

**SIMULASI TEGANGAN DAN ARUS TRANSIEN
PADA PROSES SWITCHING PMT BAY KAPASITOR
GI 150 KV KEBASEN DENGAN MENGGUNAKAN
*ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM***

LAPORAN TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana S1 Pada
Prodi Teknik Elektro Universitas Islam Sultan Agung



Oleh :

AFIF RISANUL KHOIR

30602200101

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2025

FINAL PROJECT
SIMULATION OF TRANSIENT VOLTAGE AND CURRENT IN THE
SWITCHING PROCESS OF A CAPACITOR BAY CIRCUIT BREAKER
AT THE 150 KV KEBASEN SUBSTATION USING
ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM

*Suggested As One of the Requirements to Get a Bachelor's Degree in a Study Program
Electrical Engineering at Universitas Islam Sultan Agung.*



Arranged By :

AFIF RISANUL KHOIR

30602200101

ELECTRICAL ENGINEERING STUDY PROGRAM
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG

2025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**SIMULASI TEGANGAN DAN ARUS TRANSIEN PADA PROSES *SWITCHING* PMT BAY KAPASITOR GI 150 KV KEBASEN DENGAN MENGGUNAKAN *ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM***” ini disusun oleh:

Nama : AFIF RISANUL KHOIR
NIM : 30602200101
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Kamis
Tanggal : 16 Januari 2025

Pembimbing I

Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T.
NIDN : 0618066301

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro


Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.
NIDN : 0607018501

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “**SIMULASI TEGANGAN DAN ARUS TRANSIEN PADA PROSES *SWITCHING* PMT BAY KAPASITOR GI 150 KV KEBASEN DENGAN MENGGUNAKAN *ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM***” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Jum'at
Tanggal : 24 Januari 2025

Tim Penguji

Tanda Tangan

Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.

NIDN : 0607018501

Ketua

Dr. Bustanul Arifin, S.T., M.T.

NIDN : 0614117701

Penguji I

Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, MT

NIDN : 0617126602

Penguji II

SURAT PERNYATAAN

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Afif Risanul Khoir
NIM : 30602200101
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“SIMULASI TEGANGAN DAN ARUS TRANSIEN PADA PROSES SWITCHING PMT BAY KAPASITOR GI 150 KV KEBASEN DENGAN MENGGUNAKAN ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM”** adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, Januari 2025

Yang Menyatakan



Afif Risanul Khoir

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Afif Risanul Khoir
NIM : 30602200101
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul **“SIMULASI TEGANGAN DAN ARUS TRANSIEN PADA PROSES SWITCHING PMT BAY KAPASITOR GI 150 KV KEBASEN DENGAN MENGGUNAKAN ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM”** dan menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan hak bebas royalti non-eksklusif untuk disimpan, dialih mediakan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasinya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/ Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung

Semarang, Januari 2025

Yang Menyatakan



Afif Risanul Khoir

KATA PENGANTAR



Alhamdulillah, segala puji syukur bagi Allah subhanahu wa ta'ala karena atas berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya masih berkesempatan dalam menuntut ilmu dalam keadaan sehat wal'afiat, kemudian Shalawat serta Salam semoga senantiasa tercurahkan kepada baginda Rasulullah Muhammad shallallahu 'alaihi wa sallam, semoga kelak kita mendapatkan syafaatnya. Aamiin Yaa Robbaalalamin.

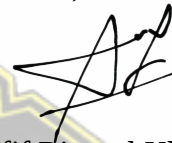
Penelitian ini diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi di Program Studi Strata Satu (S1) Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Dalam penyusunan penelitian ini, pastinya banyak pihak yang sudah memberikan bantuan baik moral dan material. Oleh karena itu saya menyampaikan ucapan Jazakumullah Khoiron dan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. H. Gunarto, SH., M.Hum. selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Ibu Dr. Ir. Novi Mariyana, ST., MT., IPU., ASEAN, Eng. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Ibu Jenny Putri Hapsari, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, MT. selaku Dosen Pembimbing yang dengan penuh kesabaran dan kebijaksanaan telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi dalam penyusunan penelitian hingga selesai.
5. Seluruh Dosen jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang telah memberikan ilmu, wawasan, dan arahan selama masa perkuliahan. Serta seluruh Staff Teknik Elektro yang selalu siap membantu dalam berbagai urusan administratif dan teknis selama masa perkuliahan.

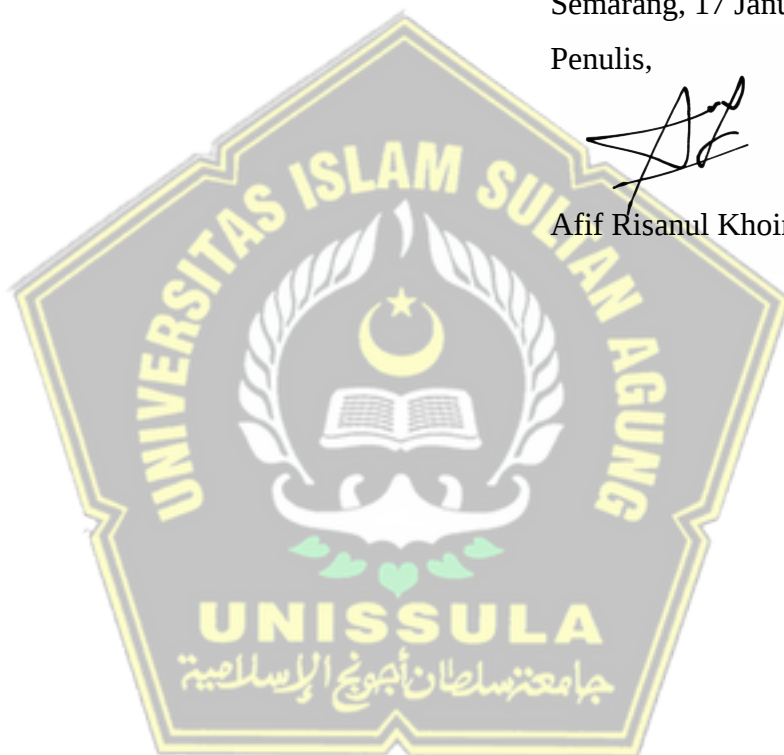
6. Bapak, Ibu serta Saudara-saudara saya tercinta atas dukungan kepada saya berupa kasih sayang, keridhoan, doa, dan motivasi yang telah diberikan.
7. Teman-teman seperjuangan yang telah memberikan dukungan moral, semangat, serta saran dan kritik yang membangun. Kebersamaan dan kerja sama kalian sangat membantu dalam menjalani perkuliahan.
8. Semua pihak yang telah memberikan bantuan hingga selesainya penelitian ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu oleh penulis.

Semarang, 17 Januari 2025

Penulis,



Afif Risanul Khoir



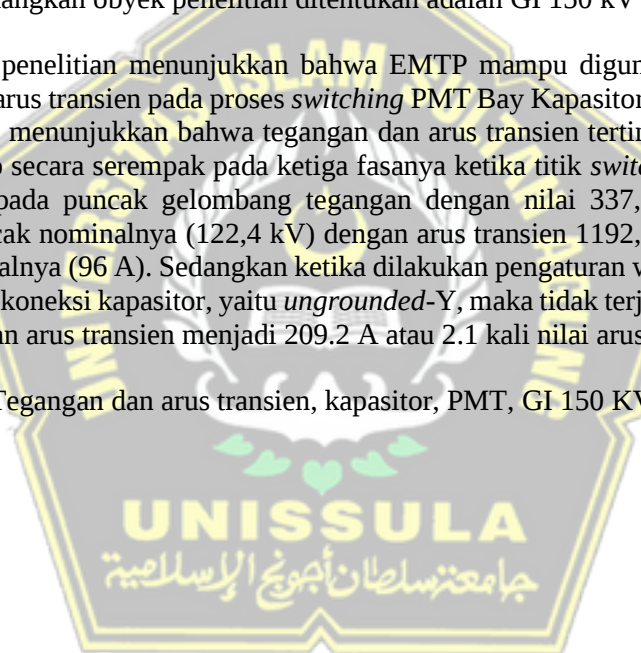
ABSTRAK

Salah satu permasalahan yang timbul pada SUTT 150 kV dengan jarak yang panjang adalah jatuh tegangan, maka salah satu upaya yang diterapkan adalah memasang kapasitor bank. Namun, permasalahan pada pengoperasian kapasitor bank adalah timbulnya tegangan dan arus transien pada saat proses *switching* untuk memasukkan kapasitor bank ke dalam sistem.

Penelitian ini membahas tentang simulasi tegangan dan arus transien pada proses *switching* PMT Bay Kapasitor. Parameter yang ditetapkan: tegangan sistem, impedansi sumber, impedansi beban, kapasitas *damping* reaktor, kapasitas kapasitor, dan waktu pengoperasian PMT. Metode penelitian yang digunakan adalah melakukan pengambilan data beban pada waktu beban puncak pukul 19:00 di bulan November 2024, kemudian pengambilan data *nameplate* PMT, reaktor, dan kapasitor serta data arus hubung singkat. *EMTP (Electromagnetic Transients Program)* digunakan untuk menyimulasikan model penelitian, sedangkan obyek penelitian ditentukan adalah GI 150 kV Kebasen.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa EMTP mampu digunakan untuk simulasi tegangan dan arus transien pada proses *switching* PMT Bay Kapasitor GI 150 kV Kebasen. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan dan arus transien tertinggi terjadi pada saat PMT menutup secara serempak pada ketiga fasanya ketika titik *switching* mendekati atau tepat berada pada puncak gelombang tegangan dengan nilai 337,3 kV atau 2,75 kali tegangan puncak nominalnya (122,4 kV) dengan arus transien 1192,1 A atau 12 kali arus puncak nominalnya (96 A). Sedangkan ketika dilakukan pengaturan waktu *switching* PMT sesuai dengan koneksi kapasitor, yaitu *ungrounded-Y*, maka tidak terjadi tegangan transien pada sistem dan arus transien menjadi 209,2 A atau 2,1 kali nilai arus puncak nominalnya.

Kata kunci: Tegangan dan arus transien, kapasitor, PMT, GI 150 KV, EMTP



DAFTAR ISI

SIMULASI TEGANGAN DAN ARUS TRANSIEN PADA PROSES SWITCHING PMT BAY KAPASITOR GI 150 KV KEBASEN DENGAN MENGGUNAKAN <i>ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM</i>	i
SIMULATION OF TRANSIENT VOLTAGE AND CURRENT IN THE SWITCHING PROCESS OF A CAPACITOR BAY CIRCUIT BREAKER AT THE 150 KV KEBASEN SUBSTATION USING ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	iv
SURAT PERNYATAAN	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Dasar Teori	5
2.2.1 Gardu Induk	5
2.2.2 Pemutus Tenaga (PMT)	6
2.2.3 Kapasitor Bank.....	8
2.2.4 Kapasitor Koneksi (Y)	9
2.2.5 Tegangan dan arus transien.....	11
2.2.6 Pengaturan <i>switching</i> kapasitor.....	12
2.2.7 Metode-metode pengontrolan <i>switching</i> kapasitor	13

2.2.8	Switching controller.....	15
2.2.9	Persamaan yang digunakan untuk model simulasi EMTP...	16
2.2.10	EMTP (<i>Electromagnetic Transients Program</i>).....	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		22
3.1	Model Penelitian	22
3.2	Alat dan Bahan	22
3.3	Prosedur Penelitian	23
3.4	Tahapan Penelitian.....	32
BAB IV HASIL DAN ANALISA.....		33
4.1	Hasil	33
4.1.1	Perhitungan Arus Transien.....	33
4.1.2	Simulasi EMTP	34
4.2	Analisa.....	48
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		51
5.1	Kesimpulan	51
5.2	Saran	51
DAFTAR PUSTAKA.....		53



DAFTAR TABEL

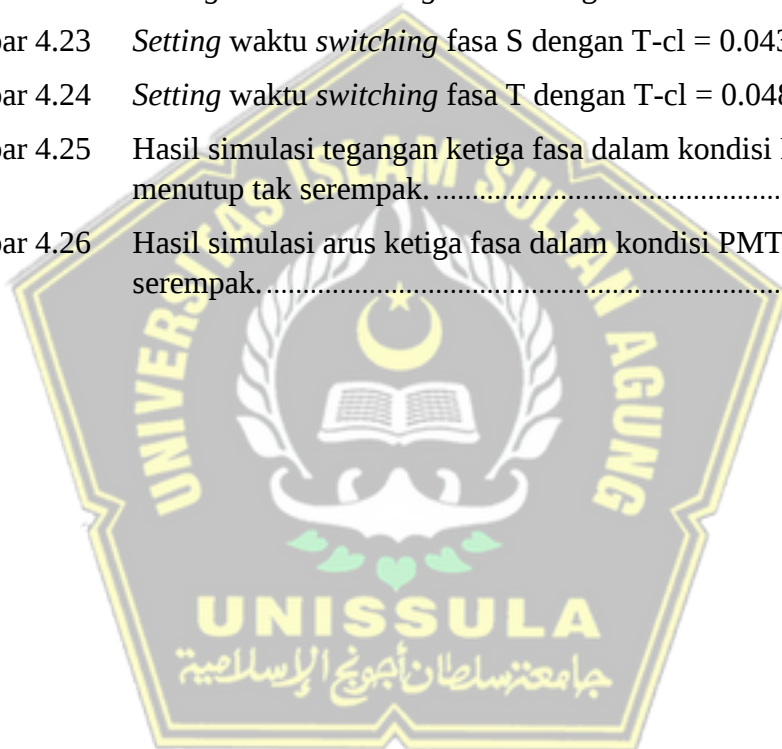
Tabel 2.1 Spesifikasi umum PMT kapasitor.	7
Tabel 2.2 <i>Nameplate</i> PMT Bay Kapasitor GI 150 kV Kebasen.....	7
Tabel 2.3 Arus hubung singkat GI 150 kV Kebasen.	12
Tabel 2.4 <i>Nameplate damping</i> reaktor Bay Kapasitor GI 150 kV Kebasen.....	14
Tabel 3.1 Spesifikasi komputer.....	23
Tabel 3.2 Kapasitas dan beban trafo GI 150 kV Kebasen.	28
Tabel 4.1 Hasil simulasi ketika PMT menutup serempak.	49
Tabel 4.2 Hasil simulasi ketika PMT menutup tidak serempak.	49
Tabel 4.3 Hasil pengujian tahanan kontak PMT.....	50



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Ilustrasi bagian-bagian kapasitor [4].	8
Gambar 2.2	Unit kapasitor [4].	9
Gambar 2.3	Koneksi kapasitor bank <i>Grounded-Y</i> [4].	10
Gambar 2.4	Koneksi kapasitor bank <i>Ungrounded-Y</i> [4].	11
Gambar 2.5	<i>Switching</i> PMT kapasitor [6].	13
Gambar 2.6	Prinsip kerja switching controller [1].	15
Gambar 2.7	Tampilan ATPDraw.	19
Gambar 3.1	Single Line Diagram GI 150 kV Kebasen.	22
Gambar 3.2	Tampilan awal ATPDraw.	24
Gambar 3.3	Rangkaian pengganti pada <i>software</i> ATPDraw.	24
Gambar 3.4	Nilai parameter komponen AC3PH.	25
Gambar 3.5	Nilai parameter komponen RLC3.	26
Gambar 3.6	Nilai parameter komponen TRAFO_I3.	27
Gambar 3.7	Nilai parameter komponen RLC3 sebagai beban 20 kV.	29
Gambar 3.8	Nilai parameter komponen IND_RP sebagai dumping reaktor.	30
Gambar 3.9	Nilai parameter komponen CAP_RS sebagai kapasitor.	31
Gambar 3.10	Current probe dan voltage probe.	31
Gambar 3.11	Model ATPDraw untuk sistem GI 150 kV Kebasen.	32
Gambar 3.12	Diagram alir penelitian.	32
Gambar 4.1	Gelombang tegangan.	34
Gambar 4.2	<i>Setting</i> waktu menutup (T-cl) PMT 0.02 s.	35
Gambar 4.3	Hasil simulasi tegangan di fasa R dengan T-cl = 0.02 s.	35
Gambar 4.4	Hasil simulasi arus di fasa R dengan T-cl = 0.02 s.	36
Gambar 4.5	Hasil simulasi tegangan di fasa S dengan T-cl = 0.02 s.	36
Gambar 4.6	Hasil simulasi arus di fasa S dengan T-cl = 0.02 s.	37
Gambar 4.7	Hasil simulasi tegangan di fasa T dengan T-cl = 0.02 s.	37
Gambar 4.8	Hasil simulasi arus di fasa T dengan T-cl = 0.02 s.	38
Gambar 4.9	<i>Setting</i> waktu menutup (T-cl) PMT 0.04 s.	38
Gambar 4.10	Hasil simulasi tegangan di fasa R dengan T-cl = 0.04 s.	39
Gambar 4.11	Hasil simulasi arus di fasa R dengan T-cl = 0.04 s.	39
Gambar 4.12	Hasil simulasi tegangan di fasa S dengan T-cl = 0.04 s.	40

Gambar 4.13	Hasil simulasi arus di fasa S dengan $T_{cl} = 0.04$ s.	40
Gambar 4.14	Hasil simulasi tegangan di fasa T dengan $T_{cl} = 0.04$ s.	41
Gambar 4.15	Hasil simulasi arus di fasa T dengan $T_{cl} = 0.04$ s.	41
Gambar 4.16	<i>Setting</i> waktu <i>switching</i> fasa R dengan $T_{cl} = 0.043$ s.	42
Gambar 4.17	Hasil simulasi tegangan di ketiga fasa dengan $T_{cl} = 0.0234$ s.	42
Gambar 4.18	Hasil simulasi arus di ketiga fasa dengan $T_{cl} = 0.0234$ s.	43
Gambar 4.19	<i>Setting</i> waktu <i>switching</i> fasa R dengan $T_{cl} = 0.0249$ s.	44
Gambar 4.20	Hasil simulasi tegangan di ketiga fasa dengan $T_{cl} = 0.0249$ s.	44
Gambar 4.21	Hasil simulasi arus di ketiga fasa dengan $T_{cl} = 0.0249$ s.	45
Gambar 4.22	<i>Setting</i> waktu <i>switching</i> fasa R dengan $T_{cl} = 0.043$ s.	46
Gambar 4.23	<i>Setting</i> waktu <i>switching</i> fasa S dengan $T_{cl} = 0.043$ s.	46
Gambar 4.24	<i>Setting</i> waktu <i>switching</i> fasa T dengan $T_{cl} = 0.048$ s.	47
Gambar 4.25	Hasil simulasi tegangan ketiga fasa dalam kondisi PMT menutup tak serempak.	47
Gambar 4.26	Hasil simulasi arus ketiga fasa dalam kondisi PMT menutup tak serempak.	48



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Salah satu permasalahan yang timbul pada SUTT 150 kV dengan jarak yang panjang adalah jatuh tegangan. Hal ini dapat disebabkan oleh beban yang tinggi, jarak saluran yang panjang, serta spesifikasi konduktor yang kurang sesuai sehingga akan berdampak pada meningkatnya rugi-rugi daya yang secara ekonomis akan merugikan perusahaan. Maka salah satu upaya yang dapat diterapkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan memasang kapasitor bank. Namun, permasalahan pada pengoperasian kapasitor bank akan berdampak pada timbulnya tegangan dan arus transien pada saat proses *switching* untuk memasukkan kapasitor bank ke dalam sistem. Tegangan dan arus transien tersebut lambat laun akan menyebabkan kenaikan pada hasil uji tahanan kontak PMT yang dapat menyebabkan timbulnya *hotspot* dan juga mengurangi *lifetime* dari PMT itu sendiri.

Gardu Induk (GI) 150 kV Kebasen memiliki satu kapasitor bank yang mempunyai kapasitas 25 MVAR pada tegangan 150 kV dan pengoperasian kapasitor bank ini tergantung pada kebutuhan sistem. Namun, karena GI 150 kV Kebasen ini berada di ujung subsistem dan merupakan GI *switching* karena sering berganti subsistem, serta tegangan sistem di GI tersebut juga tergolong rendah maka hal tersebut menyebabkan frekuensi pengoperasian kapasitor bank di GI ini menjadi cukup tinggi.

Permasalahan yang terjadi pada GI 150 kV Kebasen adalah bahwa prosedur pengoperasian PMT di Bay Kapasitor tersebut belum sesuai dengan standar pengoperasian untuk PMT bay kapasitor, yaitu dengan menggunakan beberapa metode diantaranya adalah *pre-insertion inductor*, *pre-insertion resistor*, atau dengan menggunakan *switching controller*. Solusi dari permasalahan tersebut adalah dengan memasang *switching controller* untuk melakukan pengaturan waktu pada saat proses *switching* agar tegangan dan arus transien yang timbul dapat diminimalisir bahkan dihilangkan.

Berdasarkan fakta di lapangan tersebut, maka dalam penelitian ini dilakukan analisis seberapa besar nilai tegangan dan arus transien yang terjadi pada saat PMT bay kapasitor dioperasikan secara serempak tanpa menggunakan pengaturan waktu dan saat PMT bay kapasitor dioperasikan secara tidak serempak dengan pengaturan waktu berdasarkan hasil simulasi menggunakan EMTP.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan diatas, maka perumusan masalahnya adalah:

- Bagaimana kondisi tegangan sistem yang ada di GI 150 kV Kebasen dan urgensinya penggunaan Kapasitor Bank di GI 150 kV Kebasen?
- Bagaimana perbedaan tegangan dan arus transien yang terjadi pada proses *switching* PMT kapasitor bank ketika PMT menutup secara serempak dan tak serempak dengan pengaturan waktu?
- Bagaimana dampak tegangan dan arus transien terhadap unjuk kerja PMT?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Pembahasan terkait hanya pada proses *switching* PMT kapasitor GI 150 kV Kebasen.
- Nilai impedansi sumber dan beban dihitung berdasarkan rata-rata beban puncak harian.
- Pembahasan mengenai pengaruh yang timbul akibat proses *switching* PMT kapasitor GI 150 kV Kebasen.
- Data pengukuran yang dipergunakan untuk disimulasikan pada *software* EMTP adalah data bulan November 2024.
- Tegangan yang diperhitungkan hanya tegangan pada Busbar 150 kV GI Kebasen.
- Perhitungan dengan rumus hanya untuk arus transien yang timbul ketika PMT menutup secara serempak.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

- a. Diketuinya kondisi tegangan sistem yang ada di GI 150 kV Kebasen dan kebutuhan penggunaan kapasitor bank di GI 150 kV Kebasen.
- b. Diketuinya model GI 150 kV Kebasen ke dalam EMTP dan mensimulasikannya.
- c. Diketuinya perbedaan tegangan dan arus transien yang terjadi pada proses *switching* PMT kapasitor bank ketika PMT menutup secara serempak dan tidak serempak dengan pengaturan waktu beserta dampak yang ditimbulkan terhadap unjuk kerja PMT.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Memberikan pemahaman mengenai fungsi kapasitor bank pada sistem tegangan tinggi 150 kV.
- b. Memberikan pengetahuan tentang proses *switching* PMT kapasitor di GI 150 kV Kebasen yang dapat memperbaiki kualitas tegangan sistem beserta dampaknya pada PMT.
- c. Memberikan pemahaman dan pengetahuan mengenai pemodelan dan simulasi sistem dengan menggunakan *software* EMTP.

1.6 Sistematika Penelitian

Sistematika penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Menjelaskan tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, metode penelitian dan penulisan sistematis penelitian yang akan dilakukan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Menerangkan secara umum tentang sistem transmisi tenaga listrik, gardu induk, dan kapasitor bank serta dasar teori dan prinsip yang melandasi pembuatan penelitian ini.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Berisi tentang model penelitian, alat dan bahan yang digunakan berupa *software* maupun *hardware* sebagai media pendukung, menjelaskan prosedur penelitian, melakukan pemodelan serta simulasi untuk mendapatkan hasil penelitian yang dibutuhkan.

BAB IV : HASIL DAN ANALISA

Melakukan perhitungan nilai arus transien ketika PMT menutup serempak dan melakukan simulasi menggunakan *software* EMTP terhadap nilai tegangan dan arus transien yang terjadi pada saat proses *switching* PMT PMT menutup secara serempak dan tak serempak dengan pengaturan waktu. Kemudian menganalisis hasil perhitungan dan simulasi.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dan saran dari hasil penelitian.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian-penelitian tentang tegangan dan arus transien akibat *switching* PMT bay kapasitor telah dilakukan oleh peneliti terdahulu antara lain:

- a. Kajian Penggunaan *Switching Controller* pada Kapasitor Tegangan Tinggi [1]. Penelitian ini dilakukan dengan melakukan simulasi kondisi *switching capacitor* pada sistem 150 kV pada kondisi memakai *switching controller* dan tanpa memakai *switching controller*. Diperoleh hasil bahwa: besar tegangan transien pada *switching* kapasitor bank dapat mencapai 1.67 dari tegangan nominal dan puncak gelombang arus transien mencapai 1165.9 A.
- b. Analisis Arus *Inrush* saat *Switching* Kapasitor di Gardu Induk (GI) Manisrejo Madiun [2]. Penelitian ini dilakukan dengan cara melakukan perhitungan, berdasarkan data dilapangan, nilai arus *inrush* dan frekuensi saat *switching* kapasitor *bank*. Diperoleh hasil bahwa: besar arus *inrush* tanpa adanya reaktor sebagai peredam adalah $1,24.10^{10}$ A sedangkan arus *inrush* dengan menggunakan reaktor seri adalah 90.349 A.
- c. Analisis Pemodelan Arus Transien saat *Switching* Kapasitor Bank pada Rumah Sakit Islam Sultan Agung Semarang [3]. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pemodelan sistem menggunakan *software* Simulink Matlab. Diperoleh hasil bahwa: dampak yang ditimbulkan dari proses *switching* capasitor bank adalah timbulnya arus *inrush* yang mencapai 7-10 kali arus rms beban dan setelah dipasang induktor seri dapat mereduksi besarnya arus *inrush* menjadi 4-6 kali arus rms beban.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Gardu Induk

Gardu induk adalah penghubung antara sistem pembangkit ke sistem transmisi, sistem transmisi ke sistem transmisi lain, dan juga antara sistem transmisi ke sistem distribusi. Oleh karena itu, gardu induk memegang peranan yang cukup penting dalam penyaluran tenaga listrik dari pembangkit ke

pelanggan. Gardu induk terdiri dari peralatan listrik tegangan tinggi yang dapat digunakan untuk menyalurkan dan mengatur aliran tenaga listrik, peralatan yang terdapat di gardu induk disebut material transmisi utama (MTU) yang terdiri dari trafo daya, trafo arus, trafo tegangan, pemutus tenaga (PMT), pemisah (PMS), *lightning arrester* (LA), busbar, serta peralatan sekunder dan pendukung lainnya.

2.2.2 Pemutus Tenaga (PMT)

Mengacu pada IEV (*International Electrotechnical Vocabulary*) 441-14-20, *Circuit Breaker* (CB) atau Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan saklar/*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 kondisi abnormal/gangguan seperti kondisi hubung singkat (*short circuit*).

Definisi PMT berdasarkan IEEE C37.100:1992 (*Standard definitions for power switchgear*) adalah peralatan saklar/*switching* mekanis, yang mampu menutup, mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal sesuai dengan ratingnya serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal/gangguan sesuai dengan ratingnya.

Perangkat ini dirancang untuk mengontrol aliran listrik dengan cara membuka atau menutup rangkaian. Selain itu, alat ini juga berfungsi sebagai pelindung sistem dari kerusakan akibat beban lebih atau hubungan singkat. [4].

Spesifikasi umum untuk PMT bay kapasitor ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi umum PMT kapasitor.

Spesifikasi General untuk PMT bay kapasitor		
Item	Nilai/Keterangan	Satuan
Standar	IEC 62271	
Rated Voltage	170	kV
Basic Insulation Level (BIL)	750	kV
SIL (kV)	325	kV
Rated Frekuensi	50	Hz
Rated Normal Current (Ir)	3150	A
Rated Short Circuit Breaking Current (Isc)	40	kA
Rated Duration of Short circuit (tk)	1	s
Rated Out of Phase breaking current (Id)	10	kA
First pole to clear factor	1.5 untuk netral kapasitor ditanahkan	--
	2 untuk netral kapasitor tidak ditanahkan	--
Rated operating sequence	0-0.3s-CO-3min-CO	

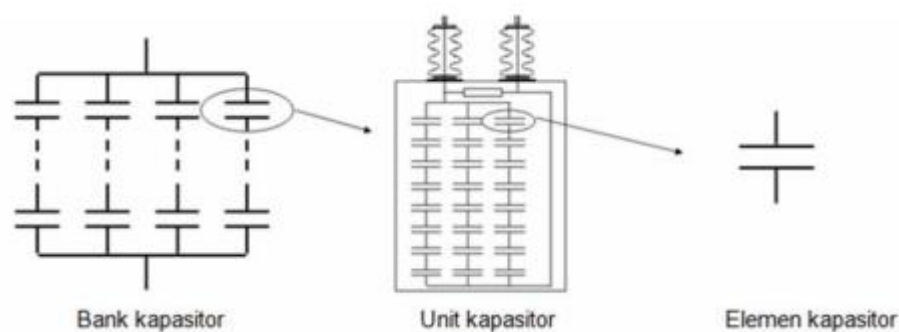
Tabel 2.2 menunjukkan *nameplate* PMT Bay Kapasitor yang terpasang di GI 150 kV Kebasen.

Tabel 2.2 *Nameplate* PMT Bay Kapasitor GI 150 kV Kebasen.

Circuit-breaker type	LTB1700/8	Operating device type	BLK222
No.	HSB0422056	No.	HS80422058-AT
Order	244039/10	Order	244039/10
Voltage	170 kV	Breaking current	40 kA
Insulation level		DC-component	53 %
Lightning impulse withstand voltage	750 kV	First-pole-to-clear-factor	1.5
Switching impulse withstand voltage	- kV	Making current	100 kA
Power frequency withstand voltage	325 kV	Short-time current	3s 40 kA
Frequency	50 Hz		
Normal current	3150 A	Line charging breaking current	50 A
Gas pressure (SF6)	Abs (+20°C)	Mass total	655 kg
Max. Working pressure	0.90 MPa	Mass of gas	9 kg
Filling	0.70 MPa	Rules	IEC 60056
Signal	0.62 MPa	Operating sequence	O-0.3s-CO-3m-CO
Blocking	0.60 MPa	Temperature class	-30°C
Volume per pole	65 L	Year of manufacture	2004

2.2.3 Kapasitor Bank

Kapasitor bank berperan penting dalam meningkatkan mutu energi listrik, termasuk menstabilkan tegangan beban, memperbaiki faktor daya, dan mengurangi kerugian transmisi. Di sisi lain, penggunaan kapasitor bank berpotensi menimbulkan harmonisa saat proses *switching* dan menuntut desain khusus pada PMT atau pengontrol *switching*. [5], bagian-bagian kapasitor ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Ilustrasi bagian-bagian kapasitor [4].

a. Elemen kapasitor

Komponen dasar penyusun kapasitor adalah elemen kapasitif, yang berupa lilitan lembaran tipis aluminium dan lapisan polimer tipis berbentuk film (*plastic film*).

b. Unit kapasitor

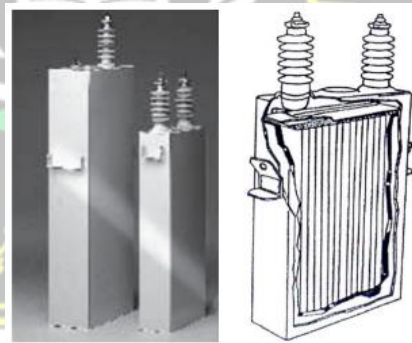
Sebuah unit kapasitor tersusun dari beberapa elemen kapasitor yang dirangkai dalam matriks seri dan paralel (lihat Gambar 2.1). Biasanya, sebuah unit terdiri dari sekitar 40 elemen. Rangkaian seri digunakan untuk meningkatkan kemampuan menahan tegangan, sedangkan rangkaian paralel bertujuan untuk meningkatkan daya reaktif (VAR). Unit kapasitor juga dilengkapi dengan resistor sebagai perangkat pelepasan muatan (*discharge device*). Rating tegangan unit kapasitor berkisar antara 240 V hingga 25 kV, dan rating kapasitasnya antara 2,5 kVAR hingga 1 MVAR.

Menurut IEEE Std 18-1992 dan Std 1036-1992 [4] dinyatakan bahwa:

1. Unit kapasitor harus mampu beroperasi terus menerus pada rating $110\% V_{RMS}$ dan tegangan puncak tidak melebihi $1,2 \sqrt{2} V_{RMS}$ serta harus mampu dilalui arus sebesar $135\% I_{Nominal}$.
2. Pada rating tegangan dan frekuensi, daya reaktif harus berkisar antara 100% sampai 115% rating daya reaktif.

c. Bank kapasitor

Unit-unit kapasitor dipasang pada rak baja galvanis untuk membentuk sebuah bank kapasitor yang terdiri dari unit-unit kapasitor fasa tunggal. Kebutuhan tegangan dan daya menentukan berapa banyak unit kapasitor yang dibutuhkan dalam sebuah bank. Untuk aplikasi dengan kebutuhan daya dan tegangan yang lebih besar, unit-unit kapasitor dirangkai secara seri dan paralel.. Unit kapasitor ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Unit kapasitor [4].

2.2.4 Kapasitor Koneksi (Y)

Koneksi ini terdiri dari gabungan koneksi seri dan parallel dari unit kapasitor di setiap fasa [6]. Secara umum koneksi ini dibagi menjadi 2, yaitu:

1. Terhubung ke tanah (*Grounded-Y*)

Keuntungan koneksi ini adalah:

- a. Konfigurasi koneksi ini dicirikan oleh impedansi rendah terhadap tanah, yang memberikan proteksi terhadap arus impuls petir dan

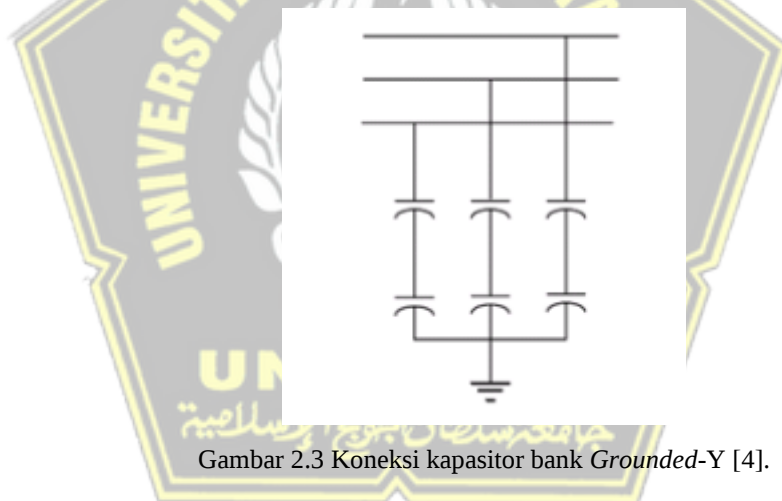
berbagai fenomena tegangan surja. Implikasinya, bank kapasitor yang menggunakan koneksi ini dapat dioperasikan tanpa perangkat arrester, mengingat kapasitas inherent kapasitor dalam meredam surja.

- b. Meminimalisir dampak tegangan transient pada PMT dan peralatan pensaklaran lainnya.

Kelemahan koneksi ini adalah:

- a. Distorsi harmonik dan fenomena arus *inrush* berpotensi menyebabkan *maloperation* atau sensitivitas yang berlebihan pada perangkat proteksi seperti relai dan *fuse*..
- b. Reaktor seri fasa dibutuhkan untuk meminimalisir tegangan yang timbul pada sisi sekunder CT akibat pengaruh frekuensi tinggi dan amplitudo arus yang besar..

Koneksi kapasitor secara *Grounded-Y* ditunjukkan pada Gambar 2.3.

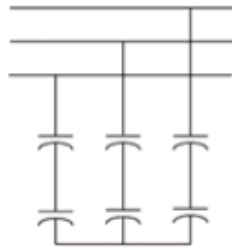


Gambar 2.3 Koneksi kapasitor bank *Grounded-Y* [4].

2. Tidak terhubung ke tanah (*Ungrounded-Y*)

Konfigurasi koneksi ini membatasi sirkulasi arus urutan nol, arus harmonik orde tiga, dan arus *discharge* beramplitudo besar pada kapasitor (meskipun arus *discharge* yang signifikan masih dapat terjadi selama kondisi gangguan antar fasa). Keunggulan lainnya adalah pengurangan *overvoltage* pada sekunder *Current Transformer* (CT) dibandingkan dengan konfigurasi *grounded-Y*, meskipun demikian, isolasi yang memadai pada titik netral, setidaknya setara dengan tegangan *line*, merupakan persyaratan penting. Kapasitor yang terpasang

di GI 150 kV Kebasen menggunakan koneksi ini, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Koneksi kapasitor bank *Ungrounded-Y* [4].

2.2.5 Tegangan dan arus transien

Standar IEEE 1100-1999 mendefinisikan transien sebagai gangguan pada sebagian kecil siklus gelombang AC, yang ditandai dengan perubahan bentuk gelombang yang tiba-tiba dan singkat. [1].

Gejala transien ditandai dengan perubahan nilai tegangan, arus, atau bahkan keduanya secara bersamaan, yang terjadi dalam jangka waktu tertentu dan menyimpang dari kondisi stabil atau tunak (*steady state*). Perubahan ini dapat dipicu oleh faktor-faktor eksternal yang berasal dari lingkungan di luar sistem, contohnya sambaran petir, atau oleh faktor-faktor internal yang berasal dari dalam sistem itu sendiri, seperti proses pensaklaran atau *switching*. [2].

Arus transien adalah lonjakan arus awal yang terjadi saat rangkaian dihubungkan dengan beban. Persamaan arus transien pada proses *switching* untuk kapasitor bank tunggal seperti pada Persamaan (2.1).

$$I_{peak} = \sqrt{2} \sqrt{I_{sc} I_1} \quad (2.1)$$

dengan :

I_{peak} : Arus inrush maksimum (A)

I_{sc} : Arus hubung singkat (A)

I_1 : Arus dasar (A)

Nilai arus hubung singkat (I_{sc}) didapat dari data arus hubung singkat GI/GITET Sistem Jawa Bali semester 2 tahun 2024 yang dikeluarkan oleh UP2B Jawa-Bali dimana untuk GI 150 kV Kebasen arus hubung singkat 3 fasa adalah 7,47 kA seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.3 [8].

Tabel 2.3 Arus hubung singkat GI 150 kV Kebasen.

Busbar	Substation	UP2B	Voltage	IHS KIT DMN ROB July 2024		IHS KIT Aktif ROB July 2024	
			kV	1ph(kA)	3ph(kA)	1ph(kA)	3ph(kA)
1	KEBASEN	UP2B Central Java & DIY	150	5.15	7.48	5.14	7.47
2	KEBASEN	UP2B Central Java & DIY	150	5.15	7.48	5.14	7.47

Sebelum menghitung arus transien maka diperlukan perhitungan arus dasar (I_1). Arus dasar dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.2).

$$I_1 = \frac{Q_C}{\sqrt{3}V} \quad (2.2)$$

dengan :

I_1 : Arus dasar (A)

Q_C : Kapasitas kapasitor (VAR)

V : Tegangan nominal (V)

Operasi *switching* PMT pada sistem tenaga listrik menimbulkan fenomena transien berupa lonjakan tegangan dan arus. Pada saat penutupan PMT, terjadi lonjakan arus dengan magnitude yang signifikan dalam rentang waktu yang sangat singkat, berkisar antara mikrodetik hingga milidetik. Lonjakan arus ini dikenal sebagai arus transien. [2].

2.2.6 Pengaturan *switching* kapasitor

Proses *switching* pada bank kapasitor tegangan tinggi menimbulkan arus transien yang besar. Metode yang umum digunakan untuk mengatasi hal ini antara lain pemasangan reaktor peredam (*damping reactor*), resistor pra-sisipan (*pre-insertion resistor*), induktor pra-sisipan (*pre-insertion inductor*), dan pengaturan *switching* (*controlled switching*).

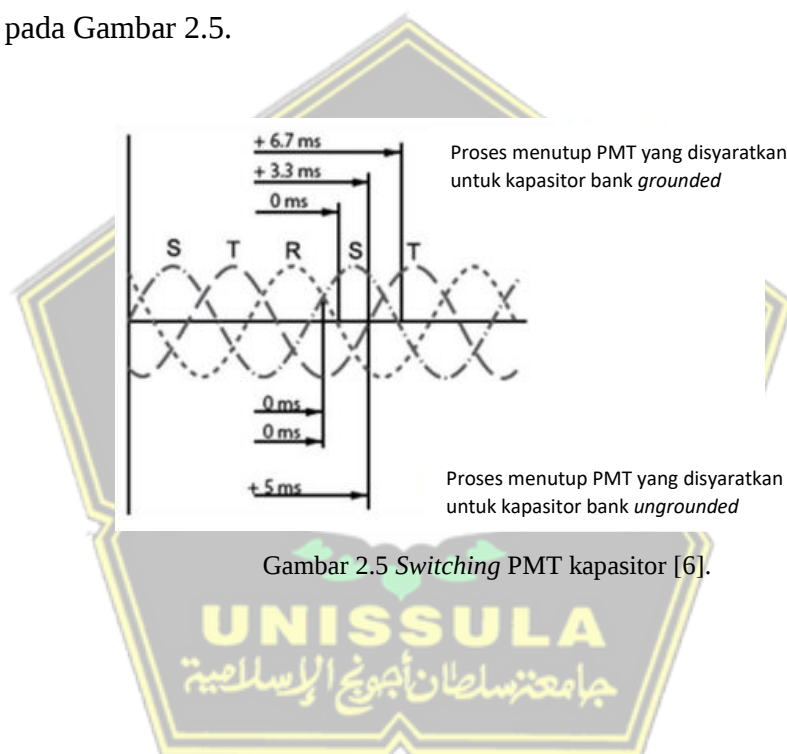
Kondisi kapasitor yang belum bermuatan saat dimasukkan ke sistem dapat memicu kondisi seperti hubung singkat, menghasilkan lonjakan arus (*inrush*) yang sangat besar dan penurunan tegangan yang cukup signifikan. Untuk meminimalkan arus transien tersebut, penutupan PMT kapasitor harus dilakukan saat tegangan sesaat pada kontaknya bernilai nol. Metode pengaturan penutupan PMT ini disesuaikan dengan sistem pentanahan netral bank kapasitor.

a. *Switching* pada kapasitor bank yang ditanahkan

Jika kapasitor bank ditanahkan maka setiap fasa berdiri sendiri dan pemasukan setiap fasa berbeda $1/6$ cycle atau 30° listrik (3,3 ms untuk sistem 50 Hz).

b. *Switching* pada kapasitor bank yang tidak ditanahkan

Jika kapasitor bank tidak ditanahkan maka 2 (dua) fasa pertama harus masuk pada saat perbedaan tegangan diantara kedua fasa tersebut sama dengan nol sedangkan fasa ketiga dimasukkan $1/4$ cycle atau 45° listrik (5ms untuk sistem 50Hz) setelah kedua fasa lainnya masuk, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5.



2.2.7 Metode-metode pengontrolan *switching* kapasitor

Terdapat beberapa metode yang digunakan untuk pengontrolan *switching* kapasitor [1], diantaranya adalah sebagai berikut:

1. *Switching* tanpa menggunakan pembatas untuk mengurangi tegangan dan arus transien yang melewati peralatan *switching*. Metode ini banyak digunakan pada kapasitor bank berkapasitas kecil, seperti capacitor yang dipasang pada penyulang (*feeder*) distribusi.

2. Implementasi induktor (reaktor) pada bank kapasitor di mana induktor tersebut akan terus menerus di-*energize* selama pengoperasian *capacitor bank*. Berikut adalah *nameplate* damping reaktor yang terpasang, seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2.4.

Tabel 2.4 *Nameplate damping* reaktor Bay Kapasitor GI 150 kV Kebasen.

Parameter	Value	Unit
Manufacturer	TRENCH LIMITED	
Equipment Type	CAPACITOR REACTOR	
Country of Manufacture	CANADA	
Serial Number	28221-2	
Total Weight	149	kg
Year of Manufacture	2004	
Temperature Rise (TEMP RISE)	80	°C
Number of Phases	1	
Type of Cooling	NATURAL AIR	
Measured Impedance	0.503	Ω
Measured Impedance	0.509	Ω
Frequency (FREQ)	50	Hz
Temperature Rise Class	130	
Continuous Current	96	A
Thermal	2.4 kA 1 sec	
System Voltage	170	kV
BIL (Basic Impulse Level)	750	kV
Voltage Drop	0.048	kV
Mechanical Peak Current	6.12	kA
Altitude	1000	meters
Specification Number & Year	IEC 289-1985	
IRSS	142	A
kVA	4.63	

Penempatan induktor dimaksudkan untuk membatasi magnitude *inrush current* di bawah level kemampuan peralatan *switching*. Akan tetapi, pengoperasian induktor secara kontinu (*energized*) menghasilkan disipasi energi dalam bentuk panas yang disebabkan oleh resistansi. Implementasi metode ini diterapkan pada GI 150 kV Kebasen.

3. *Pre-Insertion Inductor* adalah metode peredaman transien dengan memasukkan induktor sementara, lalu di-*bypass*. Metode ini membatasi

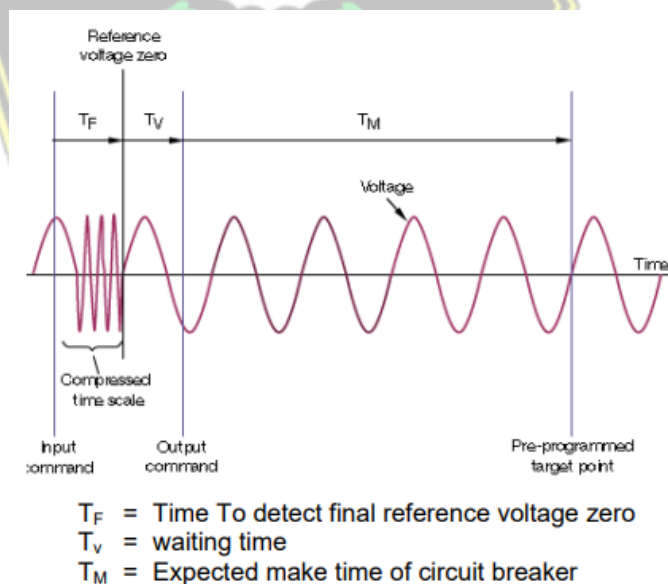
transien saat *switching* kapasitor, tetapi tetap menghasilkan rugi-rugi panas hingga induktor di-bypass.

4. *Pre-Insertion Resistor* serupa dengan *pre-insertion inductor* dalam membatasi *inrush current* saat *switching*. Resistor dipasang paralel selama *switching*, lalu dilepas dengan saklar bantu (*auxiliary switch*).
5. *Switching Controller*, juga dikenal sebagai *point to wave*, *Synchronous Switching*, atau *Zero-Crossing Breaker*, mengatur penutupan setiap fase PMT pada titik nol gelombang tegangan untuk menghilangkan *transient current*. Metode ini memerlukan ketepatan waktu dan kontrol yang presisi.

2.2.8 Switching controller

Pengontrolan *switching* kapasitor meredam transien dengan mengatur waktu *switching*. Perintah buka/tutup PMT ditunda hingga gelombang mencapai titik nol (*zero crossing*) untuk *switching* yang tepat.

Setelah bank kapasitor di-energize, *switching controller* menerima perintah *input* dan mulai bekerja. *Controller* akan menentukan waktu referensi berdasarkan sudut fase tegangan pada *busbar*, kemudian menghitung penundaan waktu yang tepat sebelum mengirimkan perintah *close* ke PMT. [1]. Prinsip kerja *switching controller* ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Prinsip kerja switching controller [1].

2.2.9 Persamaan yang digunakan untuk model simulasi EMTP

Untuk menentukan nilai parameter yang digunakan dalam komponen model simulasi EMTP maka diperlukan persamaan-persamaan untuk mengonversi data yang ada di lapangan menjadi data yang sesuai dengan parameter komponen model simulasi EMTP.

Penentuan amplitudo tegangan (V_A), maka digunakan persamaan (2.3).

$$V_A = \frac{\sqrt{2} \times V}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

dengan :

V_A : Amplitudo tegangan (V)

V : Tegangan sistem (V)

Penentuan impedansi sumber (Z), maka digunakan persamaan (2.4) sampai dengan (2.9).

$$MVA_{SC} = \sqrt{3} \times V \times I \quad (2.4)$$

dengan :

MVA_{SC} : MVA short circuit (MVA)

V : Tegangan sistem (V)

I : Arus short circuit 3 fasa (A)

$$Z_S = \frac{kV^2}{MVA_{SC}} \quad (2.5)$$

dengan :

Z_S : Impedansi sumber (Ohm)

MVA_{SC} : MVA short circuit (MVA)

kV : Tegangan sistem (kV)

$$\delta = \cos^{-1} \alpha \quad (2.6)$$

dengan :

δ : Sudut fasa ($^\circ$)

α : Faktor daya

$$R = Z_S \cos \delta \quad (2.7)$$

dengan :

R : Resistansi (Ohm)

Z_S : Impedansi sumber (Ohm)

δ : Sudut fasa ($^\circ$)

$$XL = Z_S \sin \delta \quad (2.8)$$

dengan :

XL : Reaktansi induktif (Ohm)

Z_S : Impedansi sumber (Ohm)

δ : Sudut fasa ($^\circ$)

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (2.9)$$

dengan :

L : Induktansi (H)

XL : Reaktansi induktif (Ohm)

f : Frekuensi sistem (Hz)

Penentuan rasio trafo, yaitu perbandingan tegangan pada sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah, maka digunakan persamaan (2.10).

$$n = \frac{HV}{LV} \quad (2.10)$$

dengan :

n : Rasio trafo

HV : Tegangan sisi primer (V)

LV : Tegangan sisi sekunder (V)

Penentuan nilai R dan L di sisi beban 20 kV yang digunakan sebagai pengganti beban pelanggan, maka digunakan persamaan (2.11) dan (2.12).

$$R = \frac{\sqrt{3} \cdot V^2}{MVA \cdot \alpha} \quad (2.11)$$

dengan :

R : Resistansi (Ohm)

V : Tegangan sisi sekunder (V)

MVA : Daya (MVA)

α : Faktor daya

$$L = \frac{\sqrt{3}V^2}{2\pi f MVA \cdot \sin(\cos^{-1} \alpha)} \quad (2.12)$$

dengan :

L : Induktansi (H)

f : Frekuensi (Hz)

MVA : Daya (MVA)

α : Faktor daya

Penentuan nilai kapasitansi dari kapasitor bank yang terpasang dan beroperasi saat ini berdasarkan kapasitas kapasitor, maka digunakan persamaan (2.13).

$$C = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot V^2 \cdot 2\pi f} \quad (2.13)$$

dengan :

C : Kapasitansi (F)

f : Frekuensi (Hz)

Q : Daya reaktif (MVar)

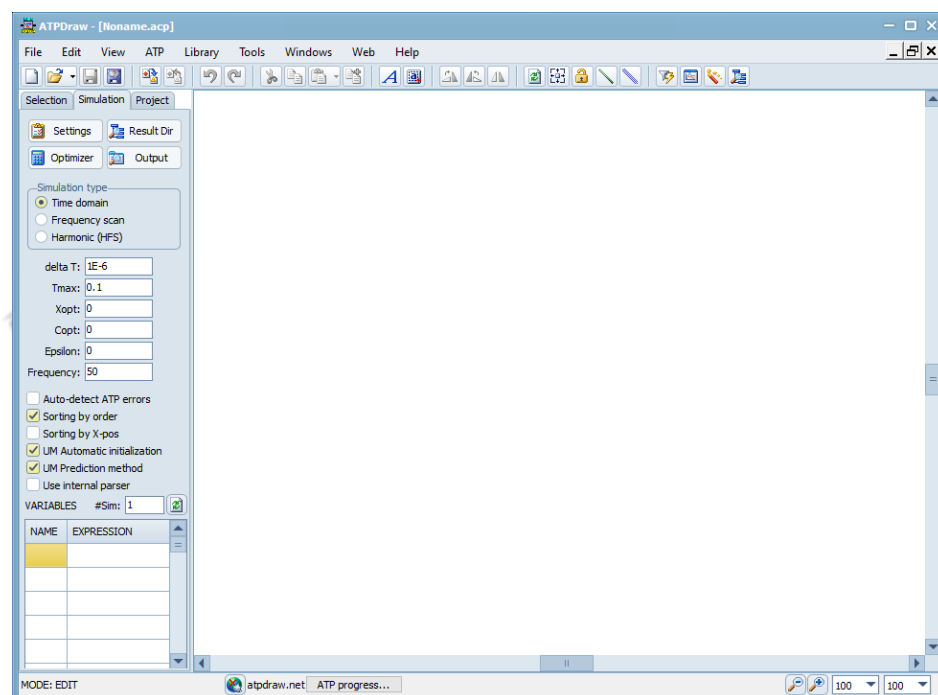
V : Tegangan sistem (V)

2.2.10 EMTP (*Electromagnetic Transients Program*)

EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) adalah basis dari aplikasi ATPDraw untuk operasi sistem *Windows* yang merupakan praprosesor grafis yang digerakkan oleh *mouse* untuk versi ATP dari EMTP. ATPDraw memungkinkan pengguna untuk membuat model digital dari rangkaian yang akan disimulasikan menggunakan *mouse* dan memilih komponen yang telah ditentukan sebelumnya dari palet yang luas, secara interaktif. Kemudian ATPDraw menghasilkan file input untuk simulasi ATP dalam format yang sesuai berdasarkan "apa yang Anda lihat adalah apa yang Anda dapatkan".

Penamaan node sirkuit diatur oleh ATPDraw, sehingga pengguna hanya perlu memberi nama pada node yang memiliki fungsi khusus.

ATPDraw akan sangat berguna bagi pengguna baru ATP-EMTP dan merupakan alat yang sangat baik untuk tujuan pendidikan. Namun, kemungkinan pemodelan multi-lapisan menjadikan ATPDraw sebagai prosesor *front-end* yang kuat bagi para profesional dalam analisis transien sistem tenaga listrik [7]. Gambar 2.7 menunjukkan tampilan awal *software* ATPDraw yang digunakan.



Gambar 2.7 Tampilan ATPDraw.

ATPDraw adalah merek dagang dan hak cipta oleh Universitas Sains dan Teknologi Norwegia, Norwegia. Pengembang program adalah Dr. Hans Kristian Høidalen di Trondheim, Norwegia, dengan Dahl Data Design di Norwegia sebagai sub-kontraktor pemrograman dan SYSTRAN Engineering Services di Hongaria sebagai sub-kontraktor untuk dokumentasi program. Pengembangan program sebagian besar dibiayai oleh Bonneville Power Administration di Portland, Oregon, AS, dengan Pacific Engineering Corporation sebagai koordinator proyek [7]. Pengembangan versi 5 juga didanai bersama oleh Kelompok Pengguna EMTP Eropa dan Schneider Electric.

Alternative Transients Program (ATP) adalah salah satu sistem program universal yang paling banyak digunakan untuk simulasi digital fenomena transien yang bersifat elektromagnetik dan elektromekanis dalam sistem tenaga listrik. Dengan program digital ini, jaringan kompleks dan sistem kontrol dengan struktur seperti apapun dapat disimulasikan. ATP memiliki kemampuan pemodelan yang luas dan fitur penting tambahan selain komputasi transien.

ATP-EMTP digunakan di seluruh dunia untuk analisis *switching* dan surja petir, koordinasi isolasi dan studi osilasi torsi poros, pemodelan relai proteksi, studi harmonik dan kualitas daya, serta pemodelan HVDC dan FACTS. Studi EMTP yang umum adalah:

1. Studi tegangan lebih petir
2. Peralihan transien dan gangguan
3. Studi tegangan lebih secara statistik dan sistematis
4. Transien yang sangat cepat pada GIS dan grounding
5. Pemodelan mesin
6. Stabilitas sementara, penyalaan motor
7. Osilasi torsi poros
8. Pergantian transformator dan reaktor/kapasitor shunt
9. Resonansi ferro
10. Aplikasi elektronika daya
11. Tugas pemutus arus (busur listrik), pemutusan arus
12. Perangkat FACTS: pemodelan STATCOM, SVC, UPFC, TCSC
13. Analisis harmonik, resonansi jaringan
14. Pengujian perangkat proteksi

ATP tersedia untuk sebagian besar platform PC berbasis Intel di DOS, Windows 3.1/9x/NT, OS/2, Linux dan juga untuk komputer lain (misalnya, Digital Unix dan VMS, Apple Mac, dll.). Sebagian besar pengguna, termasuk pengembang program, menggunakan PC berbasis Intel Pentium dengan MS-Windows 9x/NT. Konfigurasi PC Pentium standar dengan min. RAM 128 MB, hard disk (ruang kosong 20 MB) dan grafis VGA cukup untuk menjalankan ATP di MS-Windows. Versi program paling populer saat ini:

1. MS-Windows 9x/NT/2000/XP/Vista™: GNU-Mingw32 32-bit dan Watcom ATP
2. Linux: ATP versi GNU

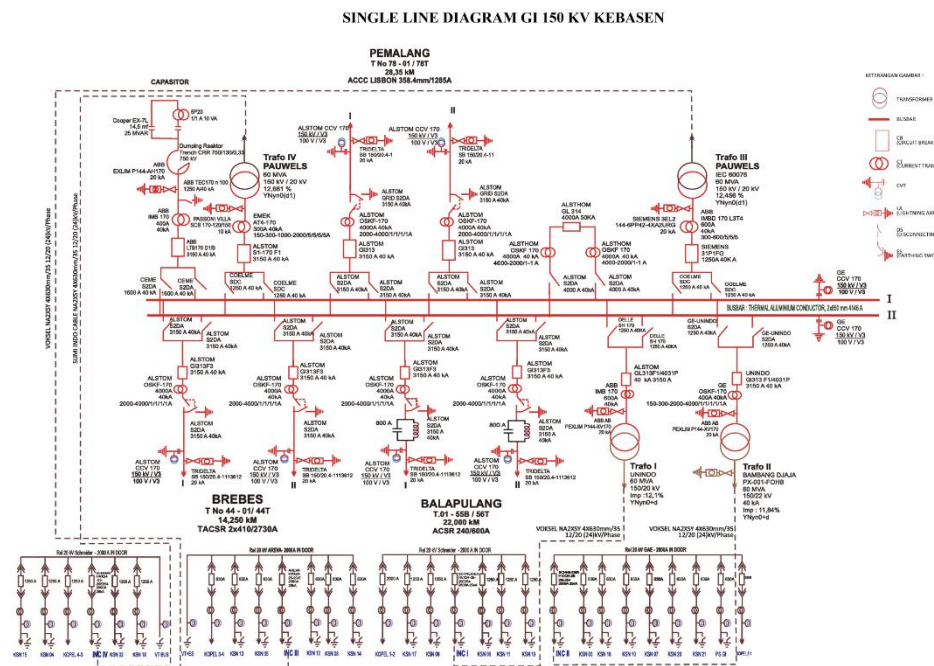


BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Model Penelitian

Penelitian ini mengambil lokasi di Gardu Induk 150 kV Kebasen yang berlokasi di Jalan Raya II, Kebasen, Talang, Kabupaten Tegal. Bay yang dipilih untuk dianalisis dan disimulasikan adalah Bay Kapasitor. Untuk mengetahui tegangan dan arus transien yang terjadi maka diperlukan *single line diagram*, data beban dan *load flow* rata-rata bulanan, serta *nameplate* peralatan. Gardu Induk 150 kV Kebasen mempunyai tegangan kerja 150 kV/20 kV, yaitu tegangan 150 kV di sisi primer transformator yang diturunkan menjadi 20 kV di sisi sekunder transformator yang selanjutnya didistribusikan ke pelanggan melalui penyulang-penyulang yang ada. *Single line diagram* GI 150 kV Kebasen ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Single Line Diagram GI 150 kV Kebasen.

3.2 Alat dan Bahan

Peralatan pendukung untuk membantu menyimulasikan dan mempermudah pengerjaan penelitian adalah *software* ATPDraw 7.2. ATPDraw digunakan untuk membuat model digital dari rangkaian yang akan disimulasikan

menggunakan mouse dan memilih komponen yang telah ditentukan sebelumnya dari palet yang luas, secara interaktif. Kemudian ATPDraw menghasilkan file input untuk simulasi ATP dalam format yang sesuai berdasarkan "apa yang Anda lihat adalah apa yang Anda dapatkan". Penamaan node sirkuit diatur oleh ATPDraw, sehingga pengguna hanya perlu memberi nama pada node yang memiliki fungsi khusus. ATPDraw akan sangat berguna bagi pengguna baru ATP-EMTP dan merupakan alat yang sangat baik untuk tujuan pendidikan. Namun, kemungkinan pemodelan multi-lapisan menjadikan ATPDraw sebagai prosesor *front-end* yang kuat bagi para profesional dalam analisis transien sistem tenaga listrik. Menggunakan komputer dengan spesifikasi pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi komputer.

Model	Processor	Sistem Operasi	RAM	GPU
ASRock B760M Steel Legend Wifi	Intel® Core™ i5-13400F	Windows 11 Pro 64-bit	16 GB	NVIDIA GeForce RTX 2060 Super

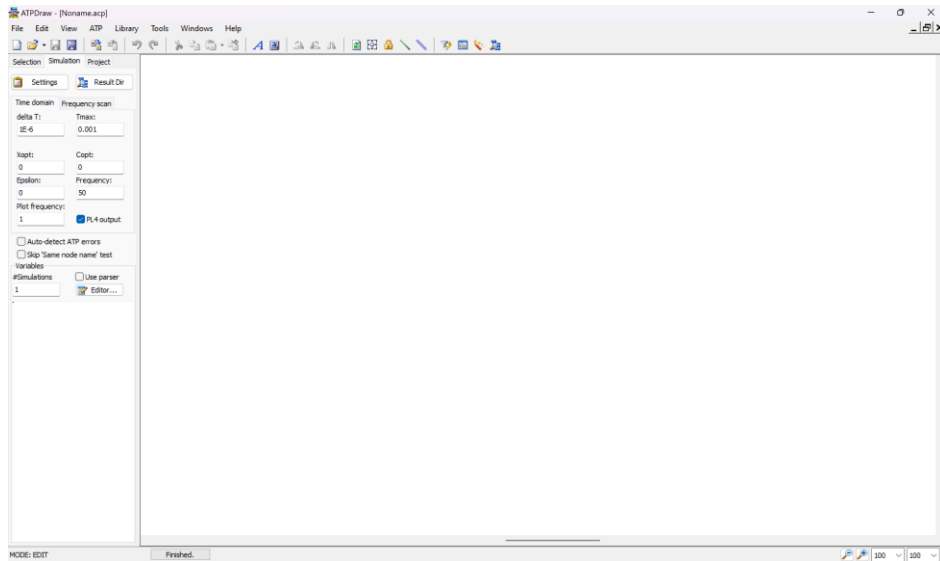
3.3 Prosedur Penelitian

Pengumpulan data dilakukan dengan mengambil data di GI 150 kV Kebasen untuk mendapatkan data spesifikasi dan *nameplate* peralatan yang terpasang, data beban bulanan, serta data impedansi beban dan impedansi sumber.

Simulasi atau pemodelan dilakukan menggunakan *software* EMTP dengan langkah – langkah sebagai berikut:

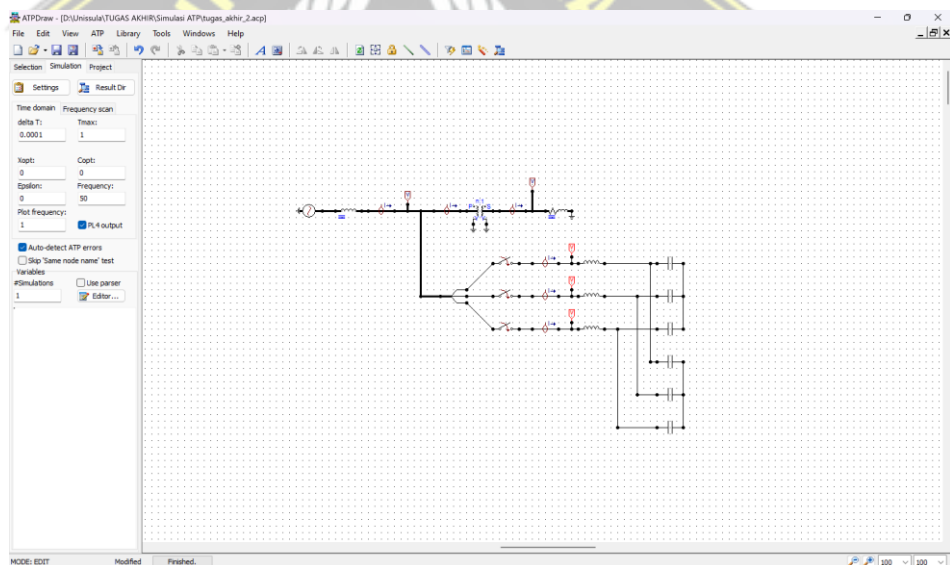
1. Menjalankan program ATPDraw

Setelah proses penginstalan berhasil, maka selanjutnya adalah menjalankan simulasi program pada *software* ATPDraw seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Tampilan awal ATPDraw.

2. Membuat *project* baru dan membuat model rangkaian pengganti untuk sistem GI 150 kV Kebasen yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Rangkaian pengganti pada *software* ATPDraw.

3. Menentukan nilai parameter pada setiap komponen di model rangkaian pengganti.

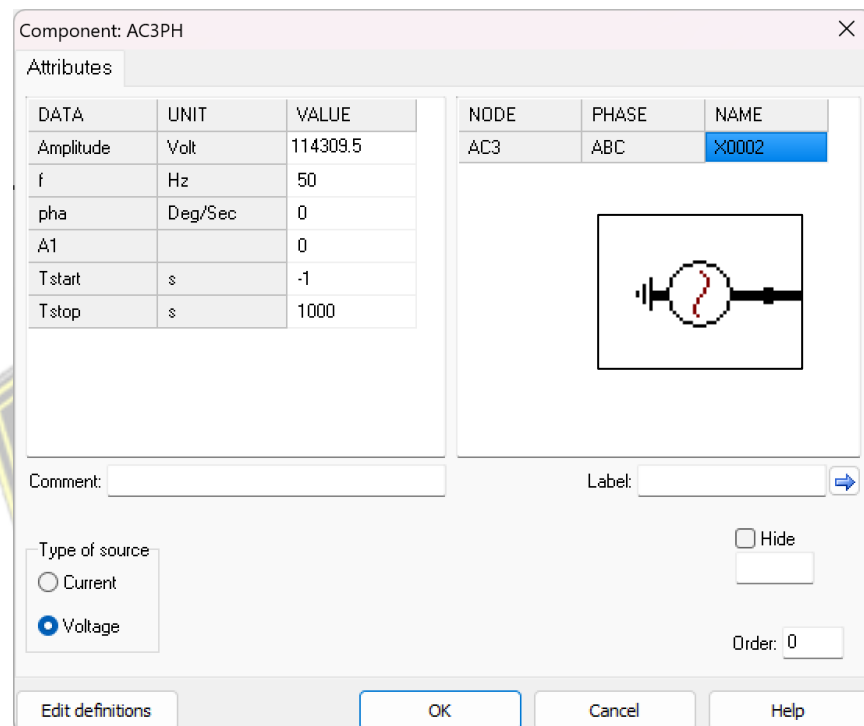
Pemodelan sistem GI 150 kV Kebasen ini diasumsikan bahwa kopel busbar dalam keadaan masuk. Tegangan sumber yang digunakan adalah 140 kV, sesuai dengan keadaan di lapangan ketika Bay Kapasitor dioperasikan. Sumber dimodelkan dengan komponen AC3PH pada *software* ATPDraw

dengan perhitungan nilai parameter *amplitude* sesuai dengan persamaan (2.3).

$$V_A = \frac{\sqrt{2} \times 140000}{\sqrt{3}}$$

$$V_A = 114309,5 \text{ V}$$

Kemudian hasil perhitungan dimasukkan ke dalam komponen AC3PH, seperti yang ditunjukkan Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Nilai parameter komponen AC3PH.

Impedansi sumber (Z_s) dimodelkan dengan komponen RLC3. Perhitungan impedansi sumber dibutuhkan data arus hubung singkat yang tercantum pada Tabel 2.3 untuk menghitung nilai MVA_{SC} , diketahui bahwa nilai arus hubung singkat 3 fasa GI 150 kV Kebasen adalah 7,47 kA. Mengacu pada persamaan (2.4) dan (2.5).

$$MVA_{SC} = \sqrt{3} \times 150000 \times 7470$$

$$MVA_{SC} = 1940,76 \text{ MVA}$$

$$Z_s = \frac{150^2}{1940,76}$$

$$Z_s = 11,59 \Omega$$

Diasumsikan nilai faktor daya adalah 0.9, maka ditentukan sudut impedansi serta nilai R dan L untuk model sistem rangkaian pengganti dengan perhitungan sesuai dengan persamaan (2.6) sampai dengan (2.9).

$$\delta = \cos^{-1} 0,9$$

$$\delta = 25,84^\circ$$

Sehingga diketahui nilai R dan L:

$$R = 11,59 \times 0,9$$

$$R = 10,45 \Omega$$

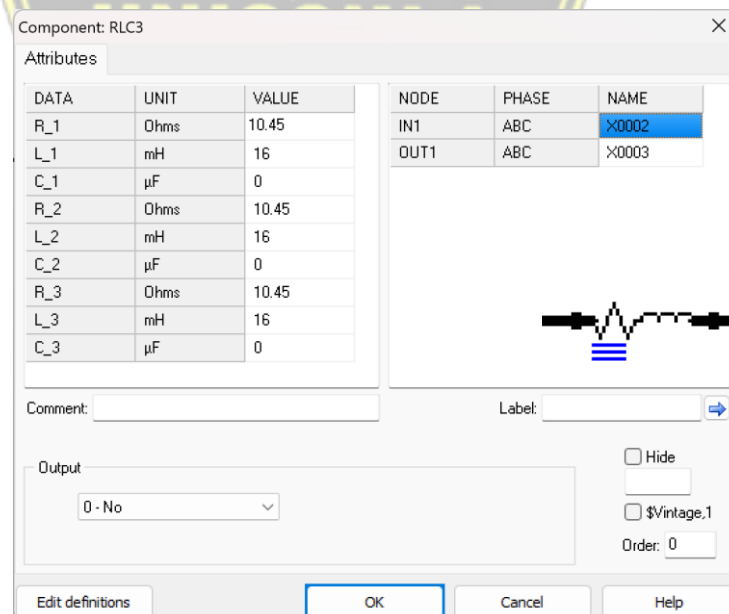
$$XL = 11,59 \times 0,435$$

$$XL = 5,03 \Omega$$

$$L = \frac{5,03}{2\pi \times 50}$$

$$L = 16 \text{ mH}$$

Hasil perhitungan nilai resistansi (R) dan induktansi (L) dimasukkan ke dalam komponen RLC3, seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Nilai parameter komponen RLC3.

Transformator dimodelkan dengan komponen *trafo_i3* dengan nilai $n = 7.5$, dapat dilihat pada Gambar 3.6, sesuai dengan perbandingan tegangan primer dan sekunder trafo, mengacu pada persamaan (2.10).

$$n = \frac{150000}{20000}$$

$$n = 7.5$$

Component: TRAFO_I3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
n		7.5
BRANCH		0

NODE	PHASE	NAME
P	ABC	X0004
PN	1	
S	ABC	X0005
SN	1	

Comment:

Label:

☐ Hide

Order:

Edit definitions OK Cancel Help

Gambar 3.6 Nilai parameter komponen TRAFO_I3.

GI 150 kV Kebasen memiliki 4 unit trafo tenaga dengan masing-masing unit berkapasitas 60 MVA. Rata-rata beban trafo pada bulan November 2024 dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Kapasitas dan beban trafo GI 150 kV Kebasen.

Trafo	Kapasitas (MVA)	Beban	
		%	MVA
1	60	63.2	37.92
2	60	65.8	39.48
3	60	48.1	28.86
4	60	56.2	33.72
Total			139.98

Diasumsikan bahwa faktor daya beban adalah 0.9, maka dapat ditentukan nilai R dan L beban di sisi 20 kV dengan mengacu pada persamaan (2.11) dan (2.12), yang kemudian dimasukkan pada komponen RLC3 seperti yang ditunjukkan Gambar 3.7, yang terhubung dengan 4 unit trafo tersebut adalah:

$$R = \frac{\sqrt{3} \times 20^2}{139,98 \times 0,9}$$

$$R = 5,5 \, \Omega$$

$$L = \frac{\sqrt{3} \times 20^2}{2\pi \times 50 \times 139,98 \times 0,435}$$

$$L = 36,2 \, mH$$

Component: RLC3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohms	5.5
L_1	mH	36.2
C_1	μF	0
R_2	Ohms	5.5
L_2	mH	36.2
C_2	μF	0
R_3	Ohms	5.5
L_3	mH	36.2
C_3	μF	0

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	X0006
OUT1	ABC	

Comment:

Label:

Output:

☐ Hide

☐ \$Vintage,1

Order:



Gambar 3.7 Nilai parameter komponen RLC3 sebagai beban 20 kV.

Nilai dumping reaktor yang terpasang pada Bay Kapasitor GI 150 kV Kebasen adalah 0.5Ω , sehingga perlu dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai induktansi (L) dengan mengacu pada persamaan (2.9), yang dimasukkan ke dalam nilai parameter dalam komponen *ind_rp* pada Gambar 3.8, sebagai pengganti damping reaktor dalam model sistem.

$$L = \frac{0,5}{2\pi \times 50}$$

$$L = 1,592 \text{ mH}$$

Component: IND_RP

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
L	mH	1.592
Kp	Damp. 5-10	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	XX0008
To	1	XX0009

Comment: NumPh 1 Label:

Output:

☐ Hide
☐ \$Vintage,1
Order: 0

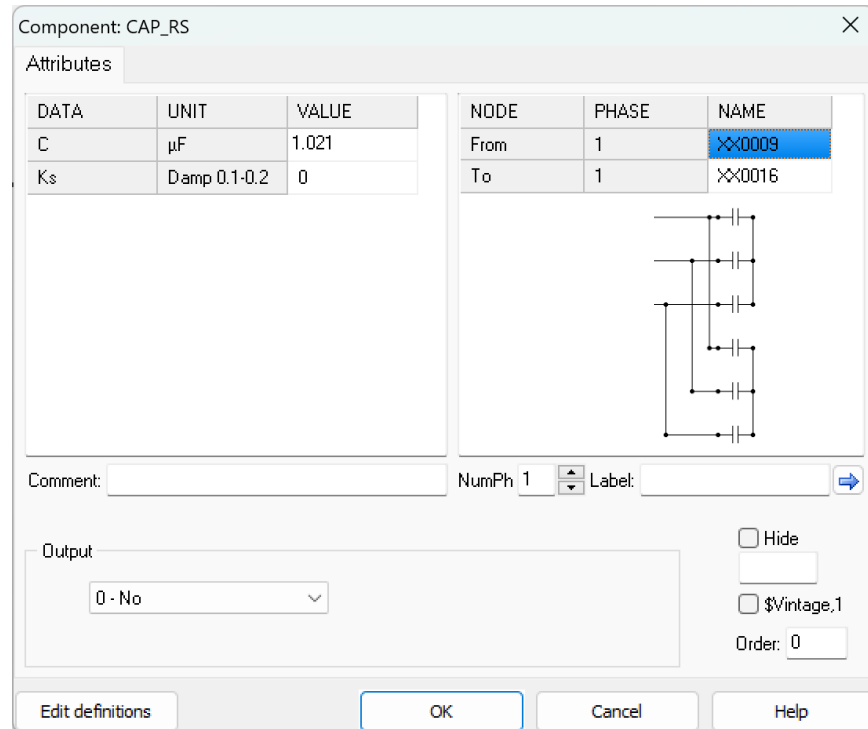
Edit definitions OK Cancel Help

Gambar 3.8 Nilai parameter komponen IND_RP sebagai dumping reaktor.

Kapasitor bank yang terdapat di GI 150 kV Kebasen, sesuai *single line diagram* pada Gambar 3.1, terhubung secara *ungrounded-Y double* sehingga terdapat 2 hubung bintang di setiap fasanya, karena kapasitas totalnya adalah 25 MVAR, maka kapasitas pada masing-masing hubung bintang adalah 12.5 MVAR. Maka, nilai C di setiap fasa ditentukan berdasarkan persamaan (2.13) kemudian dimasukkan pada parameter komponen CAP_RS seperti pada Gambar 3.9.

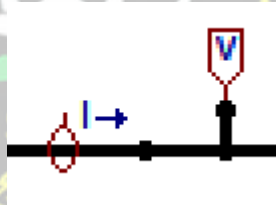
$$C = \frac{12,5}{\sqrt{3} \times 150^2 \times 2\pi \times 50}$$

$$C = 1,021 \mu F$$



Gambar 3.9 Nilai parameter komponen CAP_RS sebagai kapasitor.

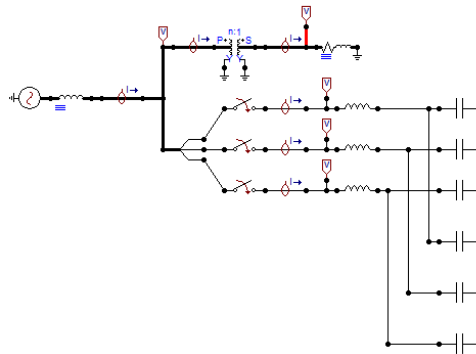
Komponen *current probe* dan *voltage probe* digunakan untuk melakukan pembacaan gelombang arus dan tegangan pada saat simulasi dijalankan ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Current probe dan voltage probe.

Setelah semua komponen telah ditentukan nilai parameter dan rangkaiannya maka didapatkan model rangkaian pengganti untuk sistem GI 150 kV Kebasen sesuai pada Gambar 3.11.

Berdasarkan data-data yang terdiri dari spesifikasi kapasitor, PMT (Tabel 2.2), *damping* reaktor (Tabel 2.4), impedansi sumber dan beban (Tabel 3.2), arus hubung singkat (Tabel 2.3), selanjutnya diolah dan dimodelkan ke dalam *software* ATPDraw yang kemudian disimulasikan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.11.

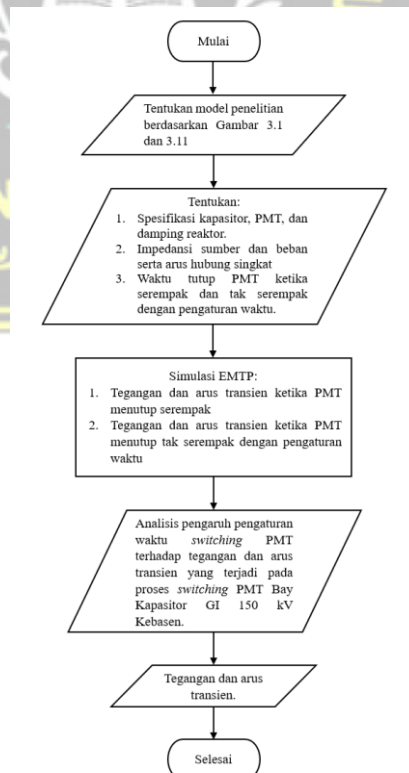


Gambar 3.11 Model ATPDraw untuk sistem GI 150 kV Kebasen.

Berdasarkan hasil simulasi didapatkan nilai dan bentuk gelombang tegangan dan arus transien yang terjadi ketika *switching* PMT saat menutup serempak dan menutup secara tidak serempak dengan pengaturan waktu.

3.4 Tahapan Penelitian

Penelitian dilaksanakan dalam beberapa tahapan yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.12 Diagram alir penelitian.

BAB IV

HASIL DAN ANALISA

4.1 Hasil

Dengan menentukan model penelitian sesuai Gambar 3.1 dan 3.11 dan data-data yang terdiri dari: spesifikasi kapasitor, PMT (Tabel 2.2), *damping* reaktor (Tabel 2.4), impedansi sumber dan beban (Tabel 3.2), arus hubung singkat (Tabel 2.3), dan waktu tutup PMT secara serempak dan tidak serempak dengan pengaturan waktu. Selanjutnya dilakukan perhitungan, dengan mengacu pada persamaan (2.1) dan (2.2) serta Tabel 2.3, dan simulasi tegangan dan arus transien ketika PMT menutup serempak dan tidak serempak dengan pengaturan waktu.

4.1.1 Perhitungan Arus Transien

Switching pada PMT Bay Kapasitor menghasilkan adanya arus transien. Lonjakan arus dengan magnitude besar yang terjadi dalam durasi sangat pendek, yaitu dalam orde mikrodetik hingga milidetik, dikenal sebagai arus transien.

Mengacu pada persamaan (2.1) dan (2.2) serta Tabel 2.3, maka nilai arus dasar (I_1) dan arus transien (I_{peak}) adalah:

$$I_1 = \frac{25 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 150 \times 10^3}$$
$$I_1 = 96,22 \text{ A}$$

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan (2.1), maka ditentukan nilai arus transien (I_{peak}). Nilai arus hubung singkat didapat dari data arus hubung singkat GI/GITET Sistem Jawa Bali semester 2 tahun 2024 yang dikeluarkan oleh UP2B Jawa-Bali [8] dimana untuk GI 150 kV Kebasen arus hubung singkat 3 fasa adalah 7,47 kA dapat dilihat pada Tabel 2.3.

$$I_{peak} = \sqrt{2} \sqrt{7,47 \times 10^3 \times 96,22}$$
$$I_{peak} = 1198,96 \text{ A}$$

Jadi, arus transien yang dialami oleh PMT Bay Kapasitor saat proses *switching* adalah 1198,96 A atau 12 kali lipat jika dibandingkan dengan arus dasar Bay Kapasitor yang hanya 96,22 A.

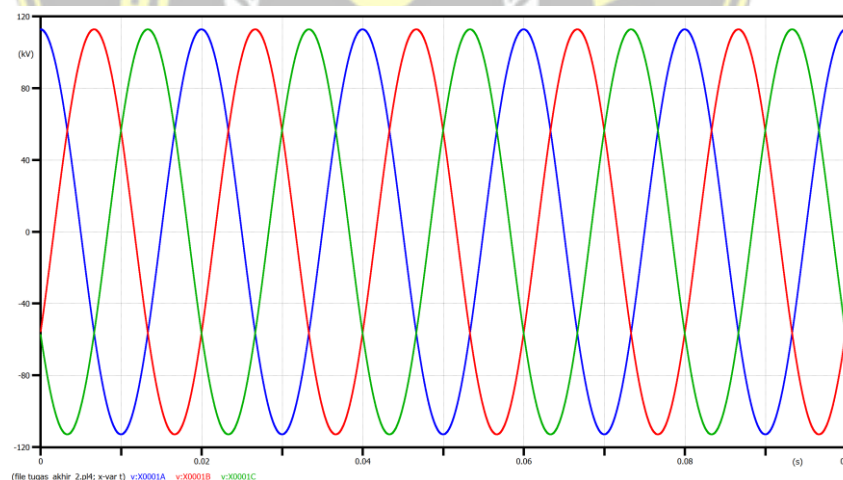
4.1.2 Simulasi EMTP

Merujuk pada model penelitian seperti Gambar 3.11, maka diketahui nilai dan bentuk gelombang tegangan dan arus transien yang terjadi ketika *switching* PMT saat menutup serempak dan menutup secara tidak serempak dengan pengaturan waktu.

Simulasi dilakukan dengan 2 (dua) kondisi yang berbeda, yaitu dalam kondisi PMT menutup secara serempak dan kondisi PMT menutup secara tidak serempak dengan pengaturan waktu tertentu sesuai dengan pengaturan *switching* PMT untuk kapasitor dengan koneksi *ungrounded-Y*.

a. Simulasi dalam keadaan PMT menutup secara serempak

Kondisi *real* di lapangan, umumnya tidak diketahui titik pasti terjadinya proses *switching* PMT pada gelombang arus maupun tegangan. Namun, pada simulasi kali ini waktu *switching* ($T_{cl} = \text{time closing}$) PMT dilakukan ketika gelombang tegangan berada di titik puncak, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Gelombang tegangan.

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa terdapat beberapa titik dimana gelombang tegangan mencapai puncak. Simulasi kali ini digunakan 4 titik gelombang sebagai sampel, yaitu pada titik 0.02 s, 0.04 s, 0.0234 s, dan 0.0249 s. Titik 0.02 s dan 0.04 s merupakan titik puncak gelombang fasa R, titik tersebut dipilih karena tegangan dan arus transien tertinggi terjadi ketika proses *switching* PMT

terjadi pada titik puncak gelombang fasa [1]. Kemudian titik 0.02 s dimasukkan pada komponen *TSWITCH* seperti pada Gambar 4.2.

Component: TSWITCH

Attributes Characteristic

DATA	UNIT	VALUE
T-cl	s	0.02
T-op	s	-1
Imar	Amps	0
T-recl	s	0
T-reop	s	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	X0001
To	1	X0007

Comment: NumPh 1 Label:

Output: 0 - No

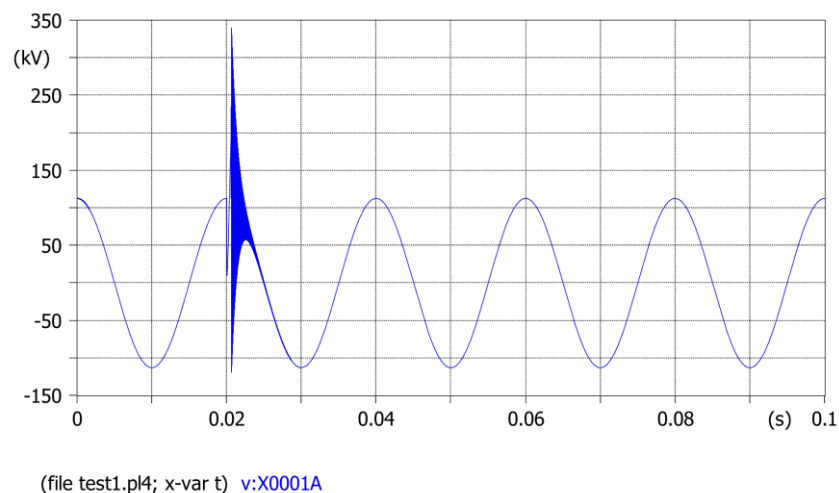
☐ Hide

Order: 0

Edit definitions OK Cancel Help

Gambar 4.2 Setting waktu menutup (T-cl) PMT 0.02 s.

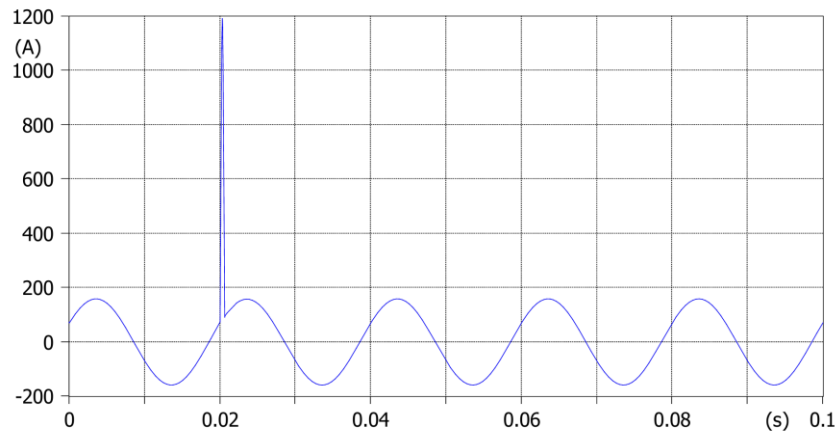
Setting waktu T-cl 0.02 s pada Gambar 4.3 diterapkan pada ketiga fasa, sehingga didapatkan hasil simulasi ketika PMT menutup serempak pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hasil simulasi tegangan di fasa R dengan T-cl = 0.02 s.

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa tegangan transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor di fasa R mencapai 337 kV atau 2.75 kali tegangan fasa nominalnya (122.4 kV).

Gambar 4.4 menunjukkan hasil simulasi arus di fasa R dengan waktu *close* (T-cl) 0.02 s.

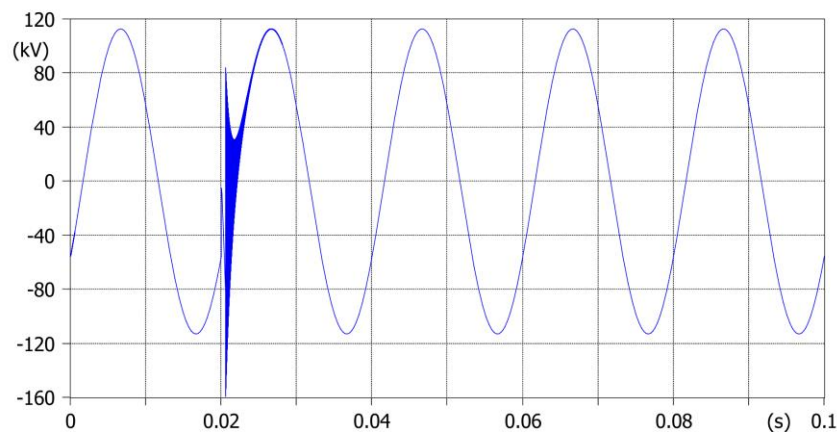


(file test1.pl4; x-var t) c:X0007A-X0001A

Gambar 4.4 Hasil simulasi arus di fasa R dengan T-cl = 0.02 s.

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa arus transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor di fasa R mencapai 1192.1 A atau 12 kali arus fasa nominalnya (96 A).

Gambar 4.5 menunjukkan hasil simulasi tegangan di fasa S dengan waktu *close* (T-cl) 0.02 s.

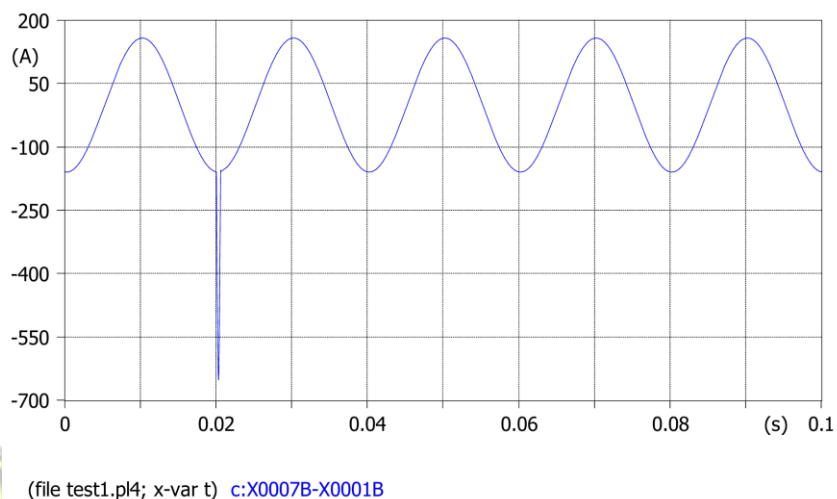


(file test1.pl4; x-var t) v:X0001B

Gambar 4.5 Hasil simulasi tegangan di fasa S dengan T-cl = 0.02 s.

Gambar 4.5 menjelaskan tentang tegangan transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor di fasa S mencapai 159.1 kV atau 1.3 kali tegangan fasa nominalnya (122.4 kV).

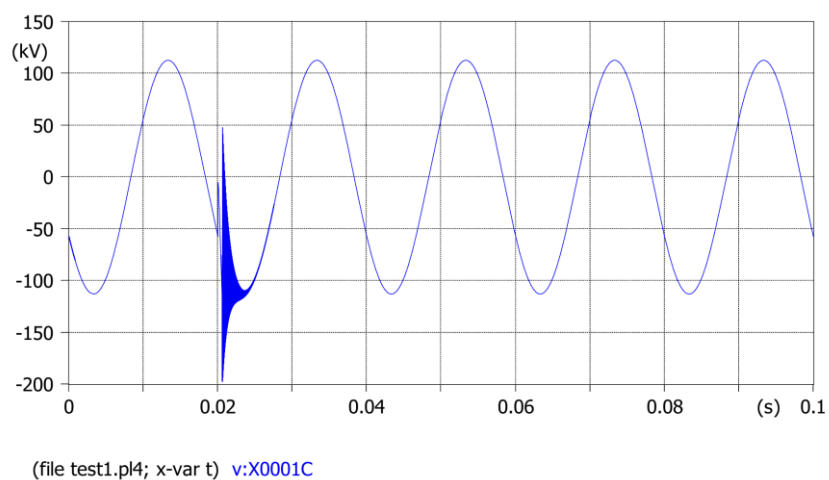
Gambar 4.6 menunjukkan hasil simulasi arus di fasa S dengan waktu *close* (T-cl) 0.02 s.



Gambar 4.6 Hasil simulasi arus di fasa S dengan T-cl = 0.02 s.

Gambar 4.6 menunjukkan bahwa arus transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor di fasa S mencapai 650.6 A atau 6.7 kali arus fasa nominalnya (96 A).

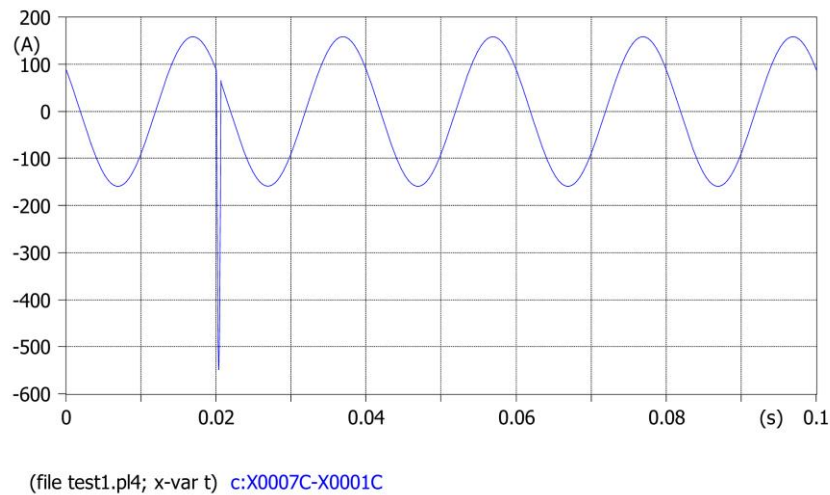
Gambar 4.7 menunjukkan hasil simulasi tegangan di fasa T dengan waktu *close* (T-cl) 0.02 s.



Gambar 4.7 Hasil simulasi tegangan di fasa T dengan T-cl = 0.02 s.

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa tegangan transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor di fasa T mencapai 197.3 kV atau 1.6 kali tegangan fasa nominalnya (122.4 kV).

Gambar 4.8 menunjukkan hasil simulasi arus di fasa T dengan waktu *close* (T-cl) 0.02 s.



Gambar 4.8 Hasil simulasi arus di fasa T dengan T-cl = 0.02 s.

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa arus transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor di fasa T mencapai 548.2 A atau 5.7 kali arus fasa nominalnya (96 A).

Gambar 4.9 menunjukkan *setting* waktu *close* (T-cl) 0.04 s.

Component: TSWITCH

Attributes Characteristic

DATA	UNIT	VALUE
T-cl	s	0.04
T-op	s	-1
Imar	Amps	0
T-recl	s	0
T-reop	s	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	X0001
To	1	X0007

Comment: NumPh 1 Label:

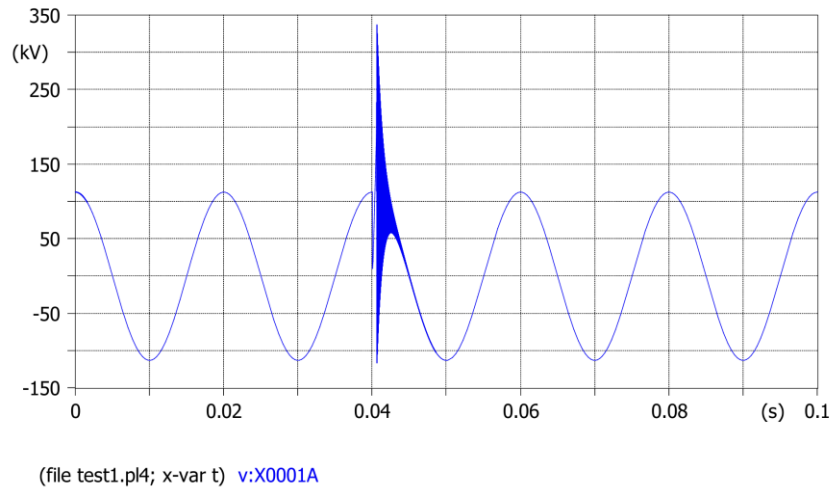
Output:

Order:

Gambar 4.9 Setting waktu menutup (T-cl) PMT 0.04 s.

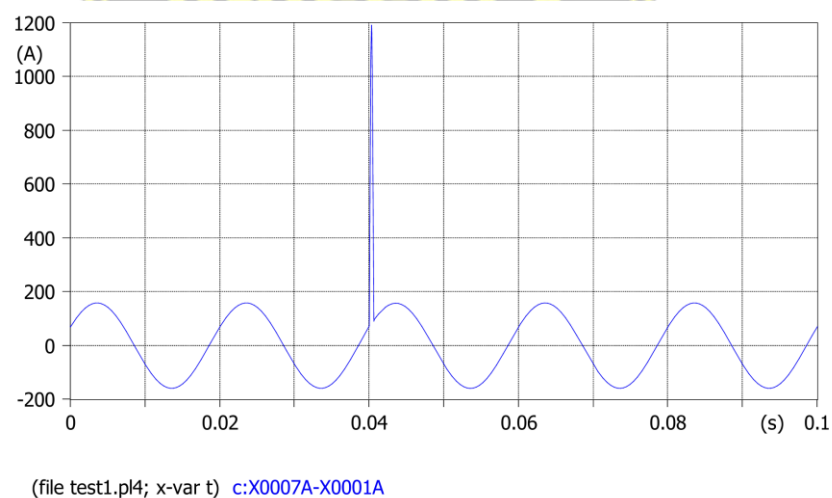
Setting waktu T-cl 0.04 s pada Gambar 4.10 diterapkan pada ketiga fasa, sehingga didapatkan hasil simulasi ketika PMT menutup serempak.

Gambar 4.10 menunjukkan hasil simulasi tegangan di fasa R dengan waktu *close* (T-cl) 0.04 s.



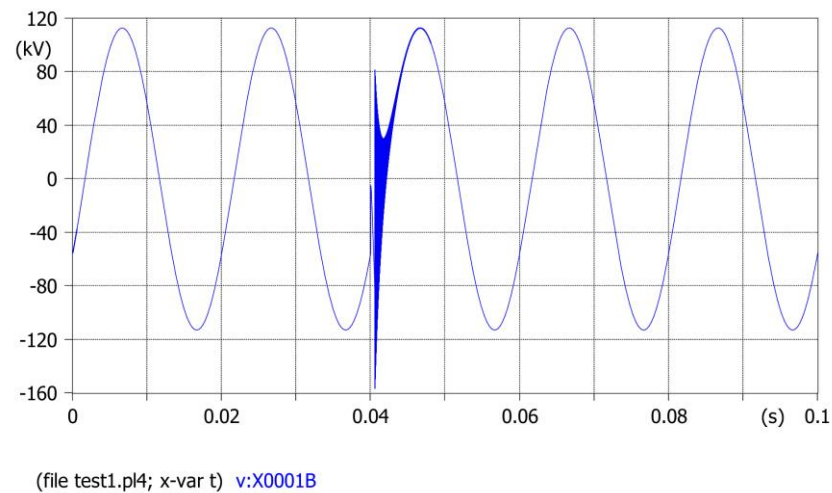
Gambar 4.10 Hasil simulasi tegangan di fasa R dengan T-cl = 0.04 s.

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa tegangan transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor di fasa R mencapai 337.3 kV atau 2.75 kali tegangan fasa nominalnya (122.4 kV). Gambar 4.11 menunjukkan hasil simulasi arus di fasa R dengan waktu *close* (T-cl) 0.04 s.



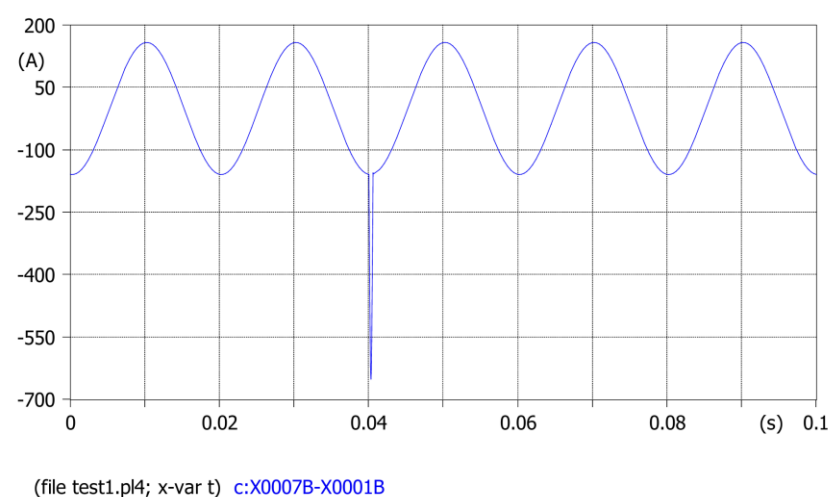
Gambar 4.11 Hasil simulasi arus di fasa R dengan T-cl = 0.04 s.

Gambar 4.11 menunjukkan arus transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor di fasa R mencapai 1192.1 A atau 12 kali arus fasa nominalnya (96 A). Gambar 4.12 menunjukkan hasil simulasi tegangan di fasa S dengan waktu *close* (T-cl) 0.04 s.



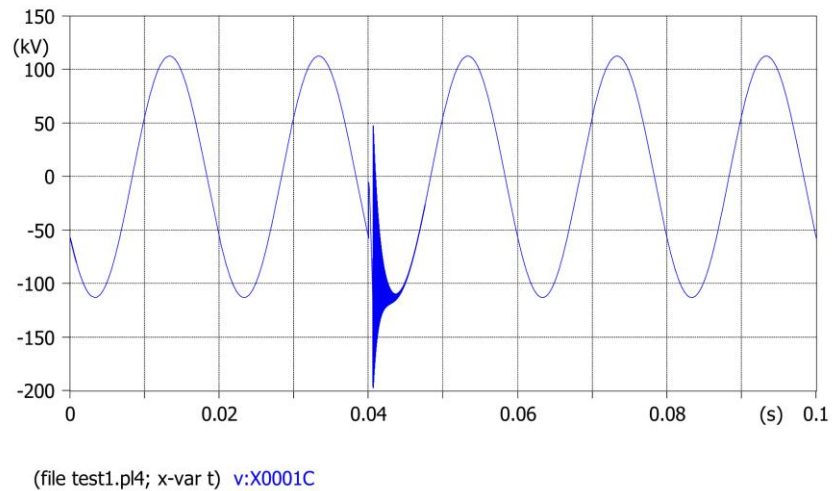
Gambar 4.12 Hasil simulasi tegangan di fasa S dengan T-cl = 0.04 s.

Gambar 4.12 menunjukkan tegangan transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor di fasa S mencapai 156.5 kV atau 1.27 kali tegangan fasa nominalnya (122.4 kV). Gambar 4.13 menunjukkan hasil simulasi arus di fasa S dengan waktu *close* (T-cl) 0.04 s.



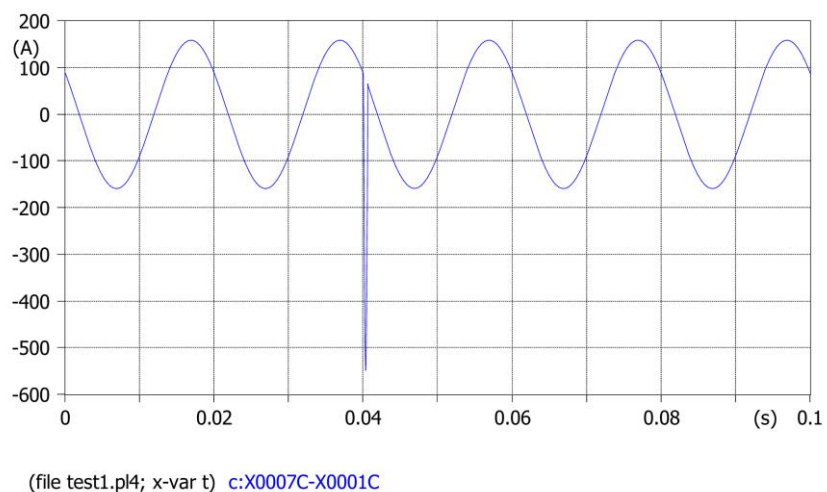
Gambar 4.13 Hasil simulasi arus di fasa S dengan T-cl = 0.04 s.

Gambar 4.13 menunjukkan bahwa arus transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor di fasa S mencapai 650.9 A atau 6.7 kali arus fasa nominalnya (96 A). Gambar 4.14 menunjukkan hasil simulasi tegangan di fasa T dengan waktu *close* (T-cl) 0.04 s.



Gambar 4.14 Hasil simulasi tegangan di fasa T dengan T-cl = 0.04 s.

Gambar 4.14 menunjukkan bahwa tegangan transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor di fasa T mencapai 197.1 kV atau 1.6 kali tegangan fasa nominalnya (122.4 kV). Gambar 4.15 menunjukkan hasil simulasi arus di fasa T dengan waktu *close* (T-cl) 0.04 s.



Gambar 4.15 Hasil simulasi arus di fasa T dengan T-cl = 0.04 s.

Gambar 4.15 menunjukkan arus transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor di fasa T mencapai 547.8 A atau 5.7 kali arus fasa nominalnya (96 A).

Gambar 4.16 menunjukkan *setting* waktu *close* (T-cl) 0.0234 s. Titik tersebut merupakan titik gelombang fasa R berada pada sudut 45° .

DATA	UNIT	VALUE
T-cl	s	0.0234
T-op	s	-1
Imar	Amps	0
T-recl	s	0
T-reop	s	0

NODE	PHASE	NAME
From	A	X0001
To	1	X0007

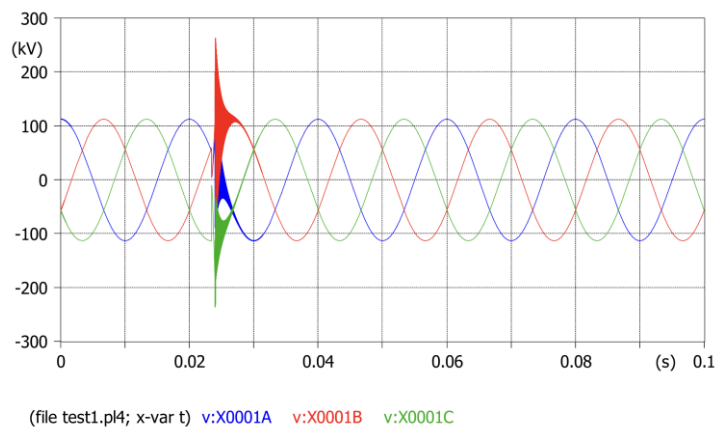
Comment: NumPh 1 Label:

Output: ☐ Hide

Order: 0

Gambar 4.16 *Setting* waktu *switching* fasa R dengan T-cl = 0.043 s.

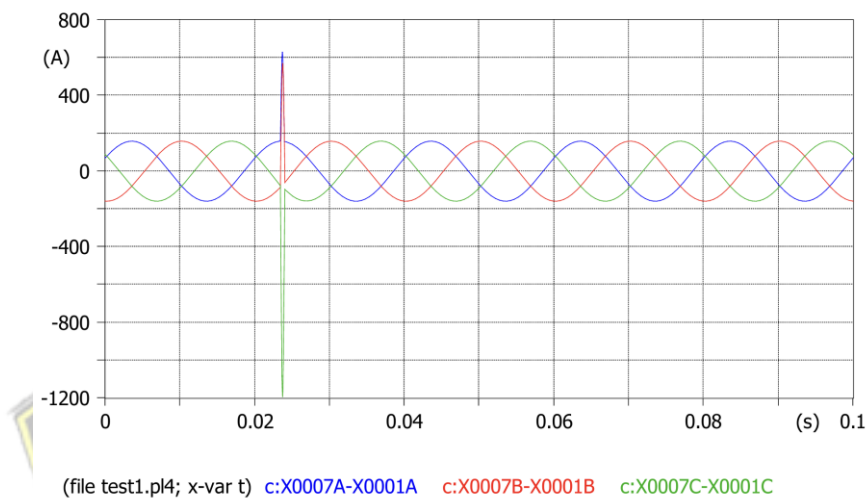
Setting waktu T-cl 0.0234 s pada Gambar 4.16 diterapkan pada ketiga fasa, sehingga didapatkan hasil simulasi ketika PMT menutup serempak pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Hasil simulasi tegangan di ketiga fasa dengan T-cl = 0.0234 s.

Gambar 4.17 menunjukkan bahwa tegangan transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor dengan *setting* waktu 0.0234 s. Masing-masing pada fasa R mencapai 159.4 kV, fasa S 263,4 kV, dan fasa T 235,7 kV. Tegangan transien tertinggi dialami oleh fasa S yang mencapai 2.1 kali tegangan fasa nominalnya (122.4 kV).

Gambar 4.18 menunjukkan hasil simulasi arus di ketiga fasa dengan waktu *close* (T-cl) 0.0234 s.



Gambar 4.18 Hasil simulasi arus di ketiga fasa dengan T-cl = 0.0234 s.

Gambar 4.18 menunjukkan arus transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor dengan *setting* waktu 0.0234 s. Masing-masing pada fasa R mencapai 630,1 A, fasa S 569,8 A, dan fasa T 1191 A. Arus transien tertinggi dialami oleh fasa T yang mencapai 12.4 kali arus fasa nominalnya (96 A).

Gambar 4.19 menunjukkan *setting* waktu *close* (T-cl) 0.0249 s. Titik tersebut merupakan titik gelombang fasa R berada pada sudut 0° .

Component: TSWITCH

Attributes Characteristic

DATA	UNIT	VALUE
T-cl	s	0.0249
T-op	s	-1
Imar	Amps	0
T-recl	s	0
T-reop	s	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	X0001
To	1	XX0007

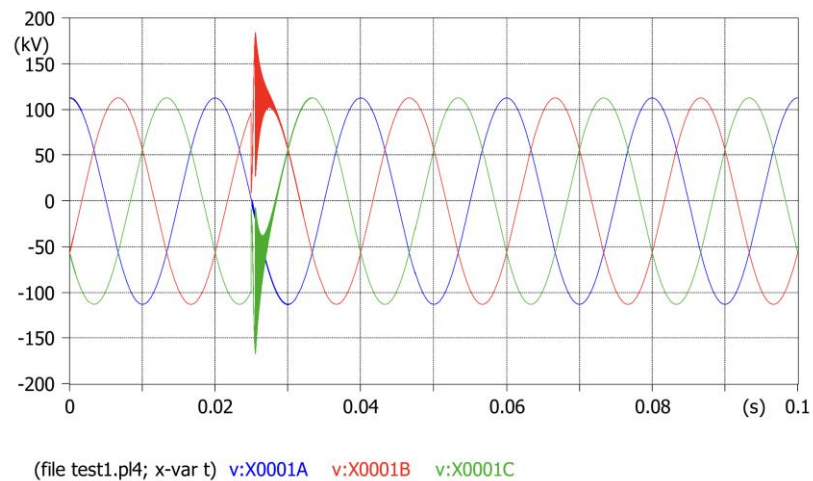
Comment: NumPh 1 Label:

Output:

Order: 0

Gambar 4.19 Setting waktu switching fasa R dengan T-cl = 0.0249 s.

Setting waktu T-cl 0.0249 s pada Gambar 4.19 diterapkan pada ketiga fasa, sehingga didapatkan hasil simulasi ketika PMT menutup serempak pada Gambar 4.20.

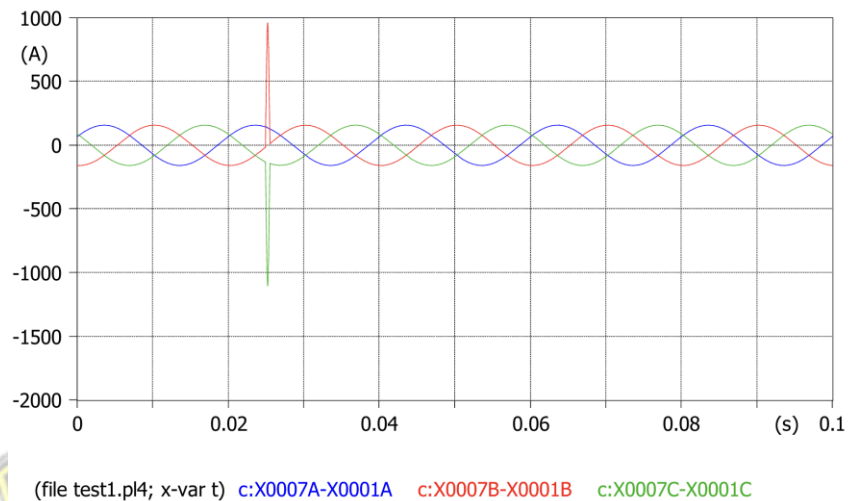


Gambar 4.20 Hasil simulasi tegangan di ketiga fasa dengan T-cl = 0.0249 s.

Gambar 4.20 menunjukkan bahwa tegangan transien akibat proses switching PMT Bay Kapasitor dengan setting waktu 0.0249 s. Fasa R tidak mengalami gejala transien karena titik switching berada pada sudut 0° dan

amplitudo tegangannya 0. Selanjutnya tegangan transien yang terjadi pada fasa S mencapai 184,3 kV sedangkan fasa T 166,7 kV. Tegangan transien tertinggi dialami oleh fasa S yang mencapai 1.5 kali tegangan fasa nominalnya (122.4 kV).

Gambar 4.21 menunjukkan hasil simulasi arus di ketiga fasa dengan waktu *close* (T-cl) 0.0249 s.



Gambar 4.21 Hasil simulasi arus di ketiga fasa dengan T-cl = 0.0249 s.

Gambar 4.21 menunjukkan arus transien akibat proses *switching* PMT Bay Kapasitor dengan *setting* waktu 0.0249 s. Fasa R tidak mengalami gejala transien karena titik *switching* berada pada sudut 0° dan amplitudo tegangannya 0. Kemudian arus transien yang terjadi pada fasa S mencapai 961,3 A sedangkan fasa T 1099,2 A. Arus transien tertinggi dialami oleh fasa T yang mencapai 11.4 kali arus fasa nominalnya (96 A).

b. Simulasi dalam keadaan PMT menutup secara tidak serempak

Untuk menentukan waktu *switching* (T-cl) PMT, maka digunakan pengaturan waktu *switching* sesuai dengan jenis koneksi pada kapasitor yang terpasang. Kapasitor GI 150 kV Kebasen terhubung secara *ungrounded-Y*, sehingga pengaturan waktu yang digunakan adalah 2 (dua) fasa pertama harus masuk pada saat perbedaan tegangan diantara kedua fasa sama dengan nol sedangkan fasa ketiga dimasukkan $1/4$ cycle atau 45° listrik (5ms untuk sistem

50Hz) setelah kedua fasa lainnya masuk, yang dapat dilihat pada Gambar 4.22, sampai dengan 4.24.

Component: TSWITCH

Attributes Characteristic

DATA	UNIT	VALUE
T-cl	s	0.043
T-op	s	-1
Imar	Amps	0
T-recl	s	0
T-reop	s	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	X0001
To	1	X0007

Comment: NumPh 1 Label:

Output: 0 - No

Order: 0

Edit definitions OK Cancel Help

Gambar 4.22 Setting waktu switching fasa R dengan T-cl = 0.043 s.

Component: TSWITCH

Attributes Characteristic

DATA	UNIT	VALUE
T-cl	s	0.043
T-op	s	-1
Imar	Amps	0
T-recl	s	0
T-reop	s	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	X0001
To	1	X0014

Comment: NumPh 1 Label:

Output: 0 - No

Order: 0

Edit definitions OK Cancel Help

Gambar 4.23 Setting waktu switching fasa S dengan T-cl = 0.043 s.

Component: TSWITCH

Attributes Characteristic

DATA	UNIT	VALUE
T-cl	s	0.048
T-op	s	-1
Imar	Amps	0
T-recl	s	0
T-reop	s	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	X0001
To	1	X0015

Comment: NumPh 1 Label:

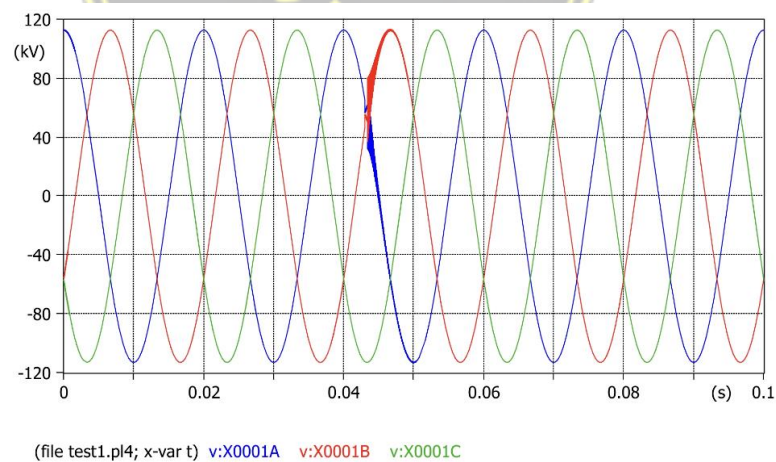
Output: 0 - No

Order: 0

Buttons: Edit definitions OK Cancel Help

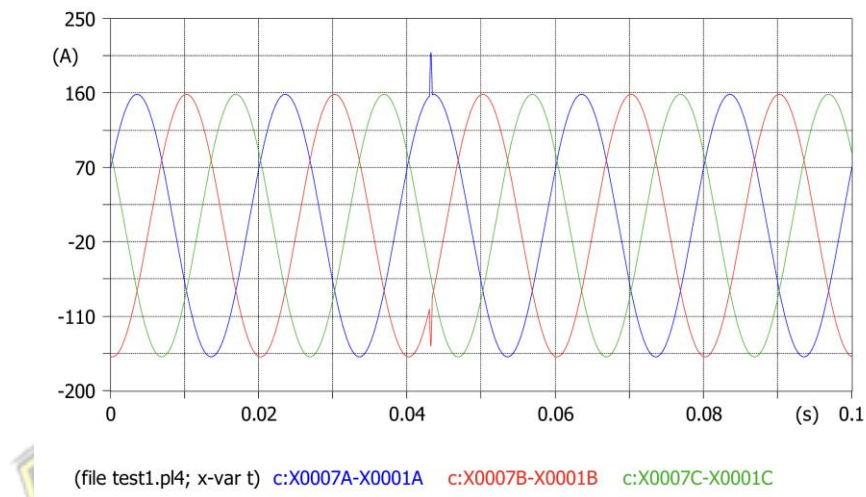
Gambar 4.24 Setting waktu switching fasa T dengan T-cl = 0.048 s.

Sesuai dengan karakteristik gelombang tegangan pada Gambar 4.1, maka waktu *switching* dilakukan pada titik 0,043 s ketika fasa R dan S mengalami *crossing* sehingga selisih diantara kedua fasa sama dengan 0 (nol), kemudian fasa T masuk pada titik 0,048, selisih $\frac{1}{4}$ cycle atau 45° listrik (5 ms untuk sistem dengan frekuensi 50 Hz) setelah fasa R dan S masuk terlebih dahulu, sehingga didapatkan hasil simulasi pada Gambar 4.25.



Gambar 4.25 Hasil simulasi tegangan ketiga fasa dalam kondisi PMT menutup tak serempak.

Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 4.25, setelah dilakukan pengaturan waktu *switching* PMT, terlihat bahwa tegangan transien dapat diminimalisir atau bahkan dihilangkan, sehingga tidak ada tegangan transien yang dialami oleh sistem dan tegangan yang mengalir adalah tegangan nominal sistem. Gambar 4.26 menunjukkan hasil simulasi arus di ketiga fasa secara tak serempak dengan pengaturan waktu.



Gambar 4.26 Hasil simulasi arus ketiga fasa dalam kondisi PMT menutup tak serempak.

Gambar 4.26 menunjukkan hasil simulasi pada gelombang arus ketiga fasa setelah dilakukan pengaturan pada waktu *switching* PMT. Terlihat bahwa arus transien yang terjadi dapat diminimalisir menjadi 209.2 A dititik tertingginya, yaitu di fasa R, sementara di fasa S hanya terjadi sedikit cacat gelombang tetapi masih dalam batas arus nominalnya, kemudian fasa T tidak terjadi perubahan pada gelombang arus dan arus yang mengalir sesuai dengan arus nominalnya.

4.2 Analisa

Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan (2.1), maka nilai arus transien maksimum yang terjadi adalah 1198,96 A atau 12 kali lipat dari arus nominalnya.

Hasil simulasi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa pengaturan waktu *switching* PMT sangat memengaruhi terhadap nilai arus dan tegangan transien yang terjadi di dalam sistem. Apabila waktu *switching* PMT semakin mendekati titik puncak gelombang, maka semakin besar pula nilai arus dan

tegangan transien yang terjadi. Tabel 4.1 menyajikan hasil simulasi ketika PMT menutup serempak.

Tabel 4.1 Hasil simulasi ketika PMT menutup serempak.

Waktu <i>switching</i>	Tegangan transien (kV)			Arus transien (A)		
	R	S	T	R	S	T
T-cl = 0.02 s	337,3	159,1	197,3	1.192,1	650,6	548,2
T-cl = 0.04 s	337,3	156,5	197,1	1.192,1	650,9	547,8
T-cl = 0.0234 s	159,4	263,4	235,7	630,1	569,8	1.191
T-cl = 0.0249 s	122,4	184,3	166,7	96	961,3	1.099,2

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa nilai tegangan dan arus transien terbesar terjadi di fasa R ketika waktu *switching* PMT terjadi pada puncak gelombang tegangan fasa R dengan *setting* waktu (T-cl) 0.02 s dan 0,04 s. Nilai tegangan transien tertinggi yang terjadi mencapai 337.3 kV atau 2.75 kali tegangan nominalnya, sedangkan nilai arus transien tertinggi yang terjadi mencapai 1192.1 A atau 12 kali arus fasa nominalnya. Tabel 4.2 menyajikan hasil simulasi ketika PMT menutup tak serempak dengan pengaturan waktu.

Tabel 4.2 Hasil simulasi ketika PMT menutup tidak serempak.

Waktu <i>switching</i>	Tegangan transien (kV)			Arus transien (A)		
	R	S	T	R	S	T
T-cl = 0.043	113.2			209.2		
T-cl = 0.043		113.2			158.8	
T-cl = 0.048			113.2			158.8

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa nilai tegangan dan arus transien ketika dilakukan pengaturan waktu *switching* PMT sesuai dengan koneksi kapasitor di GI 150 kV Kebasen, yaitu *ungrounded-Y*, maka tidak terjadi tegangan transien pada sistem dan arus transien dapat diminimalisir hingga hanya 209.2 A atau 2.1 kali nilai arus nominalnya.

Merujuk kepada *nameplate* PMT (Tabel 2.2), maka tegangan transien dan arus transien yang timbul akibat *switching* PMT kapasitor masih memenuhi kemampuan unjuk kerja PMT yang terpasang dimana tegangan nominal PMT adalah 170 kV dengan BIL mencapai 750 kV dengan arus nominal 3150 A.

Meskipun efek yang ditimbulkan oleh adanya tegangan dan arus transien akibat *switching* PMT Bay Kapasitor tidak secara langsung dan *instant* berdampak pada peralatan. Namun, apabila frekuensi pengoperasian kapasitor cukup tinggi maka dapat mengurangi *lifetime* dan unjuk kerja peralatan, terutama PMT yang secara langsung merasakan dampak dari tegangan dan arus transien, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil pengujian tahanan kontak PMT.

Tahun	Fasa ($\mu\Omega$)			Standar ($\mu\Omega$)
	R	S	T	
2023	55.7	58.6	45.5	40
2024	62.7	62	62.9	

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa PMT mengalami penurunan unjuk kerja pada hasil pengujian tahanan kontak, hal tersebut dapat berdampak pada timbulnya anomali pada PMT seperti timbulnya *hotspot* pada *chamber* PMT yang dapat memicu terjadinya kegagalan isolasi pada PMT serta munculnya rugi-rugi daya akibat tingginya nilai R pada kontak PMT.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil perhitungan didapatkan bahwa arus transien yang terjadi pada proses *switching* kapasitor mencapai 1198.96 A atau 12 kali arus puncak nominal.
2. Kondisi PMT menutup secara serempak, tanpa dilakukan pengaturan waktu *switching* pada proses penutupan PMT, nilai tegangan transien pada proses *switching* kapasitor mencapai 2.75 tegangan puncak nominal atau 337,3 kV. Sedangkan arus transien mencapai 12 kali arus puncak nominal, atau 1192.1 A. Selanjutnya ketika dilakukan pengaturan waktu *switching* PMT sesuai dengan koneksi kapasitor di GI 150 kV Kebasen, yaitu *ungrounded-Y*, maka tidak terjadi tegangan transien pada sistem dan arus transien dapat diminimalisir menjadi 209.2 A atau 2.1 kali nilai arus puncak nominalnya.
3. Meskipun spesifikasi PMT terpasang mampu menahan tegangan dan arus transien yang timbul akibat proses *switching*, tetapi apabila frekuensi pengoperasian PMT cukup tinggi maka dapat menyebabkan pemburukan pada hasil nilai tahanan kontak PMT yang juga mengindikasikan terjadinya pemburukan pada kontak PMT. Hasil uji selama 2 tahun terakhir (Tabel 4.3) menunjukkan terjadinya kenaikan hasil uji dari maksimum $58.6 \mu\Omega$ di tahun 2023 menjadi $62.9 \mu\Omega$ di tahun 2024 sedangkan standar hasil uji adalah $40 \mu\Omega$ untuk PMT ABB LTB170 D1/B.

5.2 Saran

1. Melakukan simulasi dengan *software* lain untuk mendapatkan hasil yang lebih luas dan komprehensif.
2. Melakukan penelitian dengan memperluas cakupan sistem, tidak hanya di satu (1) Gardu Induk melainkan di keseluruhan subsistem Pemalang

untuk melihat efek yang ditimbulkan apabila terjadi *switching* kapasitor *back-to-back* antar Gardu Induk.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Thaha, Sharma. 2014. Kajian Penggunaan Switching Controller pada Kapasitor Tegangan Tinggi. Tesis Program Studi Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin Makassar.
- [2] M. Adif, Soemarwanto, M. Dhofir. 2014. Analisis Arus Inrush saat Switching Kapasitor di Gardu Induk (GI) Manisrejo Madiun. Jurnal Mahasiswa TEUB Vol. 2 No. 5.
- [3] Febrie Ardiyanto, Dedi Nugroho, Jenny Putri Hapsari. 2020. Analisis Pemodelan Arus Transien saat Switching Kapasitor Bank pada Rumah Sakit Islam Sultan Agung Semarang. Transmisi, 22, (4), Oktober 2020.
- [4] Anonimus. 2014. Buku Petunjuk Pemeliharaan Kapasitor. Jakarta: PT PLN (Persero).
- [5] Anonimus. 2014. Buku Petunjuk Pemeliharaan Pemutus Tenaga (PMT). Jakarta: PT PLN (Persero).
- [6] Anonimus. 2013. Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali. Jakarta: PT PLN (Persero) P2B Jawa-Bali.
- [7] Hans Kristian Høidalen, László Prikler, Francisco Peñaloza. 2020. ATPDraw version 7.2 for Windows Users Manual. Norwegia.
- [8] Anonimus. 2024. Arus Hubung Singkat GI/GITET Sistem Jawa Bali Semester 2 Tahun 2024. Jakarta: PT PLN (Persero) UIP2B Jawa-Bali.