltage* adalah tegangan transien yang terjadi di seluruh terminal pada perangkat switching pada *circuit breaker* setelah gangguan arus terjadi. *Transient recovery voltage* adalah parameter penentu yang membatasi kemampuan pemutusan dari *circuit breaker*. Jadi maksud dari penelitian ini adalah

untuk melihat respon sistem karena TRV, dan dapat membuat permodelan TRV secara tepat menggunakan software yang ada sekarang.

Dalam studi ini akan dibahas mengenai fenomena *transient recovery voltage* dengan melakukan pemodelan simulasi terhadap *circuit breaker* tegangan tinggi. Masalah dalam studi ini dibatasi pada analisis kemunculan fenomena *transient recovery voltage* yang mungkin terjadi dari kondisi normal yaitu tanpa pemasangan komponen minggu, kemudian pemasangan komponen induktif pada sisi sumber, dan pemasangan komponen induktif pada sisi beban. Dengan nilai induktansi yang diubah setiap pengujiannya dari nilai 0,1 mH- 1 mH dan diberlakukan proses hubung singkat tiga fasa sebagai gangguan. Metode analisis yang dilakukan pada studi ini yaitu dengan membandingkan hasil plot tegangan saat kondisi normal dengan pemasangan komponen induktif pada sisi sumber dan sisi beban dari simulasi rangkaian *transient recovery voltage* tersebut.

Tujuan yang ingin dicapai studi ini adalah untuk mendapatkan pengaruh yang dihasilkan dari penambahan komponen induktif dengan perbedaan kondisi pemasangan berdasarkan plot hasil tegangan yang diperoleh, sehingga dapat diketahui respon yang diberikan oleh sistem terhadap penambahan komponen induktif.

Metode yang digunakan dalam studi ini, yang pertama adalah melakukan studi literatur serta pengumpulan data mengenai *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 sebagai rujukan untuk menarik kesimpulan studi ini.

1.2 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*, *transient recovery voltage*, dan sistem kelistrikan tegangan tinggi Bab 3

pemodelan simulasi rangkaian *transient recovery voltage* saat diberlakukan gangguan sesaat berupa *short circuit*, 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.

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

CIRCUIT BREAKER, TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE, DAN CURRENT LIMITING REACTOR

2.1 *Circuit breaker*

Circuit breaker adalah peralatan saklar, 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/gangguan seperti kondisi *short circuit*/hubung singkat [1].

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 [2].

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 [3].

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

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 ms (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 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 [4]

2.1.2 Klasifikasi *Circuit breaker* (CB)

Klasifikasi *circuit breaker* (CB) dapat dibagi atas beberapa jenis, antara lain berdasarkan tegangan rating/nominal, jumlah mekanik penggerak, proses pemadaman busur api.

Menurut tegangan rating/nominal *circuit breaker* dibedakan menjadi empat kategori, yaitu :

1. CB tegangan rendah (Low Voltage)
Dengan range tegangan 0.1 s/d 1 kV (SPLN 1.1995 - 3.3)
2. CB tegangan tinggi (High Voltage)
Dengan range tegangan 35 s/d 245 kV (SPLN 1.1995 - 3.5)

3. CB tegangan extra tinggi (Extra High Voltage)
Dengan range tegangan lebih besar dari 245 kV (SPLN 1.1995–3.6)

Berdasarkan jumlah mekanik penggeraknya (*tripping coil*) *circuit breaker* dibedakan menjadi :

1. CB Single Pole

CB tipe ini mempunyai mekanik penggerak pada masing-masing pole, umumnya CB jenis ini dipasang pada bay penghantar agar CB bisa reclose satu fasa.

2. CB Three Pole

CB jenis ini mempunyai satu mekanik penggerak untuk tiga fasa, guna menghubungkan fasa satu dengan fasa lainnya dilengkapi dengan kopel mekanik, umumnya CB jenis ini dipasang pada bay trafo dan bay kopel serta CB 20 kV untuk distribusi[6].

Yang terakhir yaitu CB menurut pemadaman busur api. Dibedakan menjadi empat macam, yaitu :

1. Oil *Circuit breaker*

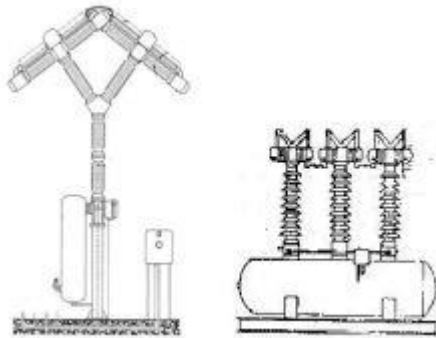


Gambar 2.1 Oil Circuit Breaker

Oil Circuit Breaker yang ditunjukkan Gambar 2.1 dapat digunakan untuk memutus arus sampai 10 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 500 kV. Prinsip kerjanya adalah kontak dipisahkan, busur api akan terjadi didalam minyak, sehingga minyak menguap dan menimbulkan gelembung gas yang menyelubungi busur api, karena panas yang ditimbulkan busur api, minyak mengalami dekomposisi dan menghasilkan gas hydrogen yang bersifat menghambat produksi pasangan ion.

Oleh karena itu, pemadaman busur api tergantung pada pemanjangan dan pendinginan busur api dan juga tergantung pada jenis gas hasil dekomposisi minyak. Gas yang timbul karena dekomposisi minyak menimbulkan tekanan terhadap minyak, sehingga minyak terdorong ke bawah melalui leher bilik. Di leher bilik, minyak ini melakukan kontak yang intim dengan busur api. Hal ini akan menimbulkan pendinginan busur api, mendorong proses rekombinasi dan menjauhkan partikel bermuatan dari lintasan busur api. Minyak yang berada diantara kontak sangat efektif memutuskan arus. Kelemahannya adalah minyak mudah terbakar dan kekentalan minyak memperlambat pemisahan kontak, sehingga tidak cocok untuk sistem yang membutuhkan pemutusan arus yang cepat.

2. Air Blast *Circuit breaker*



Gambar 2.2 Air Blast Circuit Breaker

Circuit breaker jenis ini dapat digunakan untuk memutuskan arus sampai 40 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 765 kV. Air Blast *Circuit breaker* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 dirancang untuk mengatasi kelemahan pada Oil *Circuit breaker*, yaitu dengan membuat media isolator kontak dari bahan yang tidak mudah terbakar dan tidak menghalangi pemisahan kontak, sehingga pemisahan kontak dapat dilaksanakan dalam waktu yang sangat cepat. Saat busur api timbul, udara tekanan tinggi dihembuskan ke busur api dipadamkan oleh hembusan udara tekanan tinggi itu dan juga menyingkirkan partikel-partikel bermuatan dari sela kontak,

udara ini juga berfungsi untuk mencegah restriking (tegangan pukul ulang). Kontak pemutus ditempatkan didalam isolator, dan juga

3. *Vacuum Circuit Breaker*

Ruang hampa udara pada CB jenis ini mempunyai kekuatan dielektrik (dielektrik strength) yang tinggi dan sebagai media pemadam busur api yang baik. Prinsip kerjanya berbeda dengan dasar prinsip lain karena tidak terdapat gas yang dapat berionisasi bilamana kontak - kontak terbuka, ketika kontak pemutus dibuka dalam ruang hampa maka akan timbul percikan busur api, elektron dan ion saat pelepasan walaupun hanya sesaat maka dengan cepat diredam karena percikan busur api, elektron dan ion yang dihasilkan pada saat pemutusan akan segera mengembun pada ruangan hampa.



Gambar 2.3 Vacuum Circuit Breaker

Vacuum circuit breaker seperti pada Gambar 2.3 memiliki kemampuan yang terbatas yaitu hanya hingga 72,5 kV.

4. *SF6 Circuit Breaker*

Media gas yang digunakan pada tipe ini adalah gas SF₆ (Sulphur hexafluoride). Sifat gas SF₆ murni adalah tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun dan tidak mudah terbakar. Pada suhu diatas 150° C, gas SF₆ mempunyai sifat tidak merusak metal, plastic dan bermacam bahan yang umumnya digunakan dalam pemutus tenaga tegangan tinggi. Sebagai isolasi listrik, gas SF₆ mempunyai kekuatan dielektrik yang tinggi (2,35 kali udara) dan kekuatan dielektrik ini bertambah dengan

pertambahan tekanan. Sifat lain dari gas SF₆ ialah mampu mengembalikan kekuatan dielektrik dengan cepat, tidak terjadi karbon selama terjadi busur api dan tidak menimbulkan bunyi pada saat pemutus tenaga menutup atau membuka.

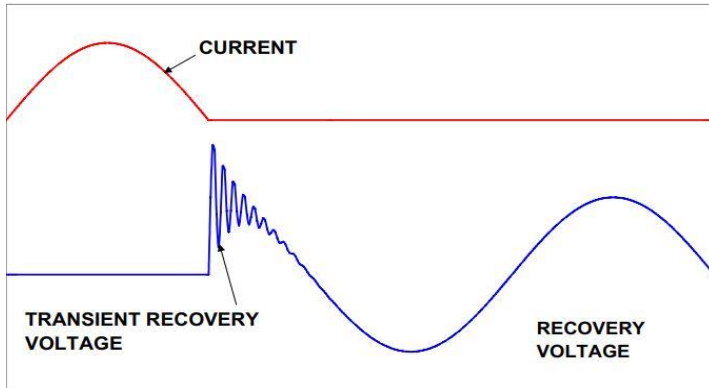


Gambar 2.4 SF₆ Circuit Breaker

SF₆ *Circuit breaker* yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 dapat digunakan untuk memutus arus sampai 40 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 765 kV.

2.2 Transient Recovery Voltage (TRV)

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 [5]. 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 pada Gambar 2.5

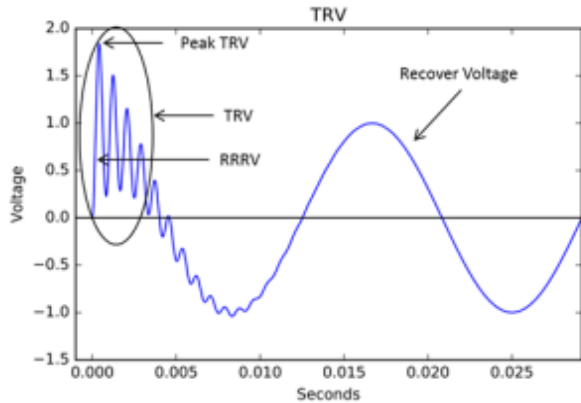


Gambar 2.5 Gelombang Arus, Transient Recovery Voltage, dan Recovery Voltage

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.

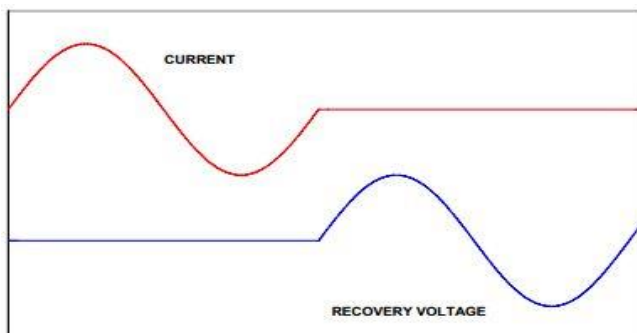
2.2.1 Gelombang *Transient Recovery Voltage*

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 Gambar 2.6. *Rate of Rise Recovery Voltage (RRRV)* didefinisikan sebagai puncak dari *Transient Recovery Voltage* dibagi dengan total waktu dari tegangan nol menuju tegangan puncak.



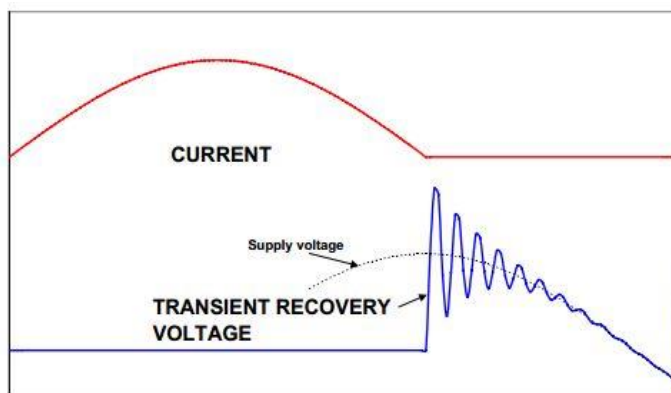
Gambar 2.6 Gelombang *Transient Recovery Voltage*

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 2.7.



Gambar 2.7 Arus dan Gelombang TRV Ketika Gangguan pada Arus Resistif

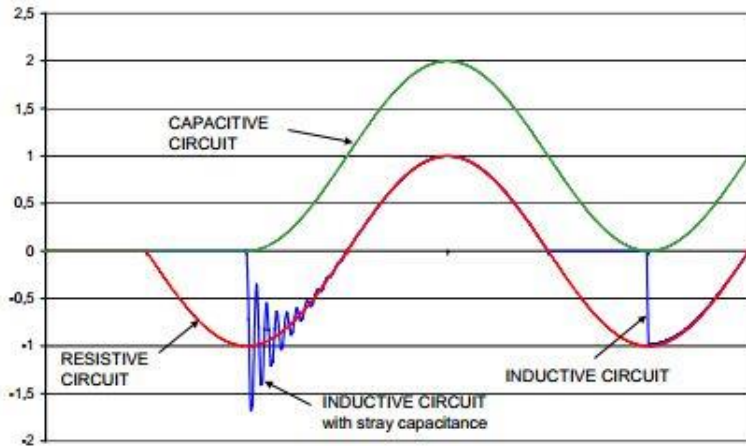
Pada gangguan rangkaian resistif murni, tegangan sumber bernilai nol saat gangguan terjadi, maka dari itu recovery voltage-nya tidak memiliki transien (lihat pada Gambar 2.8).



Gambar 2.8 Arus dan Gelombang TRV Ketika Gangguan pada Arus Induktif

Kebanyakan rangkaian *switching* arus beban aktif dapat disimulasikan dengan kombinasi komponen resistif dan induktif. *Recovery voltage* adalah gabungan dari yang ditunjukkan pada gambar 4 untuk rangkaian resistif dan induktif. Awalnya memiliki transien frekuensi tinggi, karena penurunan tegangan dalam reaktansi transformator, 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 kapasitif.



Gambar 2.9 TRV dan *Recovery Voltage* pada Rangkaian Resistif, Induktif, dan Kapasitif

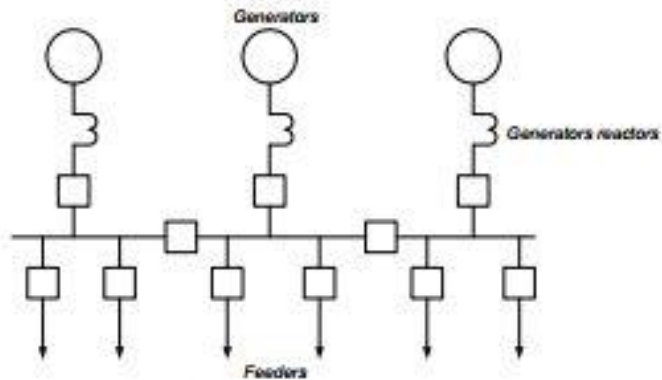
2.3 Current Limiting Reactor

Current limiting reactor digunakan untuk mengurangi arus yang dapat mengalir ketika terjadi hubung singkat, dengan tujuan untuk menurunkan tingkat stress pada konduktor, pemutus tenaga, dan peralatan lain yang dialiri arus gangguan. Hal ini memungkinkan untuk dapat menggunakan pemutus tenaga dengan kapasitas pemutusan yang rendah [6].

2.3.1 Penempatan Reaktor

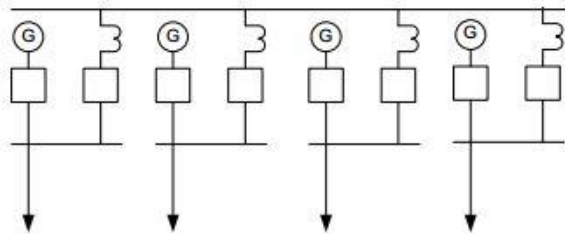
Berdasarkan penempatannya di dalam sistem, reaktor dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu: reaktor pembatas arus generator, reaktor pembatas arus busbar dan reaktor pembatas arus feeder [7].

- a. Reaktor pembatas arus generator, biasanya digunakan pada generator yang memiliki nilai reaktansi dan terhubung langsung dengan busbar. Hal ini bertujuan untuk memproteksi busbar dari arus gangguan yang mengalir dari generator. Pemasangan reaktor pembatas arus generator dapat dilihat pada Gambar 2.10.

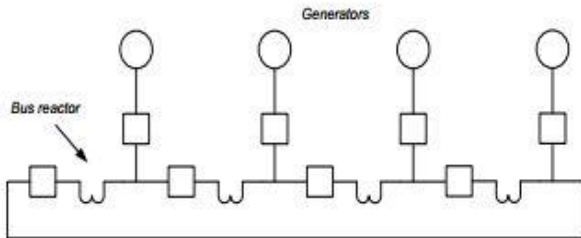


Gambar 2.10 Reaktor Generator

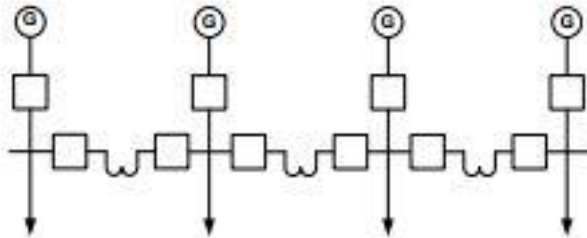
- b. Reaktor pembatas arus busbar digunakan apabila beberapa feeder dan sumber tenaga yang penting terkonsentrasi hanya pada satu bus, sehingga perlu untuk memisahkan bus agar gangguan tidak akan mengakibatkan pemadaman yang luas pada sistem tenaga. Ada tiga cara penempatan reaktor pembatas arus busbar yang banyak digunakan, yaitu sistem star bus pada Gambar 2.11, sistem ring bus pada Gambar 2.12, dan sistem straight bus yang terlihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.11 Sistem Star Bus

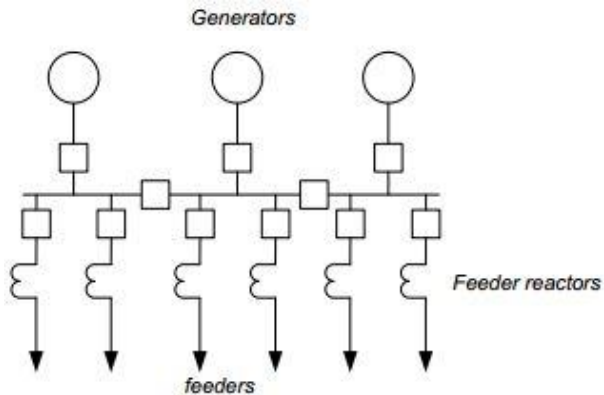


Gambar 2.12 Sistem Ring Bus



Gambar 2.13 Sistem Straight Bus

- c. Reaktor pembatas arus feeder (penyulang) yang ditempatkan pada outgoing feeder bertujuan untuk membatasi besarnya arus hubung singkat yang terjadi. Hal ini memungkinkan untuk menggunakan PMT dengan kapasitas pemutusan yang rendah. Reaktor dapat dihubungkan secara seri dengan penyulang-penyulang seperti ditunjukkan pada gambar 2.14



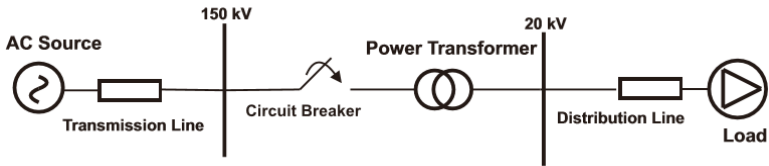
Gambar 2.14 Reaktor Penyulang

BAB III

PEMODELAN RANGKAIAN *TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE* DAN PENAMBAHAN KOMPONEN INDUKTIF

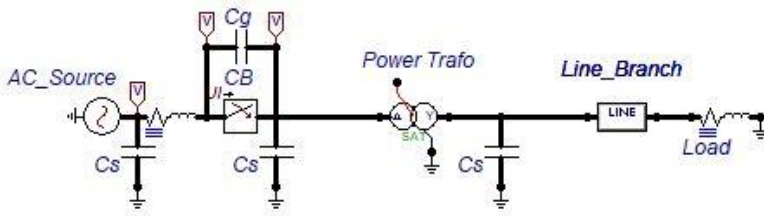
3.1 Pemodelan Rangkaian *Transient Recovery Voltage*

Pada studi ini transient recover voltage terjadi pada *circuit breaker* tegangan tinggi sehingga dilakukan simulasi pemodelan rangkaian *transient recovery voltage* pada *circuit breaker* tegangan tinggi seperti pada Gambar 3.1

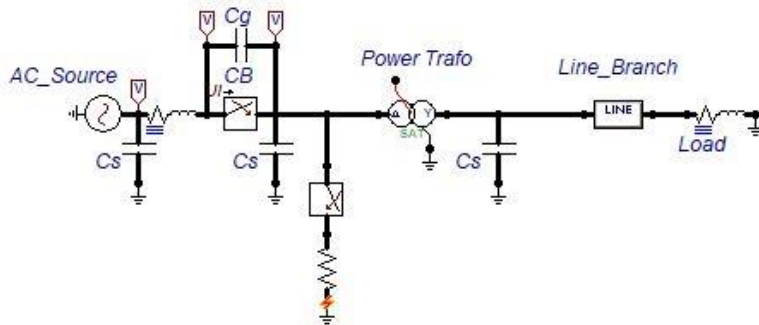


Gambar 3.1 Single Line Diagram Sistem Transmisi 150 kV

Dari single line diagram yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 maka dibuat pemodelan rangkaian pada perangkat lunak ATP Draw. Pemodelan rangkaian dari single line diagram dapat dilihat pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Pemodelan Single Line Diagram Sistem Transmisi 150 kV pada ATP Draw



Gambar 3.3 Simulasi Rangkaian *Transient recovery voltage*

Berdasarkan pemodelan rangkaian dari single line diagram dapat dibuat pemodelan rangkaian *transient recovery voltage* seperti pada Gambar 3.3 meliputi pemodelan rangkaian dengan *trigger* berupa *switching* yang dihubungkan dengan tanah sebagai pemodelan *short circuit*. Pemodelan rangkaian ini terdiri dari komponen-komponen utama seperti sumber tegangan 150 kV, resistor, kapasitor, induktor nonlinier, *circuit breaker*, transformator 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 melihat efek dari penambahan komponen induktif pada sistem terhadap *transient recovery voltage* yang muncul pada *circuit breaker*. Komponen induktif dipasang secara seri pada sistem yang merupakan pemodelan dari reactor pembatas arus. Parameter yang diubah – ubah pada rangkaian adalah nilai induktansi dari komponen induktif tersebut.

Tabel 3.1 Parameter Rangkaian

Parameter	Nilai	Satuan
Sumber Tegangan	150	kV
Frekuensi	50	Hz
<i>Grading Capacitance (Cg)</i>	0.05	μF
<i>Shunt Capacitance (Cs)</i>	0.2	μF
<i>Circuit breaker</i>	0.1	s
<i>Switching Short circuit</i>	0.05	s

Kemudian pada rangkaian simulasi ini juga terdapat pemodelan transformator daya. Transformator daya yang digunakan berupa transformator penurun tegangan (Step-Down) tiga fasa dengan rating tegangan sebesar 150 kV / 20 kV. Parameter transformator yang digunakan pada studi ini diambil dari referensi yang ditunjukkan pada table 3.2.

Tabel 3.2 Parameter transformator daya

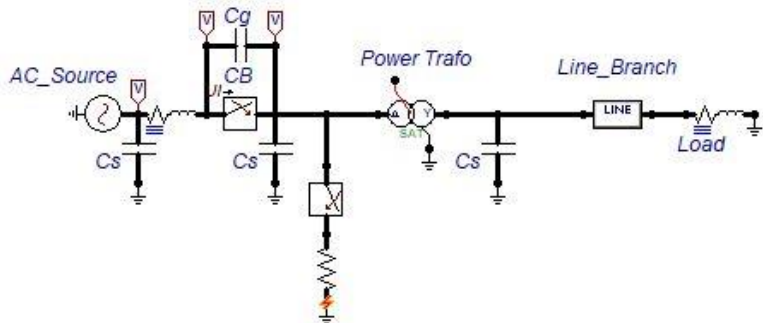
Parameter	Nilai	Satuan
Resistansi Primer	220	Ω
Induktansi Primer	1,745	mH
R magnetisasi	6500000	Ω
Resistansi Sekunder	5	Ω
Induktansi Sekunder	0,039	mH

3.2 Konfigurasi Komponen Induktif

Transient recovery voltage adalah tegangan transient yang muncul sesaat setelah gangguan terjadi pada *circuit breaker*, dan *circuit breaker* harus mampu untuk menanggung arus gangguan dan tegangan transien yang muncul dalam sistem. Pada studi ini, akan diteliti pengaruh dari penambahan komponen induktif pada *circuit breaker* tegangan tinggi terhadap *transient recovery voltage* yang dihasilkan. Konfigurasi nilai induktansi dimulai dari keadaan normal atau tanpa penambahan komponen induktif, kemudian ditambahkan komponen induktif secara seri terhadap sistem pada sisi sumber dan sisi beban dengan nilai induktansi yang meningkat.

3.2.1 Simulasi Rangkaian *Transient Recovery Voltage* pada *Circuit Breaker* Tegangan Tinggi tanpa Penambahan Komponen Induktif

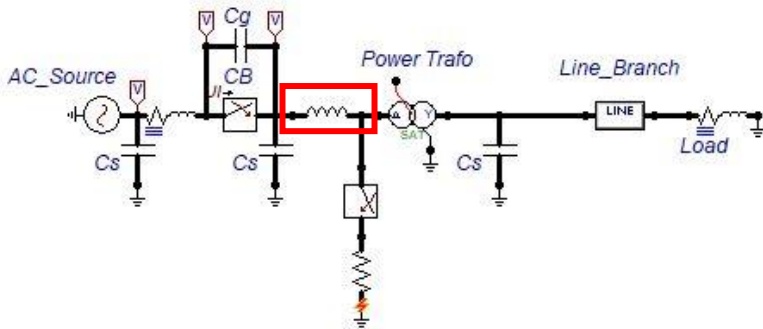
Pada simulasi ini rangkaian dalam kondisi normal dimana tidak ada penambahan komponen induktif. Rangkaian simulasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Rangkaian Simulasi TRV tanpa Komponen Induktif

3.2.2 Simulasi Rangkaian *Transient Recovery Voltage* pada *Circuit Breaker* Tegangan Tinggi dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Beban

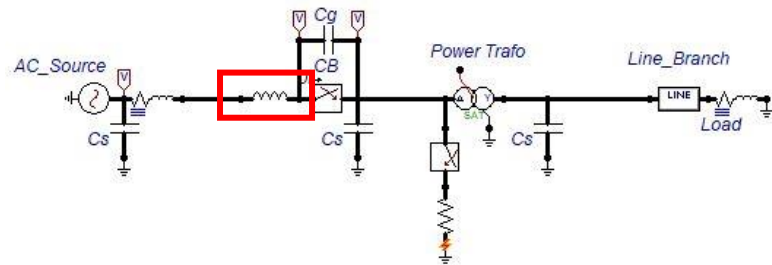
Pada simulasi ini rangkaian dalam kondisi sudah terdapat penambahan komponen induktif secara seri terhadap rangkaian. Hal tersebut ini dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Rangkaian Simulasi TRV dengan Komponen Induktif pada Sisi Beban

3.2.3 Simulasi Rangkaian *Transient Recovery Voltage* pada *Circuit Breaker* Tegangan Tinggi dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Sumber

Pada simulasi ini rangkaian dalam kondisi sudah terdapat penambahan komponen induktif secara seri terhadap rangkaian. Hal tersebut ini dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Rangkaian Simulasi TRV dengan Komponen Induktif pada Sisi Sumber

3.2.4 Nilai Parameter Komponen Induktif

Pada simulasi ini komponen induktif yang ditambahkan akan memiliki nilai yang berbeda pada setiap pengujiannya. Parameter tersebut akan diterapkan pada kedua konfigurasi. Dan nilai- nilai induktansi tersebut ditunjukkan pada table 3.3.

Tabel 3.3 Parameter Nilai Induktansi

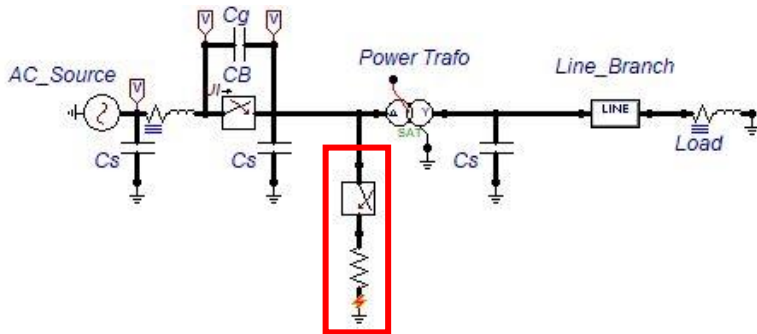
Parameter	Nilai	Satuan
L1	0.1	mH
L2	0.2	
L3	0.3	
L4	0.4	
L5	0.5	
L6	0.6	
L7	0.7	
L8	0.8	
L9	0.9	
L10	1	

3.3 Konfigurasi Hubung Singkat atau *Short circuit*

Hubung singkat (*Short circuit*) adalah arus lebih yang diakibatkan oleh gangguan impedansi yang sangat kecil mendekati nol antara dua penghantar aktif yang dalam kondisi operasi normal berbeda potensialnya. *Short circuit* yang digunakan pada simulasi *transient recovery voltage* adalah *short circuit* tiga fasa. Jenis tersebut akan diterapkan pada simulasi rangkaian tanpa komponen induktif dan rangkaian dengan komponen induktif.

3.3.1 Simulasi Rangkaian *Transient Recovery Voltage* pada *Circuit Breaker* Tegangan Tinggi tanpa Penambahan Komponen Induktif Konfigurasi Gangguan *Short Circuit* Tiga Fasa ke Tanah

Pada simulasi ini rangkaian dalam kondisi normal dengan konfigurasi gangguan *short circuit* tiga fasa ke tanah. Rangkaian simulasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 Rangkaian Kondisi Normal Konfigurasi *Short circuit* Tiga Fasa ke Tanah

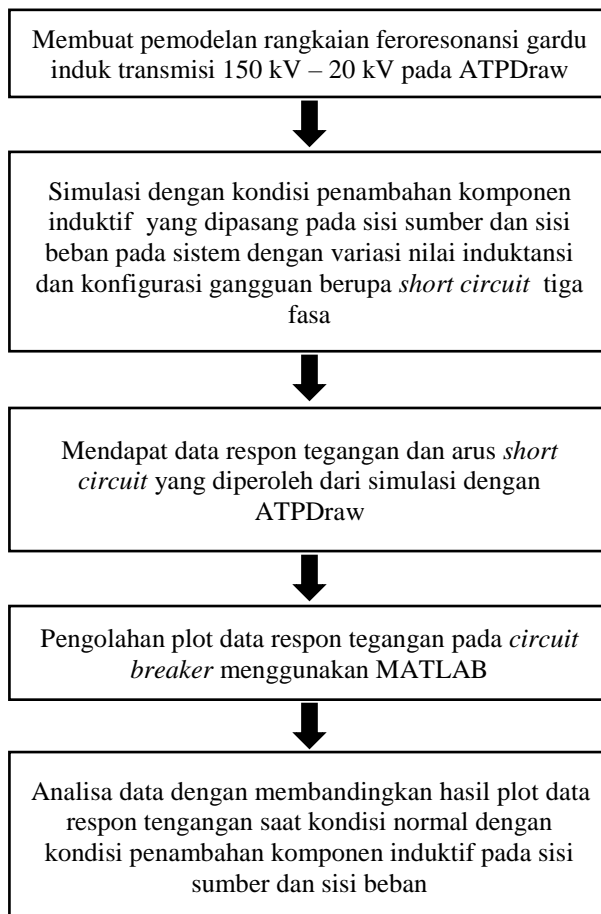
3.4 Pengambilan Data dan Pengolahan Data

Pada studi ini, pemodelan rangkaian *transient recovery voltage* disimulasikan pada perangkat lunak ATPDraw. Rangkaian simulasi ini dijalankan dalam waktu 0,3 detik dengan waktu variabel step 0,1 μ detik. Gangguan yang diberikan terhadap sistem yaitu berupa operasi hubung singkat (*short circuit*) berupa *switching* yang dihubungkan dengan tanah dengan resistansi 0.01 Ω dan waktu operasi pada detik ke 0,05 detik dengan menggunakan kondisi *short circuit* tiga fasa ke tanah. Kemudian untuk pengoperasian *circuit breaker*, akan trip pada 0.05 detik setelah gangguan *short circuit* terjadi.

Pemodelan rangkaian simulasi *transient recovery voltage* yang diteliti yaitu menggunakan kondisi sistem tanpa penambahan komponen induktif dan dengan penambahan komponen induktif pada sisi beban dan sisi sumber dengan nilai induktansi yang meningkat pada tiap pengujiannya, nilai-nilai tersebut yaitu 0,1mH, 0,2 mH, 0,3mH, 0,4 mH, 0,6 mH, 0,7 mH, 0,8 mH, 0,9 mH, 1 mH. Dengan membuat pemodelan rangkaian simulasi *transient recovery voltage* tersebut, maka didapatkan data setelah menjalankan simulasi untuk ketiga kondisi yaitu saat kondisi normal, kondisi penambahan komponen induktif pada sisi sumber, kondisi penambahan komponen induktif pada sisi beban dengan konfigurasi *short circuit* tiga fasa ke tanah.

Data yang diambil adalah berupa nilai dan respon gelombang tegangan pada *circuit breaker* untuk setiap kondisi pengujian beserta arus *short circuit*nya. Dari data yang telah diperoleh dilakukan analisis dengan

membandingkan nilai dan respon gelombang tegangan dari masing – masing kondisi penambahan komponen induktif sistem terhadap *Transient recovery voltage* yang muncul akibat gangguan *short circuit* yang diberikan. Langkah-langkah yang telah dijelaskan diatas dapat dibuat menjadi diagram alur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8.



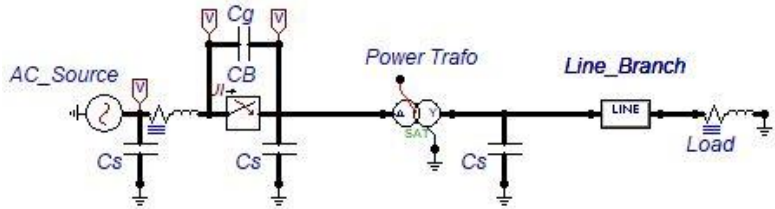
Gambar 3.8 Floawchart Pemngambilan dan Pengolahan Data

BAB IV

ANALISIS HASIL SIMULASI STUDI PENGARUH PENAMBAHAN KOMPONEN INDUKTIF TERHADAP *TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE* *CIRCUIT BREAKER* TEGANGAN TINGGI

4.1 Simulasi Rangkaian *Transient Recovery Voltage* pada *Circuit breaker* Tegangan Tinggi saat Kondisi Normal

Pada simulasi rangkaian *transient recovery voltage* yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 didapatkan respon tegangan saat kondisi normal. Pada pengujian kondisi normal ini dilakukan tanpa dikenakan gangguan *short circuit* sehingga tidak terjadi fenomena *transient recovery voltage*. Simulasi ini berlangsung selama 0,3 detik dengan sumber sebesar 150 kV dengan hasil respon tegangan menampilkan keadaan stabil dengan perbedaan sudut fasa 120° pada tiap fasanya.



Gambar 4.1 Rangkaian Simulasi TRV saat Kondisi Normal

4.1.1 Respon Tegangan Rangkaian *Transient Recovery Voltage* pada *Circuit Breaker* Tegangan Tinggi saat Kondisi Normal

Nilai tegangan *line-line* (V_{L-Lrms}) antar fasa adalah :

$$V_{L-Lrms} = 150000 \text{ V}$$

Nilai tegangan *line-neutral* (V_{L-Nrms}) pada tiap fasa adalah :

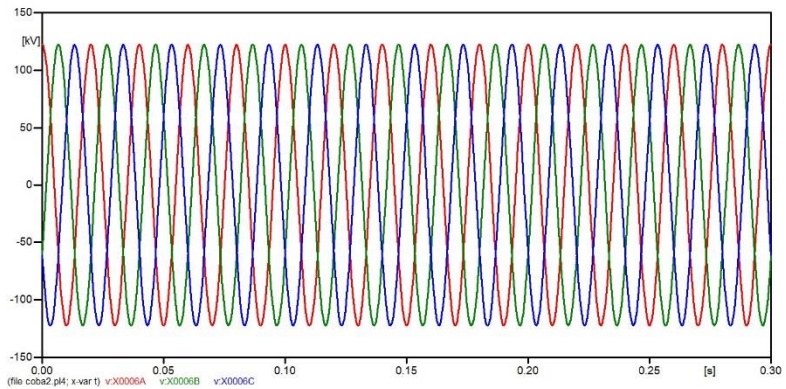
$$V_{L-Nrms} = \frac{V_{L-Lrms}}{\sqrt{3}} \tag{4.1}$$

$$V_{L-Nrms} = \frac{150000 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 86602,5 \text{ V}$$

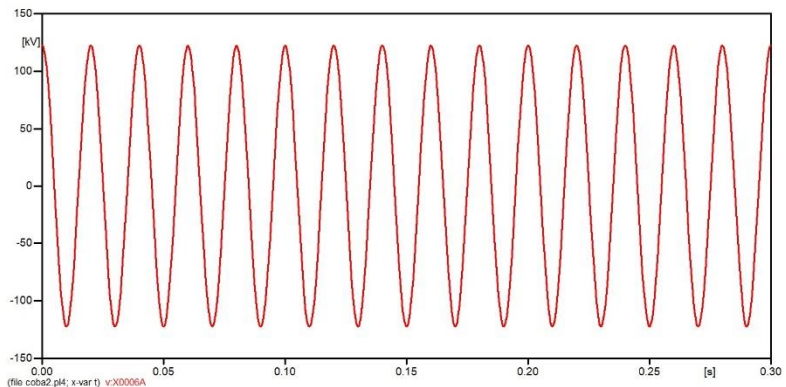
Tegangan puncak *line-netral* ($V_{\text{peak}_{L-\text{netral}}}$) pada tiap fasa adalah :

$$V_{L-\text{Npeak}} = V_{L-\text{Nrms}} \times \sqrt{2} \quad (4.2)$$
$$V_{L-\text{Npeak}} = 86602,5 \times \sqrt{2} = 122474,5 \text{ V}$$

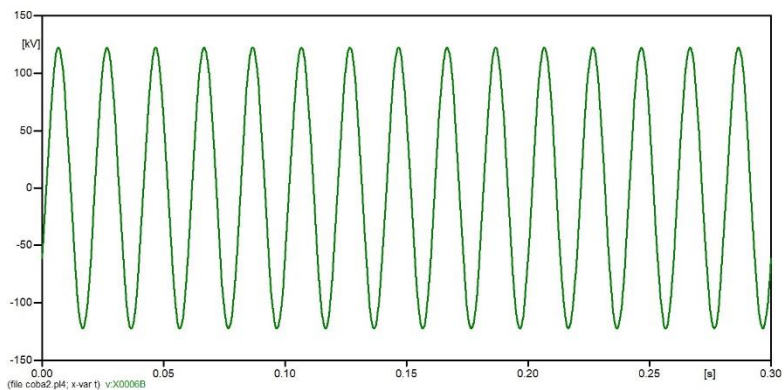
Gambar 4.2 merupakan respon tegangan dari hasil simulasi pada saat kondisi normal tanpa ada gangguan *short circuit*. Tegangan puncak hasil simulasi sesuai dengan hasil perhitungan diatas.



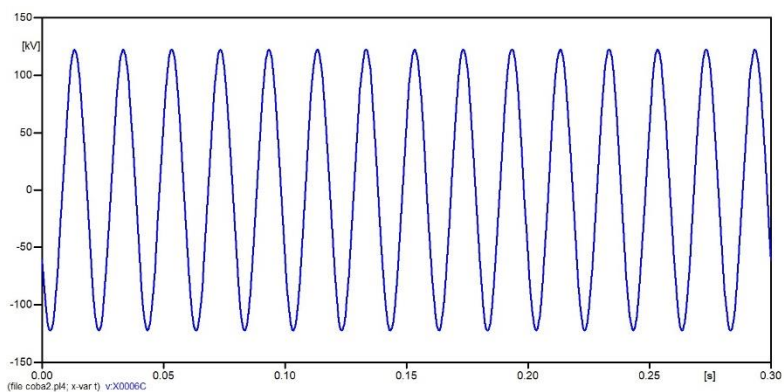
(a)



(b)



(c)

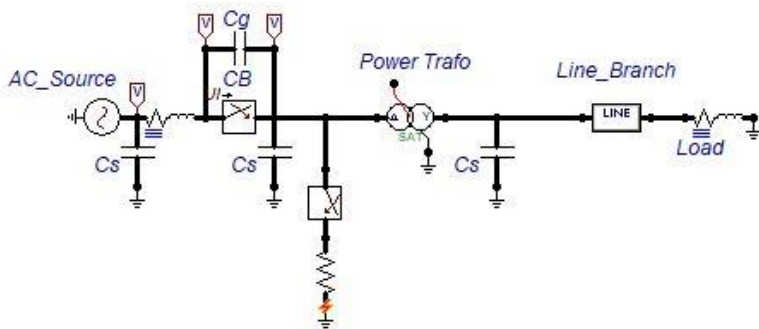


(d)

Gambar 4.2 Respon Tegangan pada Kondisi Normal (a) Fasa ABC; (b) Fasa A; (c) Fasa B; (d) Fasa C

4.2 Simulasi Rangkaian *Transient Recovery Voltage* pada *Circuit Breaker* Tegangan Tinggi Tanpa Penambahan Komponen Induktif

Pada simulasi rangkaian *transient recovery voltage* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 dilakukan pada kondisi dimana diberikan gangguan *short circuit* tiga fasa ketanah tanpa adanya penambahan komponen induktif dan didapatkan hasil respon tegangan akibat kondisi tersebut. Simulasi berlangsung selama 0,3 detik dengan trigger *short circuit* pada detik ke 0,05 detik. Pengoperasian pada *circuit breaker* dilakukan pada detik ke 0.1 detik.



Gambar 4.3 Rangkaian Simulasi TRV tanpa Penambahan Komponen Induktif

4.2.1 Respon Tegangan Rangkaian *Transient Recovery Voltage* pada *Circuit Breaker* Tegangan Tinggi Tanpa Penambahan Komponen Induktif

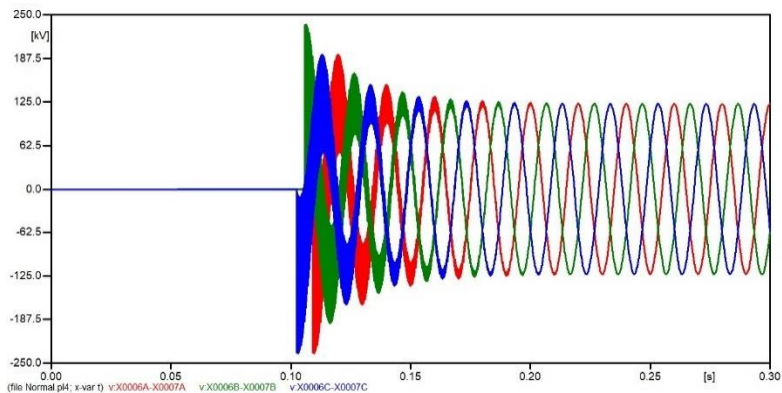
Berdasarkan rangkaian yang disimulasikan pada Gambar 4.3 didapatkan plot hasil respon tegangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 dimana menunjukkan respon tegangan pada *circuit breaker* ketika terjadi trip pada *circuit breaker* yang diakibatkan oleh shor circuit tiga fasa. Terlihat pada ketiga fasa, fasa A,B, dan C bentuk gelombang mengalami transien. Dimana gelombang transien ini menunjukkan terjadinya fenomena *transient recovery voltage*.

Gambar 4.5 menunjukkan gelombang *transient recovery voltage* pada fasa A yang memiliki nilai puncak gelombang *transient recovery voltage* (TRV) sebesar 235.47 kV, dan nilai rate of rise of recovery

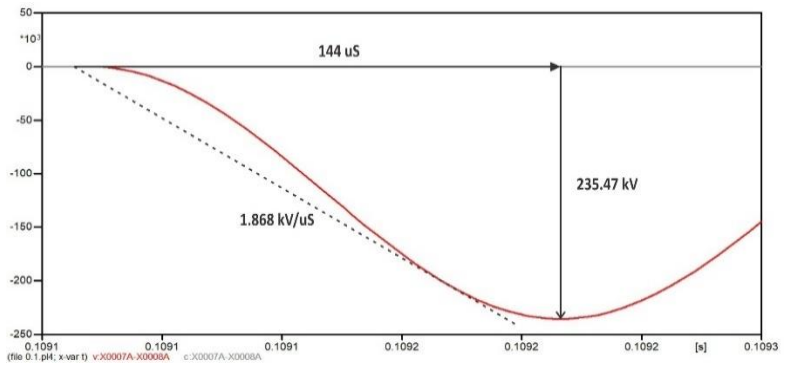
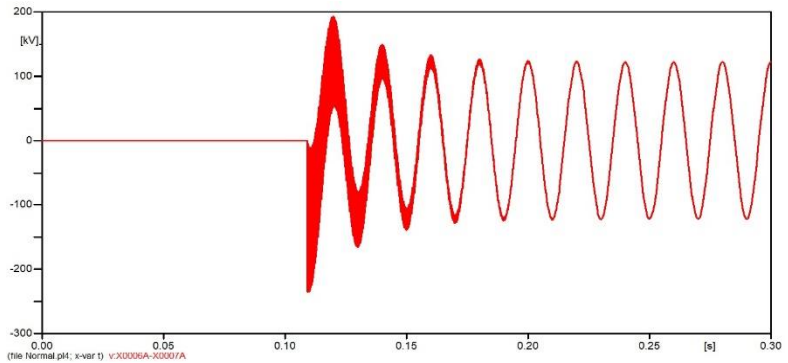
voltage (RRRV) sebesar 1.868 kV/uS. Kemudian nilai dari rise time adalah 144 uS.

Gambar 4.6 menunjukkan gelombang *transient recovery voltage* pada fasa B yang memiliki nilai puncak gelombang *transient recovery voltage* (TRV) sebesar 235.73 kV, dan nilai (RRRV) sebesar 1.841 kV/uS. Kemudian nilai dari rise time adalah 145 uS.

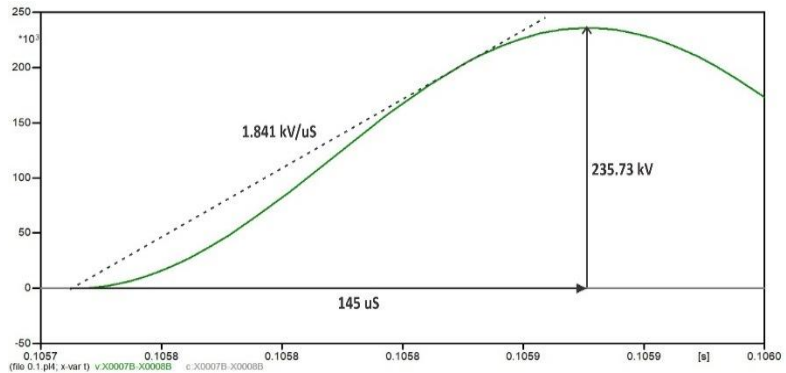
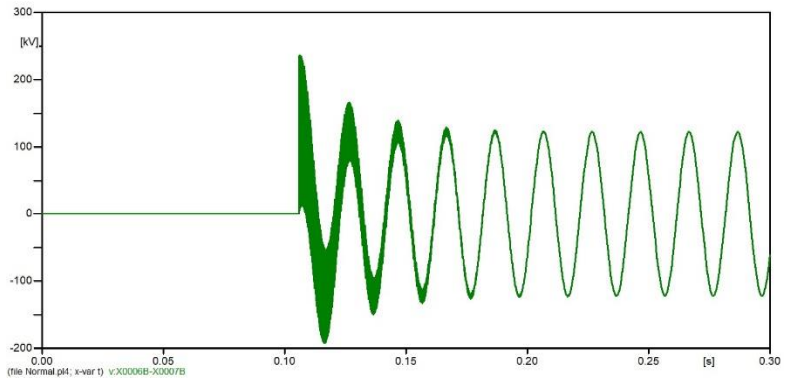
Gambar 4.7 menunjukkan gelombang *transient recovery voltage* pada fasa C yang memiliki nilai puncak gelombang *transient recovery voltage* (TRV) sebesar 235.73 kV, dan nilai (RRRV) sebesar 1.870 kV/uS. Kemudian nilai dari rise time adalah 143 uS.



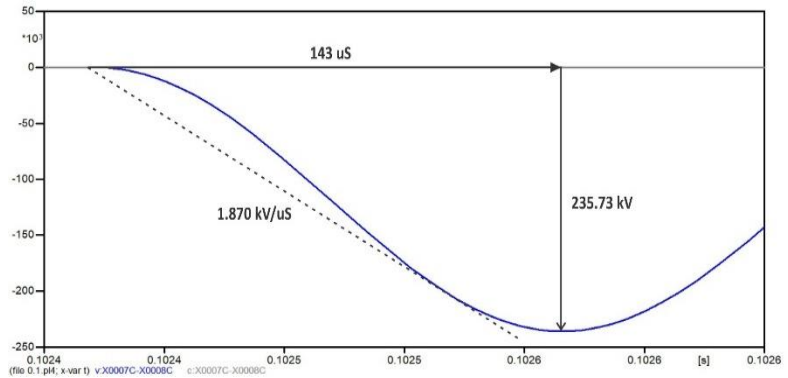
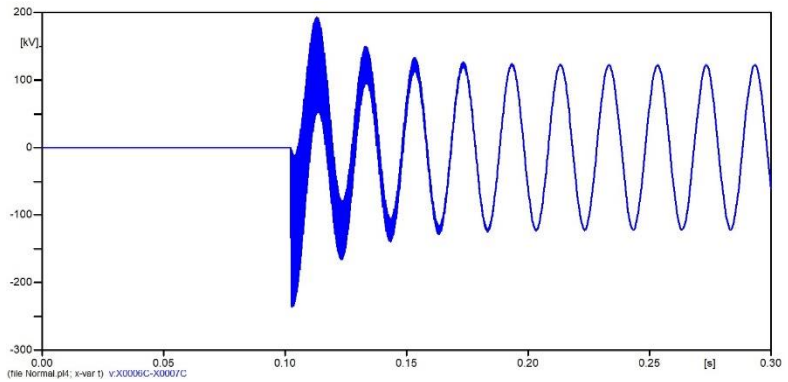
Gambar 4.4 Respon Tegangan tiga fasa tanpa Penambahan Komponen Induktif



Gambar 4.5 (a) Respon Tegangan Fasa A tanpa Penambahan Komponen induktif (b) Close Up Respon Tegangan Fasa A



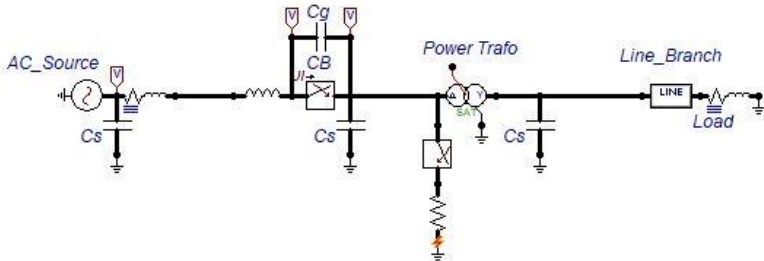
Gambar 4.6 (a) Respon Tegangan Fasa B tanpa Penambahan Komponen induktif (b) Close Up Respon Tegangan Fasa B



Gambar 4.7 (a) Respon Tegangan Fasa C tanpa Penambahan Komponen induktif (b) Close Up Respon Tegangan Fasa C

4.3 Simulasi Rangkaian *Transient Recovery Voltage* pada *Circuit Breaker* Tegangan Tinggi dengan Penambahan Komponen Induktif di Sisi Sumber

Pada simulasi rangkaian *transient recovery voltage* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 dilakukan pada kondisi dimana diberikan gangguan *short circuit* tiga fasa ketanah dengan adanya penambahan komponen induktif pada sisi sumber dengan nilai 0,1 mH- 1 mH. Kemudian didapatkan hasil respon tegangan akibat kondisi tersebut. Simulasi berlangsung selama 0,3 detik dengan trigger *short circuit* pada detik ke 0,05 detik. Pengoperasian pada *circuit breaker* dilakukan pada detik ke 0.1 detik.



Gambar 4.8 Rangkaian Simulasi TRV dengan Penambahan Komponen Induktif

4.3.1 Respon Tegangan Rangkaian *Transient Recovery Voltage* pada *Circuit Breaker* Tegangan Tinggi dengan Penambahan Komponen Induktif di Sisi Sumber

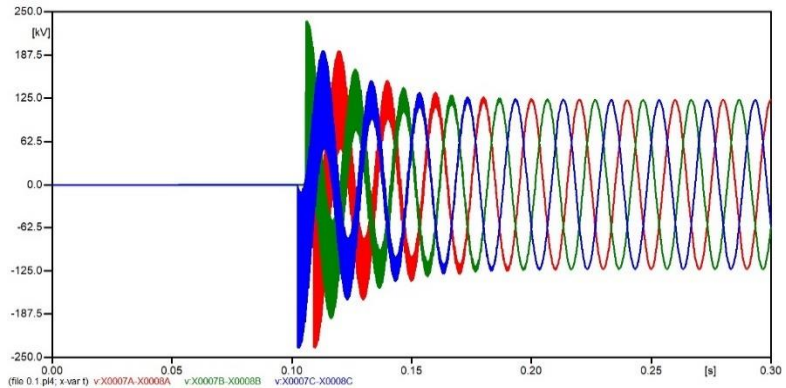
Berdasarkan rangkaian yang disimulasikan pada Gambar 4.8 didapatkan plot hasil respon tegangan seperti yang ditunjukkan Gambar 4.9 dimana menunjukkan respon tegangan pada *circuit breaker* ketika terjadi trip yang diakibatkan oleh shor circuit tiga fasa dengan penambahan komponen induktif sebesar 0.1 mH. Terlihat pada fasa A,B, dan C memiliki bentuk gelombang yang mengalami kondisi transien. Dimana gelombang transien ini menunjukkan terjadinya fenomena *transient recovery voltage*.

Gambar 4.10 menunjukkan respon tegangan pada CB ketika terdapat penambahan komponen induktif bernilai 0,1 mH. Gelombang pada fasa A memiliki nilai puncak gelombang *transient recovery voltage* (TRV) sebesar 235.52 kV, nilai rate of rise of recovery voltage (RRRV)

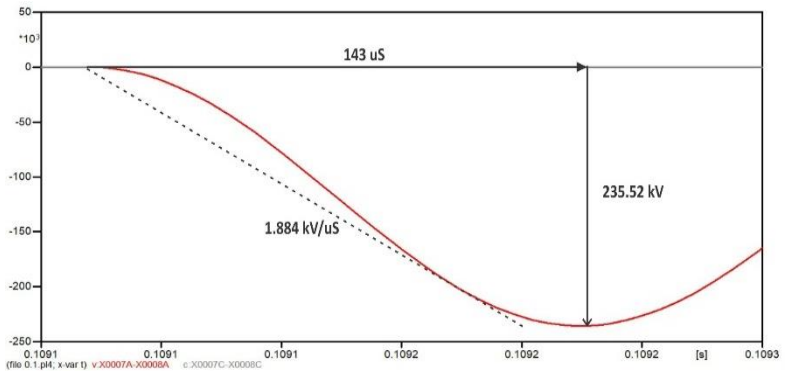
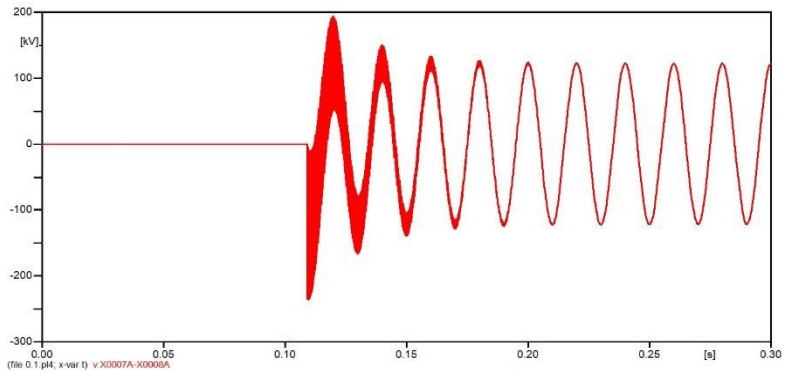
sebesar 1.884 kV/us, dan nilai dari rise time adalah 143 us. Kemudian memiliki nilai arus *short circuit* sebesar 9642.6 ampere.

Gambar 4.11 menunjukkan respon tegangan pada CB ketika terdapat penambahan komponen induktif bernilai 0,1 mH. Gelombang pada fasa B memiliki nilai puncak gelombang *transient recovery voltage* (TRV) sebesar 235.78 kV, nilai rate of rise of recovery voltage (RRRV) sebesar 1.901 kV/us, dan nilai dari rise time adalah 142 us. Kemudian memiliki nilai arus *short circuit* sebesar 12215 ampere.

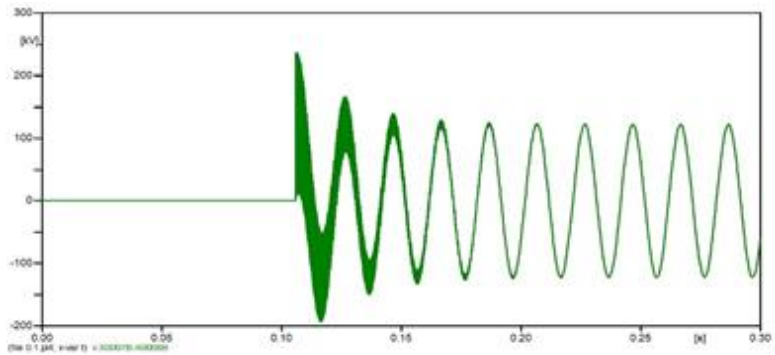
Gambar 4.12 menunjukkan respon tegangan pada CB ketika terdapat penambahan komponen induktif bernilai 0,1 mH. Gelombang pada fasa C memiliki nilai puncak gelombang *transient recovery voltage* (TRV) sebesar 235.78 kV, dan nilai rate of rise of recovery voltage (RRRV) sebesar 1.886 kV/us, dan nilai dari rise time adalah 144 us. Kemudian memiliki nilai arus *short circuit* sebesar 12227 ampere.



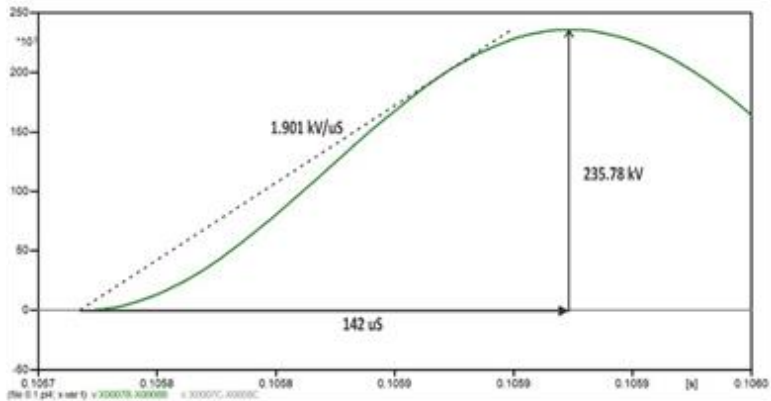
Gambar 4.9 Respon Tegangan tiga fasa dengan Penambahan Komponen Induktif 0.1 mH



Gambar 4.10 (a) Respon Tegangan Fasa A dengan Penambahan Komponen Induktif 0.1 mH (b) Close Up Respon Tegangan Fasa A

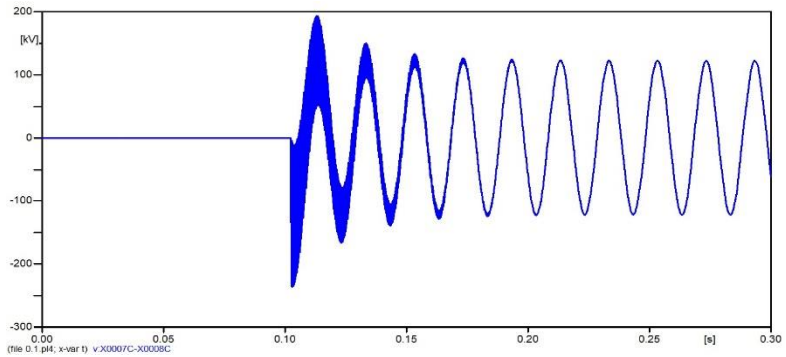


(a)

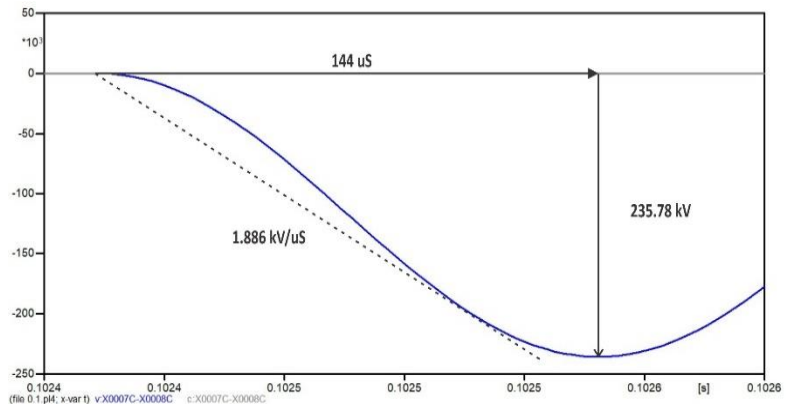


(b)

Gambar 4.11 (a) Respon Tegangan Fasa B dengan Penambahan Komponen Induktif 0.1 mH (b) Close Up Respon Tegangan Fasa B



(a)



(b)

Gambar 4.12 (a) Respon Tegangan Fasa C dengan Penambahan Komponen Induktif 0.1 mH (b) Close Up Respon Tegangan Fasa C

Dengan cara pengambilan data yang sama dilakukan untuk simulasi nilai induktif 0,2 mH – 1 mH didapatkan hasil sebagai berikut seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 untuk fasa A, Tabel 4.2 untuk fasa B, dan Tabel 4.3 untuk fasa C

Tabel 4.1 Nilai Respon Tegangan Fasa A dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Sumber

Nilai induktansi (mH)	Nilai Puncak TRV (kV)	Rise Time (us)	Nilai RRRV (kV/us)
0	235,47	144	1,8688
0,1	235,52	143	1,8841
0,2	235,57	142	1,8997
0,3	235,61	143	1,8699
0,4	235,65	145	1,8702
0,5	235,7	143	1,8856
0,6	235,75	146	1,8562
0,7	235,79	144	1,8566
0,8	235,83	143	1,8569
0,9	235,88	145	1,8573
1	235,92	144	1,8873

Tabel 4.2 Nilai Respon Tegangan Fasa B dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Sumber

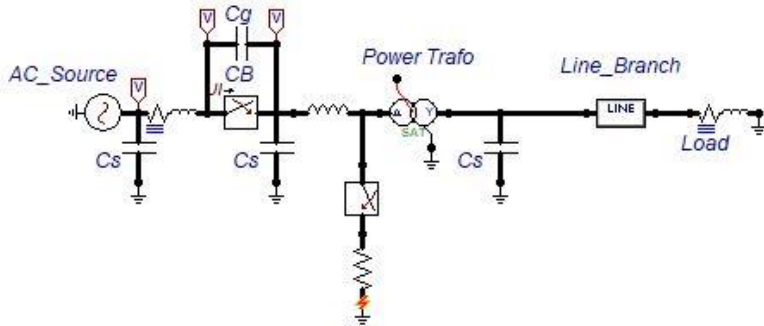
Nilai induktansi (mH)	Nilai Puncak TRV (kV)	Rise Time (us)	Nilai RRRV (kV/us)
0	235,73	145	1,8416
0,1	235,78	142	1,9014
0,2	235,83	143	1,8866
0,3	235,88	144	1,8870
0,4	235,93	146	1,8432
0,5	235,98	144	1,8878
0,6	236,02	144	1,8731
0,7	236,07	145	1,8442
0,8	236,12	145	1,8592
0,9	236,16	146	1,845
1	236,21	145	1,8599

Tabel 4.3 Nilai Respon Tegangan Fasa C dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Sumber

Nilai induktansi (mH)	Nilai Puncak TRV (kV)	Rise Time (us)	Nilai RRRV (kV/us)
0	235,73	143	1,8708
0,1	235,78	144	1,8862
0,2	235,83	142	1,9018
0,3	235,88	143	1,8720
0,4	235,93	144	1,8724
0,5	235,98	145	1,8728
0,6	236,02	143	1,8881
0,7	236,07	145	1,8442
0,8	236,12	145	1,8739
0,9	236,16	146	1,8742
1	236,21	147	1,8310

4.4 Simulasi Rangkaian *Transient Recovery voltage* pada *Circuit Breaker* Tegangan Tinggi dengan Penambahan Komponen Induktif di Sisi Beban

Pada simulasi rangkaian *transient recovery voltage* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13 dilakukan pada kondisi dimana diberikan gangguan *short circuit* tiga fasa ketanah dengan adanya penambahan komponen induktif pada sisi sumber dengan nilai 0,1 mH- 1 mH. Kemudian didapatkan hasil respon tegangan akibat kondisi tersebut. Simulasi berlangsung selama 0,3 detik dengan trigger *short circuit* pada detik ke 0,05 detik. Pengoperasian pada *circuit breaker* dilakukan pada detik ke 0.1 detik.



Gambar 4.13 Rangkaian Simulasi TRV dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Beban

4.4.1 Respon Tegangan Rangkaian *Transient Recovery Voltage* pada *Circuit Breaker* Tegangan Tinggi dengan Penambahan Komponen Induktif 0.1 mH di Sisi Beban

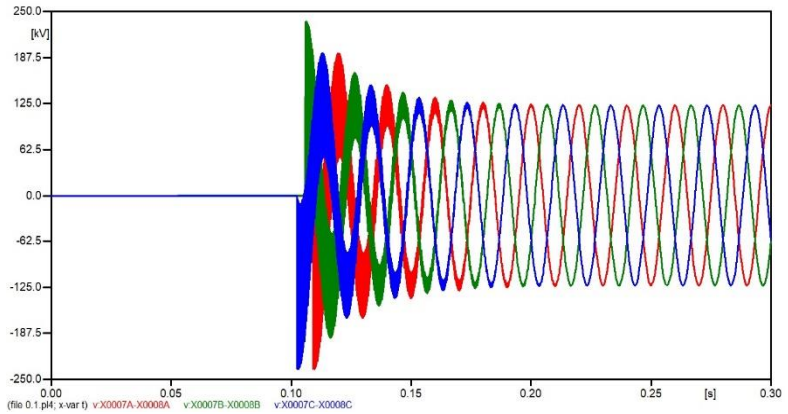
Berdasarkan rangkaian yang disimulasikan pada Gambar 4.13 didapatkan plot hasil respon tegangan seperti yang ditunjukkan Gambar 4.14 dimana menunjukkan respon tegangan pada *circuit breaker* ketika terjadi trip yang diakibatkan oleh shor circuit tiga fasa dengan penambahan komponen induktif sebesar 0.1 mH. Terlihat pada fasa A,B, dan C memiliki bentuk gelombang yang mengalami kondisi transien. Dimana gelombang transien ini menunjukkan terjadinya fenomena *transient recovery voltage*.

Gambar 4.15 menunjukkan respon tegangan pada CB ketika terdapat penambahan komponen induktif bernilai 0,1 mH. Gelombang pada fasa A memiliki nilai puncak gelombang *transient recovery voltage* (TRV) sebesar 235.62 kV, nilai rate of rise of recovery voltage (RRRV) sebesar 1.884 kV/us, dan nilai dari rise time adalah 144 us.

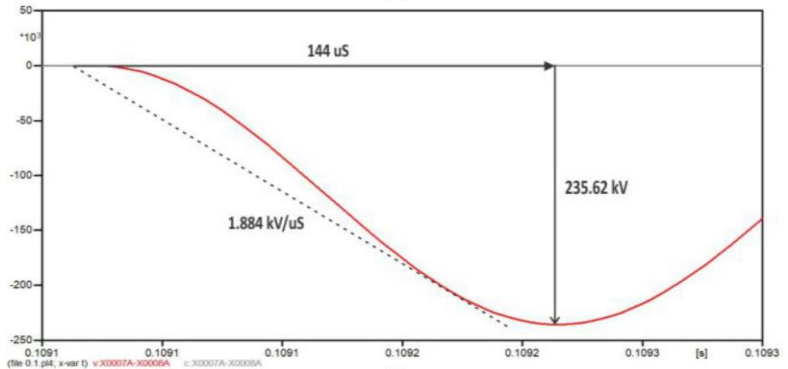
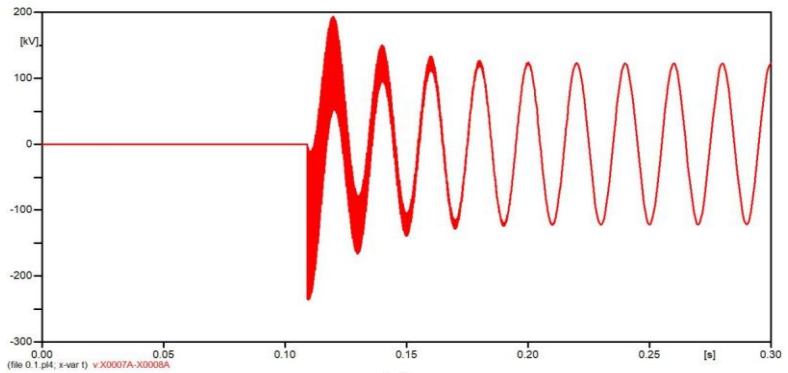
Gambar 4.16 menunjukkan respon tegangan pada CB ketika terdapat penambahan komponen induktif bernilai 0,1 mH. Gelombang pada fasa A memiliki nilai puncak gelombang *transient recovery voltage* (TRV) sebesar 235.8 kV, nilai rate of rise of recovery voltage (RRRV) sebesar 1.917 kV/us, dan nilai dari rise time adalah 141 us.

Gambar 4.17 menunjukkan respon tegangan pada CB ketika terdapat penambahan komponen induktif bernilai 0,1 mH. Gelombang pada fasa A memiliki nilai puncak gelombang *transient recovery voltage*

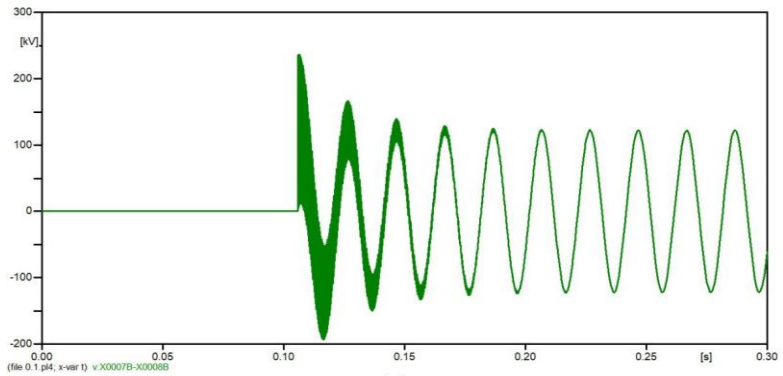
(TRV) sebesar 235.71 kV, nilai rate of rise of recovery voltage (RRRV) sebesar 1.855 kV/us, dan nilai dari rise time adalah 148 us.



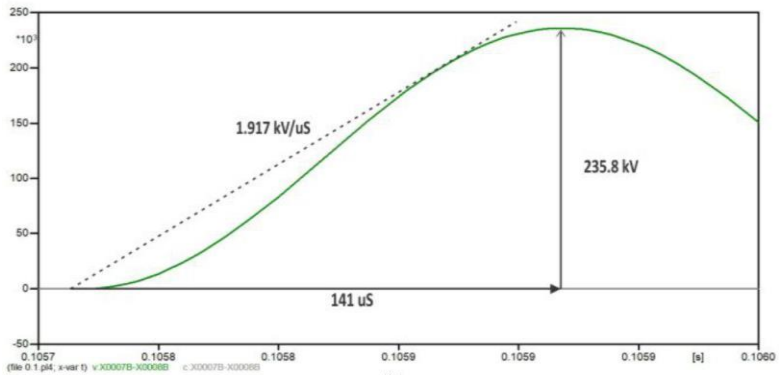
Gambar 4.14 Respon Tegangan Tiga Fasa dengan Penambahan Komponen Induktif 0,1 mH pada Sisi Beban



Gambar 4.15 (a) Respon Tegangan Fasa A dengan Penambahan Komponen Induktif 0,1 mH (b) Close Up Respon Tegangan Fasa A

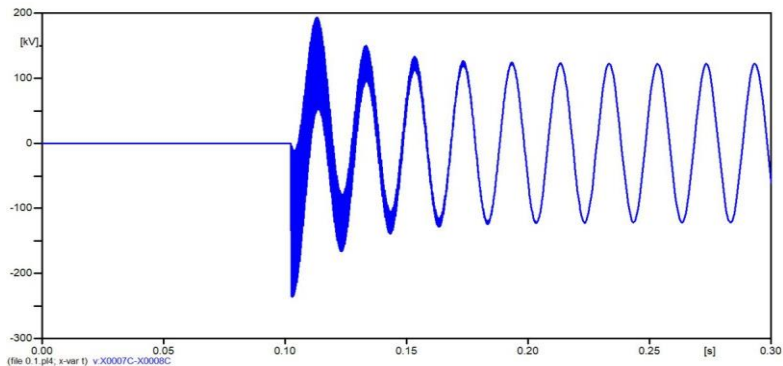


(a)

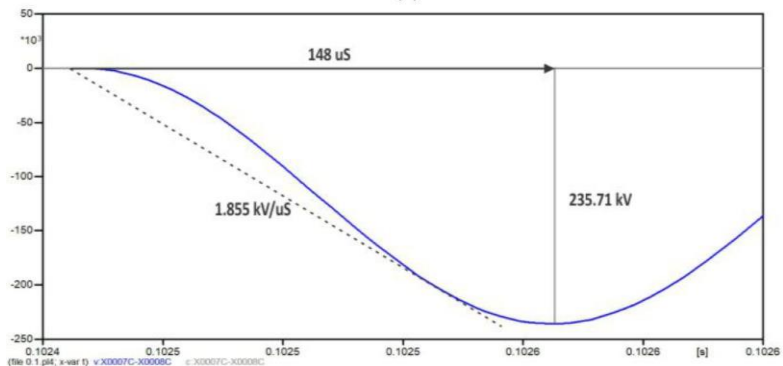


(b)

Gambar 4.16 (a) Respon Tegangan Fasa B dengan Penambahan Komponen Induktif 0,1 mH (b) Close Up Respon Tegangan Fasa B



(a)



(b)

Gambar 4.17 (a) Respon Tegangan Fasa C dengan Penambahan Komponen Induktif 0,1 mH (b) Close Up Respon Tegangan Fasa C

Dengan cara pengambilan data yang sama dilakukan untuk simulasi nilai induktif 0,2 mH – 1 mH didapatkan hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 untuk fasa A, kemudian untuk fasa B ditampilkan di Tabel 4.5, dan fasa C pada Tabel 4.6.

Tabel 4.4 Nilai Respon Tegangan Fasa A dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Beban

Nilai induktansi (mH)	Nilai Puncak TRV (kV)	Rise Time (us)	Nilai RRRV (kV/us)
0	235,47	144	1,8688
0,1	235,62	144	1,8849
0,2	235,71	142	1,8856
0,3	233,86	141	1,8560
0,4	235,63	147	1,8265
0,5	235,34	134	1,9776
0,6	237,69	155	1,7606
0,7	226,16	151	1,8537
0,8	228,83	161	1,7602
0,9	226,41	144	1,7283
1	243,55	145	2,0995

Tabel 4.5 Nilai Respon Tegangan Fasa B dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Beban

Nilai induktansi (mH)	Nilai Puncak TRV (kV)	Rise Time (us)	Nilai RRRV (kV/us)
0	235,73	145	1,8416
0,1	235,8	141	1,9170
0,2	235,65	144	1,8410
0,3	237,16	146	1,8674
0,4	236,43	149	1,8616
0,5	237,74	142	1,8573
0,6	236,9	135	1,9418
0,7	230,49	148	1,8292
0,8	230,35	142	1,8576
0,9	235,52	154	1,8116
1	238,28	143	1,8615

Tabel 4.6 Nilai Respon Tegangan Fasa C dengan Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Beban

Nilai induktansi (mH)	Nilai Puncak TRV (kV)	Rise Time (us)	Nilai RRRV (kV/us)
0	235,73	126	1,8708
0,1	235,71	127	1,8559
0,2	235,97	128	1,8435
0,3	235,34	131	1,7964
0,4	236,15	124	1,9044
0,5	236,13	124	1,9042
0,6	239,59	133	1,8014
0,7	238,37	131	1,8196
0,8	232,27	130	1,7866
0,9	236	126	1,8730
1	233,97	130	1,7997

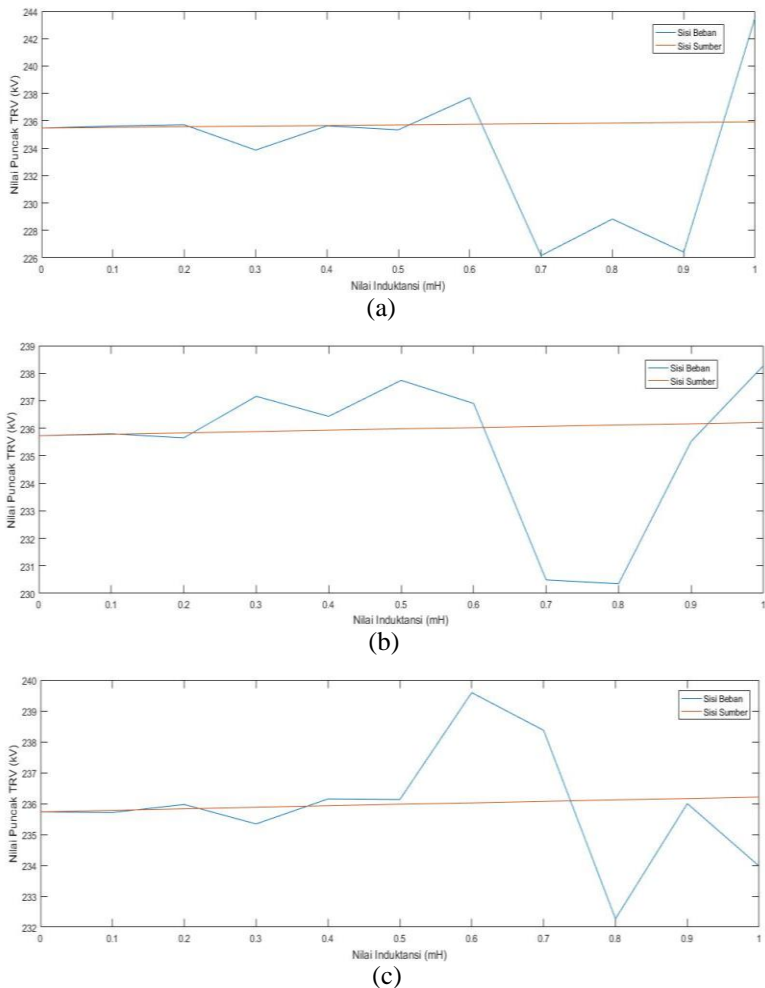
4.5 Perbandingan Hasil Respon Tegangan pada Sisi Sumber dan Sisi Beban

Perbandingan hasil simulasi rangkaian *transient recovery voltage* dengan variasi perbedaan letak pemasangan komponen induktif dapat dilihat pada Gambar 4.18 dan terlihat pada fasa A,B, dan C untuk nilai puncak TRV saat kondisi pemasangan komponen induktif pada sisi sumber lebih stabil dibanding dengan kondisi pemasangan komponen induktif pada sisi beban dimana nilai puncak TRV meningkat secara linier dengan rata- rata kenaikan setiap penambahan 0,1 mH sebesar 0,017% pada fasa A dan 0,018% pada fasa B dan C sedangkan untuk nilai puncak TRV saat pemasangan sisi beban nilai perubahannya lebih fluktuatif.

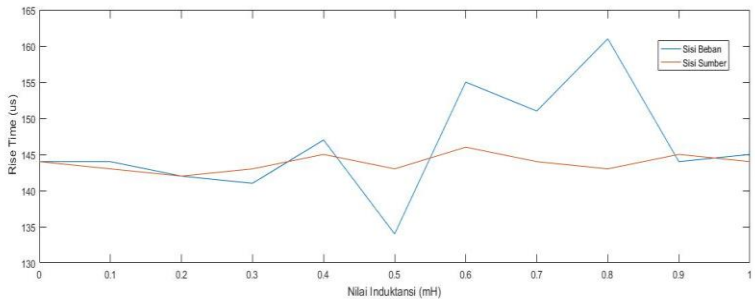
Kemudian untuk nilai rise time untuk tiap fasa pada kedua kondisi memiliki hasil dimana saat kondisi pemasangan komponen induktif pada sisi sumber lebih stabil dimana memiliki rentang nilai dari 142-147 us daripada saat kondisi pemasangan komponen induktif pada sisi beban yang secara keseluruhan memiliki rentang nilai dari 134-161 us seperti yang terlihat pada Gambar 4.19.

Dan dari Gambar 4.20 menunjukkan bahwa nilai RRRV saat kondisi pemasangan komponen induktif pada sisi sumber memiliki range nilai RRRV dari 1,831 -1,901 kV/uS, sedangkan untuk kondisi pemasangan

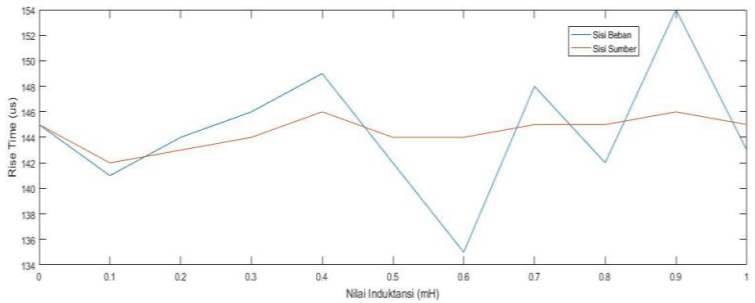
komponen induktif pada sisi beban memiliki range nilai RRRV pada angka 1,726-2,099 kV/uS.



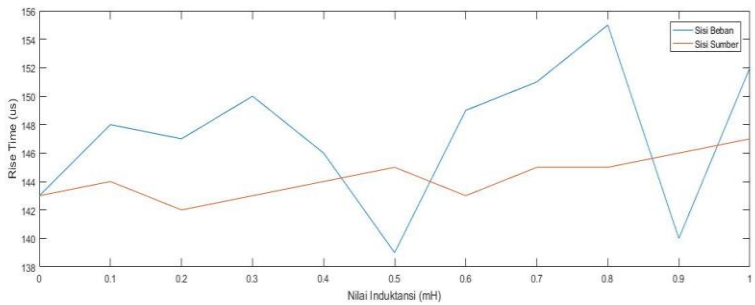
Gambar 4.18 Grafik Perbandingan Nilai Puncak *Transient Recovery Voltage* (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C



(a)

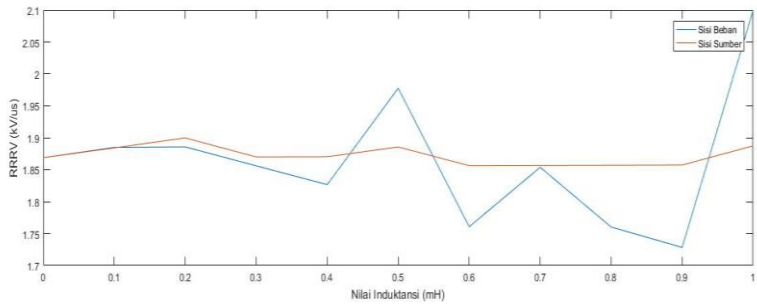


(b)

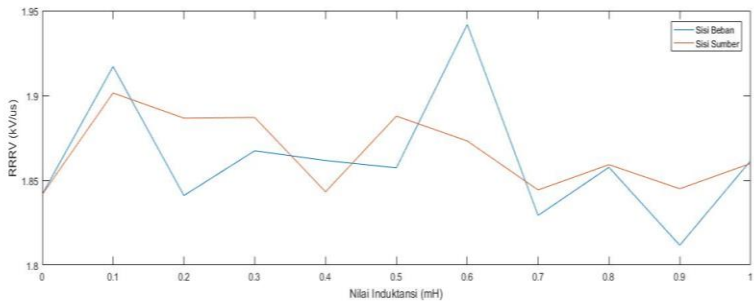


(c)

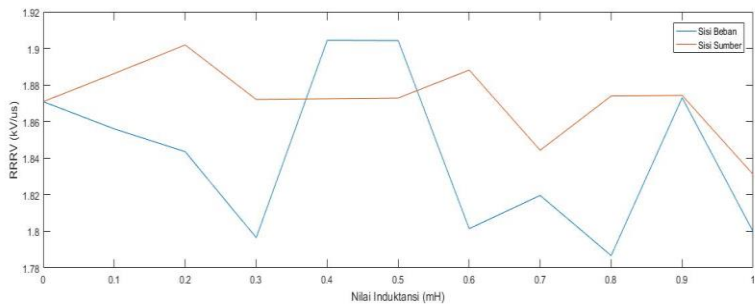
Gambar 4.19 Grafik Perbandingan Rise Time (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C



(a)



(b)

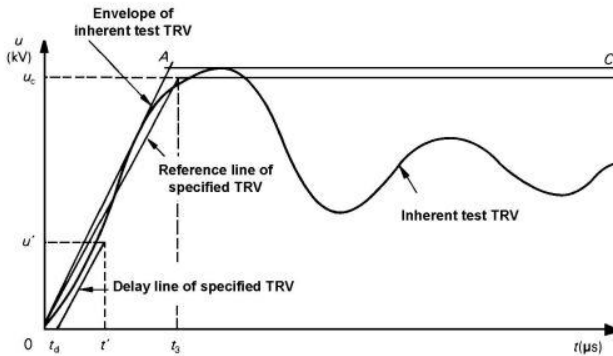


(c)

Gambar 4.20 Grafik Perbandingan Rate of Rise of Recovery Voltage (a) Fasa A (b) Fasa B (c) Fasa C

4.6 Perbandingan Perhitungan Data dengan Cara IEEE dan Selisih antar Titik pada Grafik

Berdasarkan standar IEEE C37.011-2011 penentuan nilai RRRV dapat dihitung melalui sebuah garis miring yang diukur dari waktu saat tegangan bernilai nol sampai garis tersebut menyentuh kurva seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21 Perhitungan TRV standar IEEE C37.011-2011

Namun untuk melakukan perhitungan tersebut untuk kurva hasil simulasi dibutuhkan pembacaan dan ketelitian yang tinggi karena nilai yang sangat rapat dan cukup sulit untuk melakukan perhitungan sesuai standar karena harus menggambar garis yang menyentuh kurva secara visual pada tampilan layar komputer, untuk itu pada analisa tugas akhir ini dilakukan dengan dua cara perhitungan nilai RRRV,

1. Membuat garis yang menyentuh kurva secara manual dengan fitur figure pada software MATLAB
2. Menghitung gradien dari tiap titik pada kurva pada MATLAB.

Dari dua cara perhitungan di atas didapatkan data sebagai berikut, Tabel 4.7 dan Tabel 4.8 adalah perbandingan nilai RRRV untuk penambahan komponen induktif pada sisi sumber,

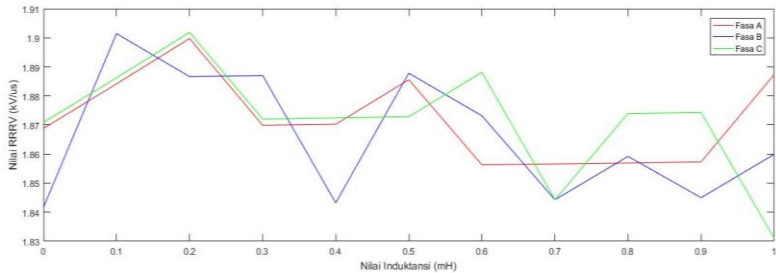
Tabel 4.7 Nilai RRRV Perhitungan IEEE untuk Penambahan pada Sisi Sumber

Nilai Induktansi (mH)	Nilai RRRV perhitungan IEEE (kV/us)		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C
0	1.868809524	1.841640625	1.870873016
0,1	1.88416	1.901451613	1.88624
0,2	1.899758065	1.88664	1.901854839
0,3	1.869920635	1.88704	1.872063492
0,4	1.870238095	1.843203125	1.872460317
0,5	1.8856	1.88784	1.872857143
0,6	1.856299213	1.873174603	1.88816
0,7	1.856614173	1.844296875	1.844296875
0,8	1.856929134	1.859212598	1.873968254
0,9	1.857322835	1.845	1.874285714
1	1.88736	1.85992126	1.831085271

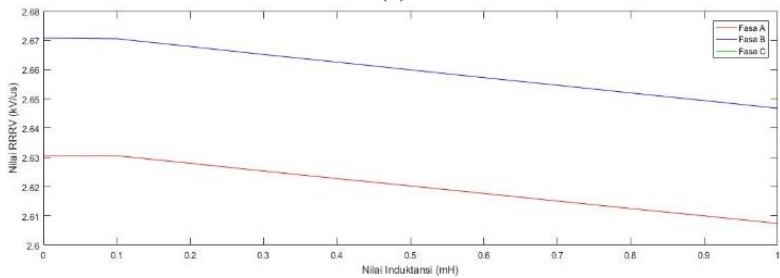
Tabel 4.8 Nilai RRRV Perhitungan Gradien pada Tiap Titik untuk Penambahan pada Sisi Sumber

Nilai Induktansi (mH)	Nilai RRRV perhitungan gradien tiap titik (kV/us)		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C
0	2.630473886	2.670803732	2.670803732
0,1	2.630554545	2.670561753	2.670561753
0,2	2.627973435	2.667899983	2.667899983
0,3	2.625311665	2.665157553	2.665157553
0,4	2.622730555	2.662576443	2.662576443
0,5	2.620230105	2.659914673	2.659914673
0,6	2.617648994	2.657252903	2.657252903
0,7	2.615067884	2.654671793	2.654671793
0,8	2.612486774	2.652010023	2.652010023
0,9	2.609986324	2.649428913	2.649428913
1	2.607405214	2.646767143	2.646767143

Dari data tabel diubah menjadi grafik seperti pada Gambar 4.22 dan dapat disimpulkan bahwa pada penambahan komponen induktif pada sisi sumber untuk perhitungan dengan menghitung gradien pada tiap titik menunjukkan sebuah pola dimana setiap penambahan nilai induktansi 0,1 mH maka semakin kecil nilai dari RRRV pada setiap fasa dengan rata-rata penurunan sebesar 0.08% .



(a)



(b)

Gambar 4.22 Perbandingan Perhitungan (a) Versi IEEE (b) Versi Gradien Tiap Titik untuk Penambahan Komponen Induktif Pada Sisi Sumber

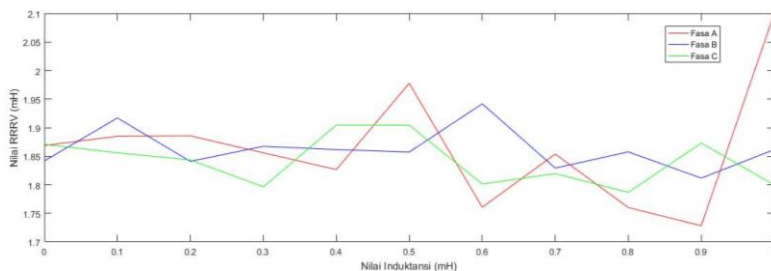
Tabel 4.9 Nilai RRRV Perhitungan IEEE untuk Penambahan pada Sisi Beban

Nilai Induktansi (mH)	Nilai RRRV perhitungan standar IEEE (kV/us)		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C
0	1.868809524	1.841640625	1.870873016
0,1	1.88496	1.917073171	1.855984252
0,2	1.88568	1.841015625	1.843515625
0,3	1.856031746	1.867401575	1.79648855
0,4	1.826589147	1.861653543	1.904435484
0,5	1.977647059	1.85734375	1.904274194
0,6	1.760666667	1.941803279	1.801428571
0,7	1.853770492	1.829285714	1.819618321
0,8	1.760230769	1.85766129	1.786692308
0,9	1.728320611	1.811692308	1.873015873
1	2.099568966	1.8615625	1.799769231

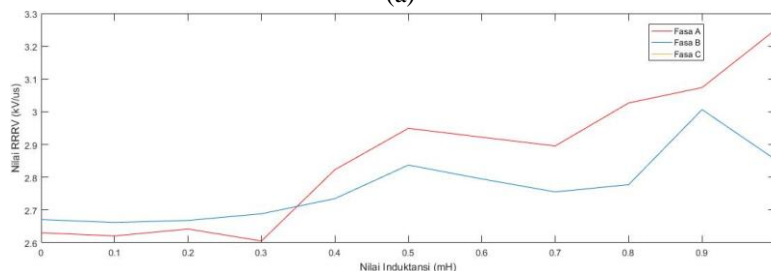
Tabel 4.10 Nilai RRRV Perhitungan Gradien Tiap Titik untuk Penambahan pada Sisi Beban

Nilai Induktansi (mH)	Nilai RRRV perhitungan gradien tiap titik (kV/us)		
	Fasa A	Fasa B	Fasa C
0	2.630473886	2.670803732	2.670803732
0,1	2.620794722	2.662011825	2.662011825
0,2	2.642008222	2.668141962	2.668141962
0,3	2.605388721	2.688548864	2.688548864
0,4	2.82316989	2.734766868	2.734766868
0,5	2.949321649	2.837204677	2.837204677
0,6	2.922219993	2.794858338	2.794858338
0,7	2.895521634	2.75517377	2.75517377
0,8	3.026754954	2.777274526	2.777274526
0,9	3.073779554	3.006509371	3.006509371
1	3.25050494	2.853739914	2.853739914

Kemudian untuk Tabel 4.9 dan Tabel 4.10 adalah perbandingan perhitungan nilai RRRV untuk penambahan komponen induktif pada sisi beban. Dan dari data tersebut diubah menjadi bentuk grafik untuk mengetahui karakteristiknya. Berdasarkan Gambar 4.23 dapat disimpulkan bahwa pada penambahan komponen induktif pada sisi beban untuk perhitungan dengan menghitung gradien pada tiap titik lebih memperlihatkan pola, dimana pada Fasa A ketika nilai induktansi 0 - 0,4 mH saat nilai induktansi memiliki nilai ganjil nilai RRRV akan turun sedangkan saat nilai induktasni genap nilai RRRV akan naik. Pada rentang nilai induktansi 0,5-1 mH tiap penambahan 0,2 mH akan terjadi fluktuasi pada nilai RRRV. Fasa B dan C saling berhimpit dan saat nilai induktansi 0,1 mH mengalami penurunan nilai RRRV namun saat nilai 0,2-0,5 mH nilai RRRV naik, mengalami penurunan nilai RRRV. Pada rentang penambahan 0,6-1 mH terjadi fluktuasi nilai RRRV tiap kenaikan 0,2 mH.



(a)



(b)

Gambar 4.23 Perbandingan Perhitungan (a) Versi IEEE (b) Versi Gradien Tiap Titik untuk Penambahan Komponen Induktif Pada Sisi Beban

4.7 Perbandingan Hasil Arus Short Circuit pada Sisi Sumber dan Sisi Beban

Berdasarkan hasil simulasi penambahan pada kedua kondisi mempengaruhi besarnya nilai arus *short circuit* menjadi lebih kecil disetiap penambahan nilai induktansinya. Dari perhitungan data pada Tabel 4.11 Penambahan komponen induktif pada sisi sumber, arus *short circuit* pada fasa A mengalami rata-rata penurunan sebesar 0,15 %, pada fasa B mengalami rata- rata penurunan sebesar 0,151%, dan pada fasa C rata-rata penurunannya sebesar 0,199% setiap penambahan 0,1 mH. Kemudian untuk penambahan komponen induktif pada sisi beban arus *shor circuit* mengalami penurunan sebesar 0,135% pada fasa A, 0,137% pada fasa B, dan 0,165% pada fasa C berdasarkan perhitungan dari Tabel 4.12.

Tabel 4.11 Nilai Arus *Short Circuit* Kondisi Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Sumber

Nilai Induktansi (mH)	Arus Short Circuit Fasa A (A)	Arus Short Circuit Fasa B (A)	Arus Short Circuit Fasa C (A)
0	9664,1	12233	12248
0,1	9642,6	12215	12227
0,2	9621,3	12195	12207
0,3	9600,2	12174	12187
0,4	9579	12153	12167
0,5	9557,9	12133	12147
0,6	9537,2	12112	12127
0,7	9516,4	12092	12107
0,8	9495,2	12071	12087
0,9	9474,8	12051	12067
1	9454,3	12031	12047

Tabel 4.12 Nilai Arus *Short Circuit* Kondisi Penambahan Komponen Induktif pada Sisi Beban

Nilai Induktansi (mH)	Arus Short Circuit Fasa A (A)	Arus Short Circuit Fasa B (A)	Arus Short Circuit Fasa C (A)
0	9664,1	12233	12248
0,1	9644,4	12217	12230
0,2	9627,8	12200	12213
0,3	9617	12181	12195
0,4	9599,9	12164	12167
0,5	9575,7	12146	12158
0,6	9564,5	12127	12140
0,7	9545,7	12107	12122
0,8	9528	12087	12102
0,9	9506,1	12069	12084
1	9489,9	12049	12066

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berikut adalah kesimpulan berdasarkan hasil simulasi dan analisis mengenai pengaruh penambahan komponen induktif terhadap *transient recovery voltage circuit breaker* tegangan tinggi :

1. Pemasangan komponen induktif pada sisi sumber memberikan pengaruh rata-rata kenaikan nilai TRV sebesar 0.017% pada fasa A dan 0.018% pada fasa B dan C tiap penambahan komponen induktif sebesar 0,1 mH.
2. Pada kondisi pemasangan komponen induktif di sisi sumber dengan cara perhitungan gradien di tiap titik paling menunjukkan karakteristiknya yaitu setiap penambahan komponen induktif, nilai dari RRRV memiliki nilai rata-rata penurunan sebesar 0.08% disetiap penambahn 0,1 mH.
3. Setiap penambahan komponen induktif pada sisi sumber sebesar 0,1 mH, arus *short circuit* pada fasa A mengalami rata-rata penurunan sebesar 0,15 %, pada fasa B mengalami rata-rata penurunan sebesar 0,151%, dan pada fasa C rata-rata penurunannya sebesar 0,199%.
4. Untuk penambahan komponen induktif pada sisi beban setiap penambahan sebesar 0,1 mH, rata- rata penurunan arus *short circuit* pada fasa A sebesar 0,135%, pada fasa B 0,137%, dan pada fasa C sebesar 0,165%.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari studi ini untuk di masa yang akan datang adalah melakukan studi atau simulasi terkait dengan besarnya nilai induktansi yang efektif untuk pengaruh transient recovery voltage pada *circuit breaker*. Studi ini merupakan tahap awal identifikasi munculnya *transient recovery voltage* pada sistem tenaga listrik karena penambahan komponen induktif yang dapat dikembangkan lebih lanjut dan dijadikan acuan sebagai pengambilan kebijakan terhadap perancangan komponen-komponen yang dapat mendapatkan nilai *transient recovery voltage* yang efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Ito, *Switching Equipment*, Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2018.
- [2] Electropedia, "International Electrotechnical Vocabulary (IEV)," [Online]. Available: www.electropedia.org.
- [3] B. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi*, Medan: Erlangga, 2012.
- [4] O. PLN, *Himpunan Buku Petunjuk Operasi dan Pemeliharaan Peralatan Penyaluran Tenaga Listrik*, Jakarta: Perusahaan Listrik negara, 2014.
- [5] R. D.Dufournet, "TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE (TRV) FOR HIGH-VOLTAGE," 2014.
- [6] B. G. Skrotzki, *Electric Transmission and Distribution*, Florida: Robert E.Krieger Publishing Company, Inc, 1954.
- [7] W. Dann and H. Rudd, *The Use of Current-Limiting Reactors*, Ohio: Boody House, 1915.
- [8] D. F. Peelo, *Current Interruption Transients Calculation*, Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2014.
- [9] D. Irfan, *Analisis Penggunaan Reaktor Seri Sebagai Pembatas Arus HUBung Singkat di Busbar 150 kV GI Plumpang*, Yogyakarta: S2 Teknik Elektro UGM, 2007.
- [10] J. A. Martinez-Velasco, *Transient analysis of power systems : solution techniques, tools, and applications*, Chicester: John Wiley and Sons Ltd, 2015.
- [11] J. Das, *Transients in Electrical Systems Analysis, Recognition, And Mitigation*, New York: The McGraw-Hill Companies, Inc, 2010.
- [12] O. a. A. B. Abdullh, "Investigation of Transient Recovery Voltage on Circuit Breaker," Department of Electrical Engineering University of Bridgeport, Bridgeport, 2015.
- [13] K. S. Anugrah, I. Negara and I. Satriyadi, *STUDI PENGARUH SISTEM PENTANAHAN TERHADAP FERORESONANSI DI GARDU INDUK TEGANGAN TINGGI*, Surabaya: Institut Teknologi Surabaya, 2018.

- [14] E. Haginomori, T. Koshiduka and J. I. H. Arai, Power system transient analysis : theory and practice using simulation programs (ATP-EMTP), Chicester: John Wiley and Sons Ltd, 2016.
- [15] S. Y. Leung, L. A. Snider and Cat S. M. Wong, "SF6 Generator Circuit Breaker Modeling," 2005.

BIOGRAFI PENULIS



Bagas Rahmadi adalah nama yang diberikan kepada penulis, lahir di kota kecil bernama Klaten pada tanggal 6 September 1997 yang menjadikan penulis sebagai anak terakhir dari pasangan Bapak Raharjo dan Ibu Tarwiyah. Penulis menempuh jenjang pendidikan di SD Negeri 1 Wadunggetas pada tahun 2003-2009 kemudian melanjutkan ke SMP Negeri 1 Delanggu pada tahun 2009-2012 dan menempuh jenjang pendidikan SMA di SMA Negeri 1 Klaten pada tahun 2012-2015. Penulis melanjutkan pendidikan S-1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan mengambil jurusan Teknik Elektro. Selama masa perkuliahan di ITS, penulis berkesempatan untuk ikut ambil bagian menjadi staff Kementerian Sosial Masyarakat BEM ITS 2017/2018 dan di tahun berikutnya diberikan kepercayaan untuk menjadi Dirjen Lingkungan Hidup di Kementerian Sosial Masyarakat BEM ITS 2018/2019. Penulis sendiri dapat dihubungi melalui email : bagasrahmadi27@gmail.com.