



TUGAS AKHIR - TE 141599

**PENGGUNAAN METODE SYNCHRONOUS CLOSING
BREAKER UNTUK MENGURANGI EFEK TRANSIEN
CAPACITOR BANK SWITCHING DI PT. ASAHIMAS FLAT
GLASS TBK.**

Dany Harfadli
NRP 2211106082

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE 141599

**THE USE OF SYNCHRONOUS CLOSING
BREAKER METHOD TO REDUCE CAPACITOR BANK
SWITCHING TRANSIENT EFFECT IN PT. ASAHIMAS
FLAT GLASS TBK.**

Dany Harfadli
NRP 2211106082

Advisor
Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**PENGGUNAAN METODE SYNCHRONOUS CLOSING
BREAKER UNTUK MENGURANGI EFEK TRANSIEN
CAPACITOR BANK SWITCHING DI
PT. ASAHIMAS FLAT GLASS TBK.**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dosen Pembimbing I



Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 196404051990021001

Dosen Pembimbing II



Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 197411292000121001



Penggunaan Metode Synchronous Closing Breaker untuk Mengurangi Efek Transien Capacitor Bank Switching di PT. Asahimas Flat Glass Tbk.

Mahasiswa : Dany Harfadli
Pembimbing 1 : Prof.Dr.Ir.Adi Soeprijanto,MT.
Pembimbing 2 : Dr.Eng.Rony Seto Wibowo,ST.,MT.

ABSTRAK

Penggunaan *capacitor bank* dalam upaya meningkatkan faktor daya dalam masalah *power quality*, memiliki beberapa masalah yang harus diperhatikan. *Switching capacitor* bank saat *energization* dapat menyebabkan lonjakan transien yang berhubungan dengan tegangan dan arus transien. Tugas akhir ini membahas mengenai simulasi dan analisa tegangan lebih transien akibat adanya *switching capacitor bank* yang terjadi pada PT. Asahimas Flat Glass Tbk. Unit A1 & A2 dengan menggunakan *software* MATLAB Simulink 7.8.

Pengaruh keadaan *transient* saat *switching capacitor bank* dapat memberikan dampak yang merugikan baik untuk peralatan maupun sistem secara keseluruhan. Penggunaan *Synchronous Closing Breaker* sebagai salah satu solusi untuk mengatasi masalah ini. Dengan menggunakan *Synchronous Closing Breaker* dapat mengurangi tegangan lebih pada keadaan *transient* dan meredam osilasi yang terjadi. Berdasarkan hasil simulasi nilai tegangan transien yang dihasilkan pada bus 3kV mencapai 2.83 pu dan penggunaan metode *Synchronous Closing Breaker* dapat mereduksi tegangan transien tersebut hingga 1.52 pu dan mengurangi osilasi transien yang dihasilkan. Selain itu juga dapat mengurangi arus transien.

Kata kunci : *capacitor bank*, faktor daya, tegangan lebih transien, *synchronous closing breaker*

THE USE OF SYNCHRONOUS CLOSING BREAKER METHOD TO REDUCE CAPACITOR BANK SWITCHING TRANSIENT EFFECT IN PT. ASAHIMAS FLAT GLASS TBK.

Student : Dany Harfadli
Supervisor 1 : Prof.Dr.Ir.Adi Soeprijanto,MT.
Supervisor 2 : Dr.Eng.Rony Seto Wibowo,ST.,MT.

ABSTRACT

The using of capacitor bank to improve power factor in power quality, has few problem to attention. During energization in capacitor bank switching, will generate surge transient related with voltage and current transient. This final project considering about simulation and analyze transient overvoltage due to capacitor bank switching that happened at PT. Asahimas Flat Glass Tbk. Unit A1 & A2 using MATLAB Simulink 7.8.

The transient state impact while switching capacitor occur can damage to instrument and overall system. The using synchronous closing breaker as one solution overcome this problem. By using synchronous Closing Breaker can reduce transient overvoltage. From the result of the simulation shows transient overvoltage on load bus generated 2.83 pu and synchronous closing breaker method can reduce voltage until 1.52pu and also can reduce transient current and transient oscillation generated.

Keyword : capacitor bank switching, synchronous closing breaker, transien overvoltage



KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul :

Penggunaan Metode Synchronous Closing Breaker Untuk Mengurangi Efek Transien Capacitor Bank Switching di PT. Asahimas Flat Glass Tbk.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana pada jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dalam menyelesaikan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Nenek penulis (almarhumah Sulastri), motivasi utama bagi penulis untuk melanjutkan jenjang pendidikan Sarjana.
2. Bapak, ibu dan kedua adik penulis.
3. Istri penulis Anis Kurniawati yang telah memberikan dukungan dan motivasi. Untuk buah hati, Alana Sadia Azzahra yang yang kini menginjak usia 4 bulan. Terima kasih nak.
4. Bapak Prof.Dr.Ir.Adi Soeprijanto,MT dan Bapak Dr.Eng.Rony Seto Wibowo,ST.,MTselaku dosen pembimbing.
5. Rekan-rekan kerja di *Maintenance Division* PT. Asahimas Flat Glass Tbk., Bapak Ir. Hendro, Bapak Ir. H. Subagyo MT., Bapak Aris J.P. , Bapak Dian K.W. ST, Bapak Gunawan W., Bapak Fahrizal Arifin ST dan Bapak Arin Suhono.
6. Seluruh dosen jurusan Teknik Elektro yang telah banyak memberikan ilmu selama penulis menempuh kuliah.
7. Rekan-rekan di jurusan Teknik Elektro.

Surabaya, Desember 2014

Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan	1
1.3. Batasan Masalah	1
1.4. Tujuan	2
1.5. Metodologi	2
1.6. Sistematika	2
BAB 2 TEORI PENUNJANG	
2.1. Sistem Tenaga Listrik	5
2.1.1 Drop Tegangan	6
2.1.2 Daya Listrik	6
2.1.3 Tegangan Listrik	8
2.1.4 Arus Listrik	10
2.2. Kualitas Sistem Tenaga Listrik	10
2.2.1 Parameter Keadaan Ajek (<i>steady-state</i>)	11
2.2.2 Parameter Keadaan Peralihan (<i>Transient</i>)	11
2.2.3 Faktor Daya	12
2.2.3.1 <i>Faktor Daya Rendah</i>	12
2.2.3.2 <i>Memperbaiki Faktor Daya</i>	13
BAB 3 TRANSIEN DAN PENGGUNAAN METODE SYNCHRONOUS CLOSING BREAKER	
3.1. <i>Energization</i> Transien	15
3.2. Tegangan Lebih Transien <i>Capacitor Bank Switching</i>	16
3.3. <i>Oscillatory Transient</i>	16

3.4. Permasalahan yang Disebabkan <i>Capacitor Bank Switching</i>	17
3.5. Dampak Perubahan Parameter Sistem Terhadap Transien....	18
3.6 Metode <i>Automatic Control Switching Capacitor</i>	18
3.6.1 <i>Var-Sensitives Relay</i>	19
3.6.2 <i>Current-Sensitives Device</i>	19
3.6.3 <i>Time-Sensitives Relay</i>	19
3.6.4 <i>Voltage-Sensitives Relay</i>	19
3.7 Pengoperasian Kapasitor <i>Bank</i>	20
3.7.1 <i>Single Capacitor</i> (Kapasitor Tunggal)	20
3.7.2 <i>Back to Back Capacitor</i> (Kapasitor Bergantian)	21
3.8 Metode Untuk Mereduksi Tegangan Lebih Transien.....	22
3.8.1 <i>Pre-Insertion Inductor</i>	22
3.8.2 <i>Arrester</i>	23
3.8.3 <i>Synchronous Closing Breaker</i> (Penutupan Sinkron)...	24
BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS	
4.1. Simulasi dan Pemodelan Sistem	31
4.2. Parameter-Parameter Pemodelan	34
4.2.1 Sumber.....	34
4.2.2 <i>Transformer</i>	35
4.2.3 Beban.....	38
4.2.4 Kapasitor	41
4.3. Analisa Hasil Simulasi dengan MATLAB Simulink	43
4.3.1 Simulasi Tanpa Menggunakan Kapasitor	45
4.3.2 Simulasi dengan <i>Capacitor Bank Switching</i>	48
4.3.3 Pengoperasian <i>Single Capacitor Bank Switching</i>	49
4.3.4 Pengoperasian <i>Back to Back Capacitor Bank Switching</i>	55
4.3.5 Pengoperasian <i>Synchronous Closing Breaker</i>	62
BAB V PENUTUP	
5.1. Kesimpulan	71
5.2. Saran	71
DAFTAR PUSTAKA	73
LAMPIRAN	75
BIOGRAFI PENULIS	

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1	Data beban 40
Tabel 4.2	Standar tegangan pada masing-masing bus..... 54
Tabel 4.3	Tegangan dan arus transien pada pengoperasian <i>Single Capacitor Bank Switching</i> 54
Tabel 4.4	Perbandingan nilai <i>steady</i> sebelum dan sesudah proses <i>Single Capacitor Bank Switching</i> 54
Tabel 4.5	Perbandingan faktor daya sebelum dan sesudah proses <i>Single Capacitor Bank Switching</i> 55
Tabel 4.6	Standar tegangan pada masing-masing bus..... 61
Tabel 4.7	Tegangan dan arus transien pada pengoperasian <i>Back to Back Capacitor Switching</i> 61
Tabel 4.8	Perbandingan nilai <i>steady</i> sebelum dan sesudah proses <i>Back to Back Capacitor Switching</i> 61
Tabel 4.9	Perbandingan faktor daya sebelum dan sesudah proses <i>Back to Back Capacitor Switching</i> 62
Tabel 4.10	Standar Tegangan pada masing-masing bus..... 69
Tabel 4.11	Tegangan dan arus transien pada pengoperasian <i>Synchronous Closing Breaker</i> 69
Tabel 4.12	Perbandingan nilai <i>steady</i> sebelum dan sesudah proses <i>Synchronous Closing Breaker</i> 69
Tabel 4.13	Perbandingan faktor daya sebelum dan sesudah proses <i>Synchronous Closing Breaker</i> 70

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1.	Diagram sistem tenaga listrik..... 5
Gambar 2.2	Standar drop tegangan..... 6
Gambar 2.3	Segitiga daya..... 7
Gambar 2.4	Fasor diagram gelombang listrik tiga fasa..... 8
Gambar 2.5	Representasi fasor listrik tiga fasa..... 9
Gambar 2.6	Tegangan transien yang disebabkan oleh proses <i>switching</i> 12
Gambar 2.7	Contoh <i>capacitor bank</i> di industri..... 14
Gambar 3.1	Tegangan lebih transien akibat <i>capacitor switching</i> 15
Gambar 3.2	Diagram pengoperasian <i>capacitor bank</i> 16
Gambar 3.3	<i>Dynamic overvoltage</i> saat transformator <i>energizing</i> 17
Gambar 3.4	Rangkaian ekuivalen <i>energizing capacitor bank</i> dan trafo secara bersamaan..... 18
Gambar 3.5
Gambar 3.6	Rangkaian sederhana pengoperasian kapasitor tunggal..... 20
Gambar 3.7	Rangkaian sederhana pengoperasian kapasitor paralel..... 21
Gambar 3.8	<i>Pre-Insertion Inductor</i> 22
Gambar 3.9	<i>Arrester</i> untuk tegangan lebih transien..... 24
Gambar 3.10	Ilustrasi <i>Synchronous Closing Breaker</i> 25
Gambar 3.11	<i>Switching Control Sentinel (SCS)™ for circuit breakers</i> dari ABB..... 25
Gambar 3.12	Aplikasi <i>software, Switching Control Sentinel (SCS)™ for circuit breakers (control center windows)</i> 26
Gambar 3.13	Aplikasi <i>software, Switching Control Sentinel (SCS)™ for circuit breakers, (operation windows)</i> 27
Gambar 3.14	Aplikasi <i>software, Switching Control Sentinel (SCS)™ for circuit breakers (event summary windows)</i> 28
Gambar 4.1	<i>Flow chart</i> sistem kontrol <i>Synchronous Closing Breaker</i> 29
	<i>Single Line Diagram (SLD)</i> PT. Asahimas Flat 31

Gambar 4.2	Glass Tbk.....	
	Pemodelan Unit A1 dan A2 dengan MATLAB	32
Gambar 4.3	Simulink.....	
	Pemodelan distribusi beban Unit A2 dengan	33
Gambar 4.4	MATLAB Simulink.....	
	Pemodelan Kapasitor bank Unit A2 dengan.	33
Gambar 4.5	MATLAB Simulink.....	34
Gambar 4.6	Pemodelan sumber dengan MATLAB Simulink...	
	Tampilan <i>parameterwindow</i> sumber MATLAB	35
Gambar 4.7	Simulink	
	Tampilan <i>block parameters</i> pada MATLAB	36
Gambar 4.8	Simulink.....	
	Pemodelan beban <i>A2Substation</i> pada MATLAB	38
Gambar 4.9	Simulink.....	
	Tampilan <i>parameterwindow</i> beban pada	39
Gambar 4.10	MATLAB Simulink.....	
	Pemodelan kapasitor <i>A2Substation</i> pada	41
Gambar 4.11	MATLAB Simulink.....	
	Tampilan <i>parameterwindow</i> kapasitor bank pada	42
Gambar 4.12	MATLAB.....	43
Gambar 4.13	Blok MATLAB Simulink yang digunakan.....	
	Blok <i>timer</i> yang digunakan untuk <i>switching</i>	44
Gambar 4.14	kapasitor.....	
	Pemodelan sistem tanpak kapasitor pada MATLAB	45
Gambar 4.15	Simulink.....	
	Respon arus dan tegangan sebelum dipasang	46
Gambar 4.16	kapasitor pada bus sumber 20kV.....	
	Respon arus dan tegangan sebelum dipasang	46
Gambar 4.17	kapasitor pada bus sumber 3kV.....	
	Respon arus dan tegangan sebelum dipasang	47
Gambar 4.18	kapasitor pada bus beban 3kV.....	
	Respon arus dan tegangan sebelum dipasang	48
Gambar 4.19	kapasitor pada bus kapasitor 3kV.....	
	Pemodelan sistem <i>Single Capacitor Bank</i>	49
Gambar 4.20	<i>Switching</i> dengan MATLAB Simulink.....	
	Pemodelan kapasitor untuk metoda <i>Single</i>	49
Gambar 4.21	<i>Capacitor Bank Switching</i> dengan Simulink.....	
	Respon arus dan tegangan dengan <i>Single</i>	50
	<i>Capacitor Bank Switching</i> sumber 20kV.....	

Gambar 4.22	Respon arus dan tegangan dengan <i>Single</i>	51
Gambar 4.23	<i>Capacitor Bank Switching</i> 3kV	
	Respon arus dan tegangan dengan <i>Single</i>	52
Gambar 4.24	<i>Capacitor Bank Switching</i> bus beban.....	
	Respon arus dan tegangan dengan <i>Single</i>	53
Gambar 4.25	<i>Capacitor Bank Switching</i> bus kapasitor	
	Pemodelan sistem dengan metode <i>Back to Back</i>	55
Gambar 4.26	<i>Capacitor Switching</i> dengan Simulink.....	
	Pemodelan kapasitor dengan metode <i>Back to</i>	56
Gambar 4.27	<i>Back Capacitor Switching</i> MATLAB Simulink.	
	Respon arus dan tegangan dengan <i>Back to Back</i>	57
Gambar 4.28	<i>Capacitor Switching</i> sumber 20kV.....	
	Respon arus dan tegangan dengan <i>Back to Back</i>	58
Gambar 4.29	<i>Capacitor Switching</i> sumber 3kV	
	Respon arus dan tegangan dengan <i>Back to Back</i>	59
Gambar 4.30	pada bus beban A2.....	
	Respon arus dan tegangan dengan <i>Back to Back</i>	60
Gambar 4.31	<i>Capacitor Switching</i> bus kapasitor	
	Pemodelan sistem untuk metoda <i>Synchronous</i>	62
Gambar 4.32	<i>Closing Breaker</i>	
	Pemodelan kapasitor dan kontrol untuk metode	
	<i>Synchronous Closing Breaker</i> MATLAB	63
Gambar 4.33	Simulink.....	
	<i>Flow chart</i> sistem kontrol dengan metode	64
Gambar 4.34	<i>Synchronous Closing Breaker</i>	
	Respon dengan metode <i>Synchronous Closing</i>	65
Gambar 4.35	<i>Breaker</i> pada sumber 20kV	
	Respon dengan metode <i>Synchronous Closing</i>	66
Gambar 4.36	<i>Breaker</i> pada sumber 3kV	
	Respon dengan metode <i>Synchronous Closing</i>	67
Gambar 4.37	<i>Breaker</i> pada bus 3kV beban unit A2	
	Respon dengan metode <i>Synchronous Closing</i>	68
Gambar 4.30	<i>Breaker</i> pada bus kapasitor unit A2	70
	Grafik nilai tegangan dan arus transien.....	



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Untuk memperbaiki faktor daya, banyak industri mengaplikasikan bank kapasitor. Beban-beban industri seperti motor induksi dan peralatan-peralatan elektronika daya pada umumnya beroperasi pada faktor daya yang rendah, seperti yang terdapat di PT. Asahimas Flat Glass Tbk. Faktor daya yang rendah ini akan mengakibatkan turunnya kualitas daya pada saluran listrik industri. Dengan memasang kapasitor diharapkan dapat mengkompensasi tegangan dan daya reaktif, menurunkan rugi-rugi daya, meningkatkan kapasitas saluran dan mengurangi *drop voltages*.

Namun, penggunaan kapasitor juga dapat menimbulkan beberapa permasalahan terkait kualitas daya, yaitu kenaikan magnitude tegangan dan arus transien saat operasi *switching capacitor*. Hal ini sangat penting untuk diperhatikan, karena potensi bahaya yang ditimbulkan yaitu rusaknya peralatan dan gangguan pada sistem kelistrikan di industri.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas pada tugas akhir ini yaitu :

1. Sistem *Capacitor Bank Switching* di PT. Asahimas Flat Glass Tbk. masih menggunakan cara konvensional.
2. Solusi dan metode yang tepat untuk mengurangi efek transien pada sistem kelistrikan di PT. Asahimas Flat Glass Tbk.
3. Membuat simulasi sedekat mungkin dengan kondisi di lapangan.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan masalah dalam tugas akhir ini, maka perlu diberi batasan-batasan sebagai berikut :

1. Dikarenakan kondisi beban yang berubah-ubah, maka di dalam simulasi digunakan data beban rata-rata.
2. Analisa dilakukan pada sistem kelistrikan di Unit 2 (*A2 plant*).
3. Simulasi menggunakan software Matlab Simulink, data yang tidak bisa didapatkan di lapangan menggunakan nilai standar.

1.4 Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut :

1. Mengimplementasikan efek transien dan solusinya melalui simulasi dengan *software* MATLAB Simulink.
2. Mengetahui efek transien terhadap kualitas daya di PT. Asahimas Flat Glass Tbk.
3. Sebagai dasar untuk analisa dan penelitian lebih lanjut.

1.5 Metodologi

Metode penelitian yang digunakan pada tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Studi literatur
Mengumpulkan data berupa *Single Line Diagram (SLD)* dan *Data Sheet* yang diperlukan dan referensi lain mengenai transien, daya listrik, kapasitor *bank*, MATLAB Simulink serta literatur-literatur lainnya yang menunjang tugas akhir ini.
2. Pembuatan pemodelan, program dan simulasi
Pada tahap ini akan dilakukan pembuatan implementasi program dan simulasinya dengan *software* yang digunakan.
3. Analisa data
Dari simulasi yang dilakukan akan didapatkan hasil yang kemudian akan dilakukan analisis. Data yang akan dianalisis adalah tegangan, arus dan faktor daya.
4. Kesimpulan
Kesimpulan tersebut merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisis. Selain itu, juga akan diberikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

- Bab 1 : Pendahuluan
Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan.
- Bab 2 : Dasar Teori
Bab ini membahas tentang dasar teori yang menunjang untuk pengerjaan tugas akhir seperti besaran daya listrik,

faktor daya, sistem *Capacitor Bank Switching*, gejala dan efek transien.

Bab 3 : Transien dan Penggunaan Metode *Synchronous Closing Breaker*.

Bab ini berisi referensi mengenai macam-macam metode untuk mengurangi efek transien, yang di dalamnya termasuk metode yang akan digunakan.

Bab 4 : Permodelan dan Analisa

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai perancangan Perangkat Lunak sistem kelistrikan PT. Asahimas Flat Glass Tbk. beserta data dan parameter-parameter pendukungnya.

Bab 5 : Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan akhir dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.



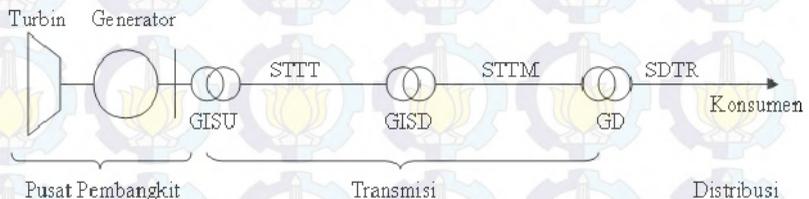
BAB 2 TEORI PENUNJANG

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang berfungsi untuk membangkitkan, mentransmisikan dan mendistribusikan energi listrik dari pusat pembangkit sampai kepada konsumen. Tiga komponen utama dari sistem tenaga listrik yaitu :

1. Pembangkit, adalah peralatan-peralatan yang menghasilkan daya listrik.
2. Transmisi, adalah peralatan atau bagian yang menyalurkan daya listrik ke jaringan.
3. Distribusi, adalah bagian yang menyalurkan daya listrik ke beban atau konsumen.

Penyaluran energi listrik dari pusat pembangkit sampai ke konsumen dapat digambarkan seperti gambar 2.1 di bawah ini,



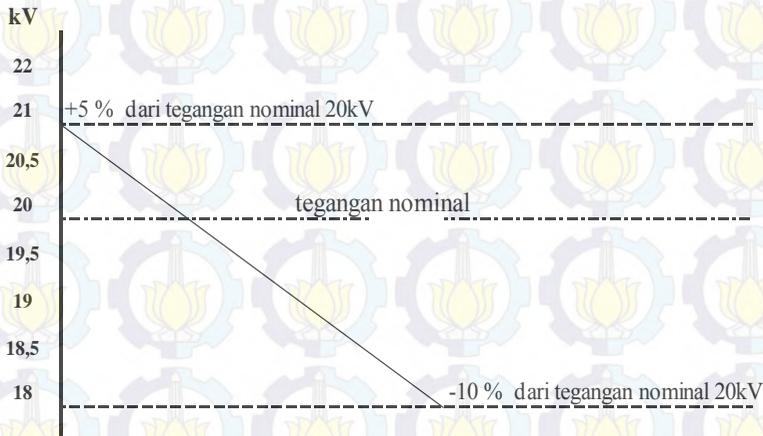
Gambar 2.1 Diagram sistem tenaga listrik [1].

Energi listrik adalah energi yang paling banyak dibutuhkan dan digunakan oleh masyarakat. Energi listrik adalah energi yang diperoleh dari hasil konversi energi primer, seperti energi mekanik, energi panas, energi potensial dan lain-lain. Maka dari itu dalam proses energi listrik dibangkitkan dan didistribusikan banyak besaran maupun parameter yang harus diperhatikan. Adapun besaran – besaran dalam sistem tenaga listrik yang harus selalu diperhatikan adalah :

1. Drop tegangan
2. Daya listrik
3. Tegangan listrik
4. Arus listrik

2.1.1 Drop Tegangan

Penyebab adanya penurunan tegangan pada bus atau yang biasanya disebut dengan *drop* tegangan adalah disebabkan karena adanya impedansi dan beban pada saluran sistem jaringan distribusi. Saat terjadi beban puncak maka akan terjadi penurunan tegangan dan akan terlihat signifikan, karena beban yang disuplai bertambah besar. *Drop* tegangan atau penurunan tegangan yang diperbolehkan adalah sebesar 5% dari tegangan awalnya (berdasarkan SPLN 72 .1987) [3].



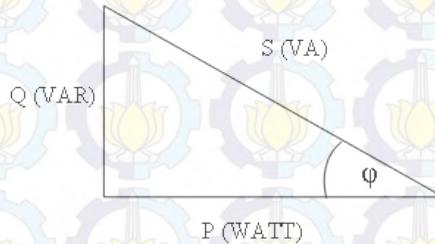
Gambar 2.2 Standar drop tegangan berdasarkan SPLN 72.1987.

2.1.2 Daya Listrik

Daya listrik didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam rangkaian listrik. Satuan SI daya listrik adalah watt yang menyatakan banyaknya tenaga listrik yang mengalir per satuan waktu (joule/detik). Berdasarkan proses pembangkitannya daya pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi 3 jenis daya, yaitu : [3]

1. Daya total (S) adalah hasil dari perkalian antara arus dan tegangan. Dan satuan untuk daya total adalah VA.
2. Daya aktif (P) adalah hasil dari konversi energi primer seperti energi mekanik, energi potensial, dan energi panas. Dan satuan untuk daya aktif adalah Watt.
3. Daya reaktif (Q) adalah hasil dari pembangkitan medan listrik pada generator sinkron melalui sistem eksitasinya, dan satuan untuk daya reaktif adalah VAR.

Digunakan teori segitiga daya untuk mendefinisikan hubungan antara daya total, daya aktif dan daya reaktif tersebut. Hubungan ketiga macam daya tersebut digambarkan pada segitiga daya seperti pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.3 Segitiga daya [3].

Daya kompleks atau biasa dengan simbol S merupakan perkalian dari tegangan dan arus konjugat seperti diberikan persamaan berikut :

$$S = V \cdot I^* \quad (2.1)$$

$$S = |V| \cdot |I| \cos\Phi + j |V| \cdot |I| \sin\Phi \quad (2.2)$$

$$S = P + jQ \quad (2.3)$$

Kemudian, *magnitude* dari S disebut dengan nilai daya total dan ditetapkan dengan satuan kilo-volt-amperes (kVA). Ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.4)$$

$\cos \phi$ atau yang biasanya disebut dengan *power factor* merupakan salah satu parameter penting dalam sistem tenaga listrik. Disini $\cos \phi$ adalah sudut yang mempresentasikan hubungan antara daya total, daya aktif dan daya reaktif. $\cos \phi$ juga digunakan untuk menunjukkan adanya perbedaan sudut antara gelombang arus dan gelombang tegangan pada fungsi waktu. Jika karakteristik suatu beban gelombang arusnya mendahului gelombang tegangannya maka beban tersebut memiliki nilai $\cos \phi$ positif (*leading*). Dan sebaliknya, Jika karakteristik suatu beban gelombang arusnya tertinggal dari gelombang tegangannya maka beban tersebut memiliki nilai $\cos \phi$ negatif (*lagging*).

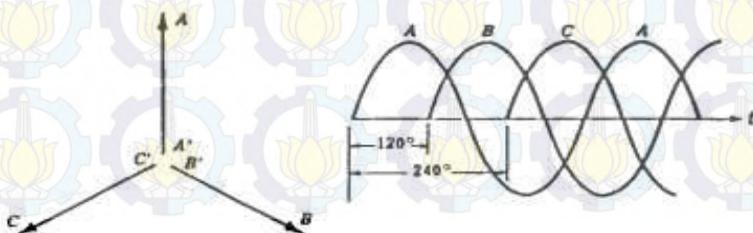
2.1.3 Tegangan Listrik

Tegangan listrik (kadang disebut sebagai voltase) adalah perbedaan potensial listrik antara dua titik dalam rangkaian listrik, dan dinyatakan dalam satuan volt. Besaran ini mengukur energi potensial dari sebuah medan listrik yang mengakibatkan adanya aliran listrik dalam sebuah konduktor listrik. Tergantung pada perbedaan potensial listriknya, suatu tegangan listrik dapat dikatakan sebagai ekstra rendah, rendah, tinggi atau ekstra tinggi. Secara definisi tegangan listrik menyebabkan obyek bermuatan listrik negatif tertarik dari tempat bertegangan rendah menuju tempat bertegangan lebih tinggi. Sehingga arah arus listrik konvensional di dalam suatu konduktor mengalir dari tegangan tinggi menuju tegangan rendah [3].

Tegangan pada listrik dinyatakan dengan satuan volt. Besaran tegangan listrik dapat mengukur energi potensial yang mengakibatkan terjadinya aliran listrik pada suatu konduktor listrik. Tegangan listrik adalah beda potensial listrik diantara dua titik dalam suatu rangkaian listrik. Dan tegangan listrik dibagi menjadi beberapa golongan dengan tergantung pada perbedaan potensial listriknya. Sebagai berikut :

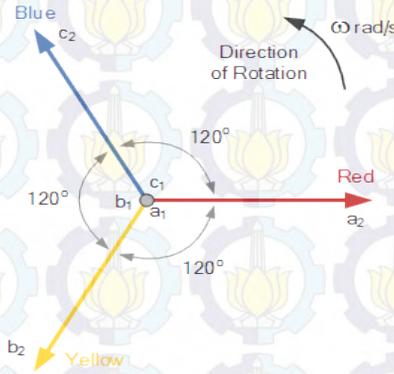
- Tegangan Ekstra Rendah < 50 volt
- Tegangan Rendah 50 volt – 1000 volt
- Tegangan Menengah atau Tinggi 1000 volt – 35000 volt
- Tegangan Tinggi > 35000 volt

Rangkaian tiga fasa terdiri dari tiga tegangan sinusoidal dengan frekuensi yang sama namun berbeda fasa 120° antara satu dengan yang lainnya. Ketiga fasa biasanya ditandai oleh warna yang berbeda mengacu pada standar masing-masing negara. Namun, seringkali ketiga fase tersebut disebut sebagai fase A, fase B dan fase C seperti ditunjukkan pada gambar 2.4 berikut :



Gambar 2.4 Fasor dan gelombang listrik tiga fasa. [4]

Ketiga fasa dikatakan seimbang (*balanced*) ketika amplitude dari ketiga fasa tersebut sama dan terpisah persis 120° . Besar tegangan, arus dan sudut fasa tegangan dapat di-plot dan disebut sebagai representasi fasor.



Gambar 2.5 Representasi fasor listrik tiga fasa. [6]

Berdasarkan pada gambar 2.5.b, V_{ab} , V_{bc} dan V_{ca} disebut sebagai tegangan *line* atau saluran. Sedangkan V_{an} , V_{bn} dan V_{cn} merupakan tegangan fasa. Dalam keadaan seimbang, masing-masing fasa memiliki besar tegangan sama besar seperti pada persamaan :

$$|V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}| = V_p \quad (2.5)$$

Dimana V_p adalah tegangan fasa efektif, sedangkan tegangan *line* atau saluran adalah sebagai berikut :

$$V_{ab} = \sqrt{3V_p} <30^\circ \quad (2.6)$$

$$V_{bc} = \sqrt{3V_p} <90^\circ \quad (2.7)$$

$$V_{ca} = \sqrt{3V_p} <150^\circ \quad (2.8)$$

Di dalam sistem yang seimbang, besarnya nilai tegangan *line* atau saluran adalah $\sqrt{3}$ dari tegangan fasa ditunjukkan oleh persamaan berikut ini :

$$V_L V_{ab} = \sqrt{3V_p} \quad (2.9)$$

2.1.4 Arus Listrik

Arus listrik adalah banyaknya muatan listrik yang disebabkan dari pergerakan elektron-elektron, mengalir melalui suatu titik dalam sirkuit listrik tiap satuan waktu. Arus listrik dapat diukur dalam satuan Coulomb/detik atau Ampere. Contoh arus listrik dalam kehidupan sehari-hari berkisar dari yang sangat lemah dalam satuan mikroAmpere (A) seperti di dalam jaringan tubuh hingga arus yang sangat kuat 1-200 kiloAmpere (kA) seperti yang terjadi pada petir. Dalam kebanyakan sirkuit arus searah dapat diasumsikan resistansi terhadap arus listrik adalah konstan sehingga besar arus yang mengalir dalam sirkuit bergantung pada voltase dan resistansi sesuai dengan hukum Ohm.

Arus listrik merupakan satu dari tujuh satuan pokok dalam satuan internasional. Satuan internasional untuk arus listrik adalah Ampere (A). Secara formal satuan Ampere didefinisikan sebagai arus konstan yang, bila dipertahankan, akan menghasilkan gaya sebesar 2×10^{-7} Newton/meter di antara dua penghantar lurus sejajar, dengan luas penampang yang dapat diabaikan, berjarak 1 meter satu sama lain dalam ruang hampa udara. Arus listrik dinyatakan dengan satuan ampere atau Coulomb/detik. Terjadinya arus listrik karena adanya muatan listrik yang terjadi akibat pergerakan elektron-elektron dalam konduktor yang bertegangan. Arus listrik adalah muatan listrik yang mengalir pada konduktor listrik per detik [3].

$$I = \frac{Q}{t} \quad (2.10)$$

Dimana ,

- I = arus listrik (Ampere)
- Q = muatan listrik (Coulomb)
- t = waktu (detik)

2.2 Kualitas Sistem Tenaga Listrik

Kualitas tegangan listrik yang diterima konsumen memerlukan lebih banyak aspek yang harus ditinjau. Kualitas tegangan listrik menyangkut parameter listrik dalam keadaan ajek (*steady state*) dan parameter dalam keadaan peralihan (*transient*). Kualitas sistem tenaga listrik mutlak harus dijaga agar peralatan dari sistem maupun beban

dapat beroperasi dengan normal. Untuk itu ada beberapa aspek atau parameter penting yang perlu untuk diperhatikan :

2.2.1 Parameter Keadaan Ajek (*steady- state*)

Parameter yang dipakai untuk menilai mutu listrik keadaan ajek adalah :

- Variasi tegangan
- Variasi frekwensi
- Ketidak seimbangan
- Harmonik

Dalam sistem penyediaan tenaga listrik, secara umum tegangan listrik dititik suplai diijinkan bervariasi (+5%) dan (-10%) sesuai standar PLN sedangkan dalam ANSI C 84.1 diijinkan (-10%) dan (+4%) dalam kondisi normal sedangkan kondisi tertentu (darurat) diijinkan (-13%) dan (+6%). Variasi frekwensi disini tidak diatur dalam bentuk standar tetapi lebih banyak diatur dalam bentuk petunjuk operasi. Untuk sistem tenaga listrik Jawa- Bali-Madura diusahakan variasi frekwensinya.

Ketidak seimbangan dalam sistem tiga fasa diukur dari komponen tegangan atau arus urutan negatip (berdasarkan teori komponen simetris). Pada sistem PLN komponen tegangan urutan negatip dibatasi maksimum 2 % dari komponen urutan positif.

Harmonik tegangan atau arus diukur dari besarnya masing-masing komponen harmonik terhadap komponen dasarnya dinyatakan dalam besaran prosennya. Parameter yang dipakai untuk menilai cacat harmonik tersebut dipakai cacat harmonik total (total harmonic distortion- THD). Untuk sistem tegangan nominal 20 KV dan dibawahnya, termasuk tegangan rendah 220 Volt, THD maksimum 5 %, untuk sistem 66kV keatas THD maksimum 3%. Untuk menghitung THD biasanya cukup dihitung sampai harmonisa ke-19 saja [3].

2.2.2 Parameter Keadaan Peralihan (*Transient*)

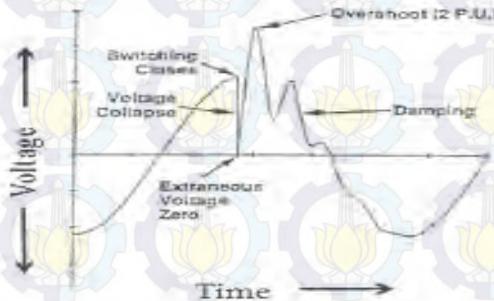
Parameter keadaan peralihan diukur berdasarkan lamanya gangguan yang terjadi(*duration of disturbance*),digolongkan menjadi 3 kelompok, yaitu :

- a. Tegangan lebih peralihan yang tajam dan bergetar : Tegangan paku (*spike*) positif atau negatip 0,5 – 200 mikrodetik dan

bergetar sampai sekitar 16,7 milidetik dengan frekwensi 0,2–5 KHz atau lebih. Gangguan ini misalnya *surge*, *spike*, *notch*.

b. Tegangan lebih diatas 110 % nominal dan tegangan rendah kurang 80% , berlangsung dalam waktu 80 milidetik (4 *cycle*) sampai 1 detik. Gangguan ini misalnya *sag*, *dips*, *depression*, *interruption*, *flicker*, *fluctuation*.

c. Tegangan rendah dibawah 80 – 85 % nominal selama 2 detik. Gangguan seperti ini disebut *outage*, *blackout*, *interruption*.



Gambar 2.6 Tegangan transien yang disebabkan proses *switching*. [9]

2.2.3 Faktor Daya

Faktor daya merupakan perbandingan antara daya aktif (P) dan daya semu (S) dan bernilai antara nol sampai satu. Persamaan dari faktor daya diberikan pada persamaan :

$$\text{Faktor Daya} = \cos \Phi = P (W) / S (VA) \quad (2.11)$$

Dimana,

P = daya aktif (Watt)

S = daya total/kompleks (VA)

Φ = sudut antara arus dan tegangan (derajat)

2.2.3.1 Faktor Daya Rendah

Pada umumnya, sistem kelistrikan memiliki tiga macam beban yaitu : resistor, induktor dan kapasitor. Di industri, beban cenderung induktif dimana beban ini memerlukan medan *electromagnet* untuk dapa beroperasi. Untuk beban induktif tentu saja membutuhkan daya nyata

(P) dan daya reaktif (Var). daya reaktif dibutuhkan untuk operasi motor induksi.

Faktor daya atau *power factor* memiliki hubungan erat pada aliran daya di dalam sistem kelistrikan yang digunakan. Untuk menghasilkan penggunaan daya yang efisien dan efektif, faktor daya diusahakan berada pada nilai sedekat mungkin pada nilai 1 yaitu dengan mengupayakan daya reaktif menjadi minimum. Faktor daya ini erat hubungannya dengan biaya produksi pada suatu industri [3].

Operasi sistem tenaga listrik pada faktor daya rendah menjadi perhatian utama dalam sistem utilitas di sebuah industri. Dan penyebab utama adalah dominasi beban induktif seperti motor induksi dan transformator. Dampaknya adalah tegangan sistem berkurang yang mengakibatkan putaran motor induksi menurun dari dari yang seharusnya. Selain itu, juga berpengaruh pada usia peralatan yang digunakan. Untuk itu faktor daya harus diperbaiki hingga sampai pada nilai yang optimal.

2.2.3.1 Memperbaiki Faktor Daya

Cara yang ditempuh untuk memperbaiki faktor daya adalah dengan mengkompensasi daya reaktif yaitu dengan menambahkan kapasitor *bank* dalam sistem kelistrikan yang faktor dayanya kurang. Dengan menaikkan faktor daya, akan memberikan keuntungan sebagai berikut :

- Terhindar dari denda faktor daya (denda kVar) dari penyedia daya listrik (PLN).
- Mengurangi arus total dan rugi-rugi (I^2R)
- Meningkatkan efisiensi daya nyata (P) dan meminimalkan daya reaktif (kVar)
- Meminimalkan drop tegangan, karena tegangan akan naik dan stabil saat beban cenderung naik.

Untuk memperbaiki faktor daya, dipasang kapasitor *bank* pada bus yang memiliki faktor daya rendah. Besarnya kapasitor *bank* yang diinvestasikan harus sesuai dengan kebutuhan. Kapasitor yang digunakan pada jaringan kelistrikan memiliki *rating* tegangan yang tinggi (di atas 3kV) dan biasanya disebut dengan *Capacitor bank*. *Capacitor bank* digunakan untuk mengurangi rugi daya dan jatuh tegangan pada jaringan kelistrikan sehingga dapat memperbaiki faktor daya secara keseluruhan. Penurunan faktor daya disebabkan oleh beban di lokasi produksi yang

umumnya bersifat induktif. Pemasangan *capacitor bank* pada jaringan distribusi dengan hubungan paralel terhadap fasa melalui hubungan *disconnecting switch (DS)* atau *circuit breaker (CB)*. *Capacitor bank* berfungsi untuk kompensasi tegangan di sepanjang saluran sekaligus menaikkan faktor daya dari saluran tersebut.

Ada beberapa hal yang menjadi tujuan dilakukan pemasangan *capacitor bank* yaitu :

1. Di gardu bertujuan untuk menaikkan level tegangan di bus gardu dan juga membantu Var sistem.
2. Di saluran bertujuan untuk menaikkan level tegangan di beban sekaligus menaikkan faktor daya.

Bentuk fisik dari *capacitor bank* di industri dapat dilihat pada gambar 2.7 berikut ini :



Gambar 2.7 Contoh *capacitor bank* di industri. [6]

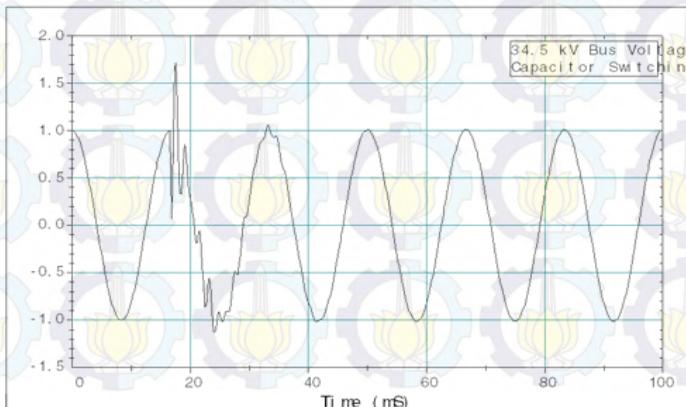
BAB 3

TRANSIEN DAN PENGGUNAAN METODE SYNCHRONOUS CLOSING BREAKER

Secara umum, terdapat dua penyebab utama yang mengakibatkan tegangan lebih transien pada sistem, yaitu karena sambaran petir dan proses *switching* kapasitor *bank*. Pada tugas akhir ini pembahasan hanya akan dibatasi pada tegangan lebih transien yang disebabkan oleh proses *switching* kapasitor *bank*. Tegangan lebih transien akan selalu terjadi sebagai akibat proses pengisian muatan kapasitor *bank* (*energization*) dan hanya terjadi sampai proses pelepasan muatan (*de-energization*) [11].

3.1 *Energization* Transien

Pada saat *switching* kapasitor *bank*, tegangan sumber akan mengalami gangguan secara singkat seolah-olah mengalami hubungan singkat. Setelah mengalami penurunan tegangan tersebut, kapasitor *bank* akan mulai menarik arus *inrush* melalui impedansi sumber. Proses *charge* dari kapasitor *bank* dalam suatu rangkaian LC menghasilkan *overshoot* dengan gelombang tegangan yang diikuti oleh osilasi transien yang berhubungan dengan induktansi dari sistem, rugi-rugi saluran dan kapasitansi dari kapasitor *bank* itu sendiri. gambar 3.1 mengilustrasikan tegangan transien pada bus saat sebuah kapasitor *bank* mulai *energize*.



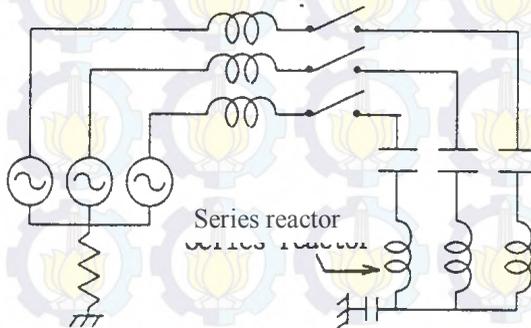
Gambar 3.1 Tegangan lebih transien akibat *capacitor switching*. [8].

Proses *energize* dari kapasitor *bank* menghasilkan tegangan lebih transien yang berpotensi merusak peralatan maupun sistem secara keseluruhan. Untuk itu, perlu dilakukan penanganan lebih lanjut mengenai efek transien ini.

3.2 Tegangan Lebih Transien Akibat Capacitor Bank Switching

Capacitor bank digunakan pada sistem transmisi dan distribusi sebagai kompensasi daya reaktif dan banyak keuntungan lainnya. Namun, selain banyak keuntungan tersebut ada kerugian yang di timbulkan yaitu saat terjadi proses *energizing* pada *capacitor bank* akan menghasilkan *transient oscillation* pada sistem tenaga. Transien ini dapat menimbulkan kerusakan baik pada penyedia atau pun pengguna tenaga listrik. Kerusakan ini bergantung pada parameter sistem seperti ukuran kapasitor, transformator dan tipe beban.

Transient Overvoltage yang terjadi pada saat pelepasan muatan kapasitor selama proses pengisian atau *energize*. Osilasi akan terjadi selama beberapa *cycle* sampai tercapai keadaan tunak atau *steady state*. Selama proses transien ini akan diikuti oleh lonjakan arus yang dibatasi oleh impedansi sistem dan resistansi jaringan [8].



Gambar 3.2 Diagram pengoperasian *capacitor bank*. [4].

3.3 Oscillatory Transient

Oscillatory merupakan bagian transien dari *capacitor bank switching* yang dihasilkan dari perubahan energy antara element induktif

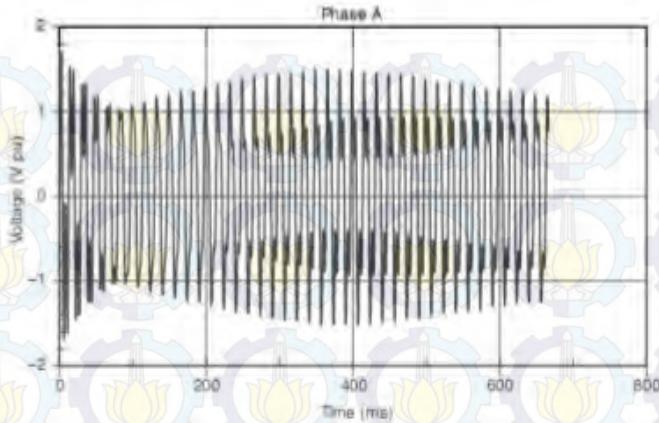
dan kapasitif dari rangkaian sistem kelistrikan. Energi yang tersimpan dalam kapasitor ($\frac{1}{2}CV^2$) akan mengalir melalui elemen induktif ($\frac{1}{2}LI^2$). Frekuensi dari isolasi dapat dituliskan sebagai berikut :

$$f = 0.5\sqrt{LC} \text{ Hz} \quad (3.1)$$

Bagian *osilatory* akan meningkat berkaitan dengan kemungkinan dari bagian belitan trafo mengalami resonansi dan juga akan mengirimkan tegangan yang tinggi dan energi pada rangkaian sekunder. Osilasi pada frekuensi rendah secara tipikal 300-600 Hz dihasilkan dari adanya interaksi antara *capacitor banks* dan sumber. Transien dengan frekuensi menengah yaitu antara 2-10 Hz akan timbul jika kapasitor di-*switch* secara paralel dengan kapasitor yang lain atau dengan adanya interaksi dengan elemen kapasitif yang lain (missal : kabel saluran). Sedangkan osilasi dengan frekuensi yang tinggi di atas 10kHz dapat dimungkinkan terjadi sebagai akibat dari surja yang terjadi pada bus [11].

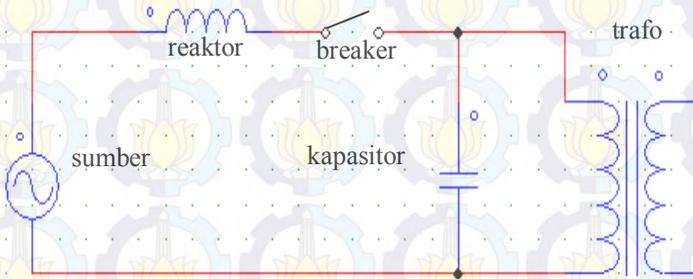
3.4 Permasalahan yang Disebabkan *Capacitor Bank Switching*

Transien yang dihasilkan dari proses *switching* ini dapat menimbulkan kegagalan kerja transformator maupun peralatan *switching* itu sendiri. *Energizing* trafo dapat menimbulkan arus *inrush* yang banyak mengandung harmonisa untuk perioda sampai 1s. jika sistem menghasilkan resonansi paralel, maka akan dihasilkan *dynamic overvoltage* yang menyebabkan kegagalan *arrester* dan masalah pada peralatan yang sensitive terhadap fluktuasi tegangan.



Gambar 3.3 *Dynamic overvoltage saat transformer energizing.* [4].

Energizing trafo dan kapasitor bank secara bersamaan dapat menyebabkan tegangan lebih transien yang memiliki frekuensi resonansi pada arus *inrush* trafo sehingga menyebabkan kegagalan isolasi pada trafo. Pada saat kapasitor di *switch on* maka akan mengakibatkan tegangan transien. Umumnya tegangan transien yang terjadi adalah 1.3 sampai 1.6 pu dari tegangan nominal, bahkan dapat mencapai 2 pu [9].



Gambar 3.4 Rangkaian ekivalen *energizing capacitor bank* dan trafo secara bersamaan.

3.5 Dampak Perubahan Parameter Sistem Terhadap Tegangan Lebih Transien

Beberapa parameter yang dapat mempengaruhi besar transien adalah sebagai berikut :

1. Besar nilai kVar kapasitor
2. Jenis beban, semakin induktif maka transien semakin besar.
3. Hubungan atau rangkaian kapasitor *bank*. Hubungan bintang tanpa *ground* berdampak transien lebih besar daripada yang dihubungkan ke *ground* [4].

3.6 Metode Capacitor Automatic Switching Control

Saat ini, kontrol otomatis menjadi kebutuhan penting dalam proses industri termasuk di dalamnya control *capacitor switching*. Dengan kontrol otomatis akan memudahkan operator dalam pengoperasian sehingga tingkat *error* atau kesalahan bisa diminimalisir. Pada dasarnya control otomatis menggunakan rele atau peralatan kontrol sejenis lainnya. Yang dimonitor oleh peralatan ini antara lain Var, arus, tegangan dan waktu. Beberapa metode kontrol otomatis yang telah digunakan adalah sebagai berikut [2] :

1. *Var-Sensitive Relay*
2. *Current-Sensitive Device*
3. *Time Sensitive Relay*
4. *Voltage-Sensitive Device*

3.6.1 Var- Sensitive Relay

Prinsip kerja dari rele ini adalah dengan mendeteksi faktor daya pada bus yaitu keadaan tegangan dan arus pada bus. Pada kondisi *lagging power factor*, maka rele akan bekerja dan melakukan *switching* kapasitor untuk memperbaiki faktor daya. Sebaliknya, pada kondisi *leading*, maka rele tidak bekerja atau *off* sehingga kapasitor tidak bekerja. Rele ini memiliki proteksi *auto off* bila terjadi gangguan pada sirkuit [2].

3.6.2 Current- Sensitive Device

Bekerja dengan mendeteksi arus *input* dari beban dan arus pada kapasitor *bank*. Alat ini akan membandingkan arus yang terukur dengan *setting* arus yang sudah ditentukan, kemudian *output* dari alat ini akan mengaktifkan kontaktor untuk *switch on* kapasitor. Biasanya alat ini

digunakan pada sistem dengan beban rendah antara 25 sampai 30 kVar. Harga alat ini pun lebih murah daripada *Var-sensitives relay* [2].

3.6.3 Time- Sensitives Relay

Seperti halnya dengan *current-sensitives relay*, *time-sensives relay* dirancang hanya untuk keperluan *switch in* dan *out* pada *single capacitor* saja. Banyak digunakan pada industri yang relative kecil dan memiliki beban yang dapat diprediksi atau beban yang tetap. Alat ini bekerja secara otomatis dan lebih reliable karena dapat deprogram. Selain itu harganya lebih murah [2].

3.6.4 Voltage-Sensitive Device

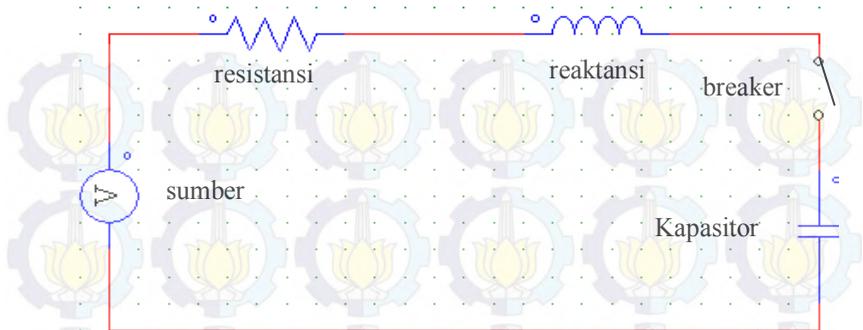
Merupakan tipe rele lama yang bekerja dengan mendeteksi tegangan dan membandingkan dengan *setting* yang sudah ditentukan. Hampir sama dengan jenis rele sebelumnya. Digunakan untuk kontrol otomatis kapasitor dan pemeliharaan tegangan bus pada substation [2].

3.7 Pengoperasian Kapasitor Bank

Ketika rangkaian beberapa kapasitor *bank* dihubungkan dengan sumber tegangan, maka akan timbul arus transien mengalir ke kapasitor tersebut. Besar dan frekuensi arus transien ini bergantung pada kapasitansi dan induktansi sistem kelistrikan [8]. Kapasitansi dapat ditimbulkan oleh kapasitor itu sendiri dan saluran atau kabel penghantar, sedangkan induktansi dihasilkan dari reaktor yang dihubungkan ke kapasitor dan penghantar. Pada dasarnya pengoperasian *capacitor bank* dibagi menjadi dua yaitu secara *Single Capacitor & Back to Back* [11].

3.7.1 Single Capacitor (Kapasitor Tunggal)

Pengoperasian dengan sistem *Single Capacitor* dilakukan pada satu atau beberapa kapasitor yang dihubungkan secara paralel. Pada operasi ini, semua kapasitor dinyalakan atau di-*switching* pada waktu yang bersamaan.



Gambar 3.5 Rangkaian sederhana pengoperasian kapasitor tunggal.

$$I_{peak} = 1,41 \sqrt{I_{sc} \cdot I_c} \quad (3.2)$$

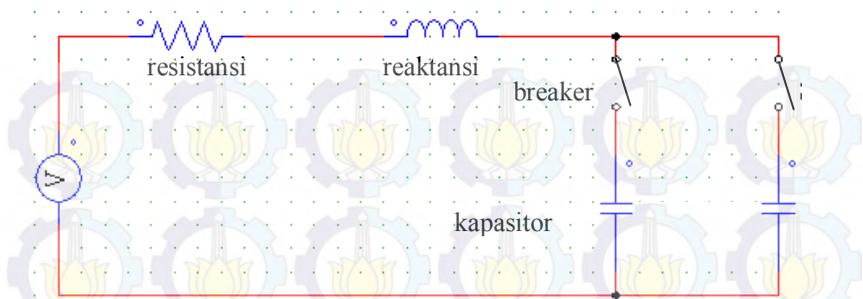
$$f_r = f_s \sqrt{I_{sc} \cdot I_c} \text{ Hertz} \quad (3.3)$$

Keterangan :

- I_{peak} = arus puncak transien (Amper)
- I_{sc} = arus hubung singkat simetris (Amper)
- I_c = arus kapasitor (Amper)
- f_r = frekuensi resonansi (Hz)
- f_s = frekuensi sistem (Hz)

3.7.2 Back to Back Capacitor (Kapasitor Bergantian)

Pengoperasian secara *Back to Back Capacitor* adalah pengoperasian pada beberapa kapasitor yang dipasang secara paralel dalam satu bus yang sama. Proses *switching capacitor bank* dilakukan secara bergantian. *Back to Back Capacitor* melibatkan *energizing* sebuah kapasitor ketika kapasitor yang lain dalam keadaan *energized*. Arus transien dalam kasus ini terjadi melalui proses yang dinamakan *interchange* dimana arus yang disupli dari sumber sistem dapat diabaikan [8]. Dalam pengertian bahwa arus dari sumber hanya melibatkan pada *Back to Back Capacitor* yang pertama saja. Dengan demikian arus transien dipengaruhi oleh reaktansi induktif antara *step-step capacitor bank*.



Gambar 3.6 Rangkaian sederhana pengoperasian kapasitor paralel.

Rumus pendekatan menurut ANSI standart C37.0731 adalah sebagai berikut :

$$I_{peak} = 1750^2 \frac{\sqrt{VLL (Ic1Ic2)}}{\sqrt{Leq (Ic1Ic2)}} \quad (3.4)$$

$$fr = 9,5^2 \sqrt{\frac{fsVLL (Ic1Ic2)}{Leq (Ic1Ic2)}} \text{ Hertz} \quad (3.5)$$

Keterangan :

- I_{peak} = arus puncak transien (Amper)
- I_{sc} = arus hubung singkat simetris (Amper)
- I_c = arus kapasitor (Amper)
- fr = frekuensi resonansi (Hz)
- fs = frekuensi sistem (Hz)

3.8 Metode Untuk Mereduksi Tegangan Lebih Transien

Tegangan lebih transien selalu terjadi pada saat dilakukan proses *switching*, dan hal ini tidak bisa dihindari. Namun tegangan lebih transien dapat direduksi atau diminimalisir dengan beberapa cara. Hal ini penting mengingat banyak dampak negative yang bisa diakibatkan oleh efek transien ini. Ada beberapa metode yang digunakan untuk mereduksi tegangan lebih transien, diantaranya adalah *pre-insertion inductor*, *surge arrester*, dan *synchronous closing breaker* [11].

3.8.1 Pre-Insertion Inductor

Pre-Insertion inductor merupakan teknologi yang masih banyak digunakan untuk mengurangi efek tegangan lebih transien pada sistem tenaga listrik. Teknologi ini tergolong konvensional namun sangat efektif mengurangi tegangan lebih transien. *Pre-insertion inductor* ini melengkapi impedansi sistem dengan memasang secara seri dengan kapasitor *bank*. *Pre-insertion inductor* ini akan membatasi arus transien yang dihasilkan oleh proses *capacitor bank switching*.

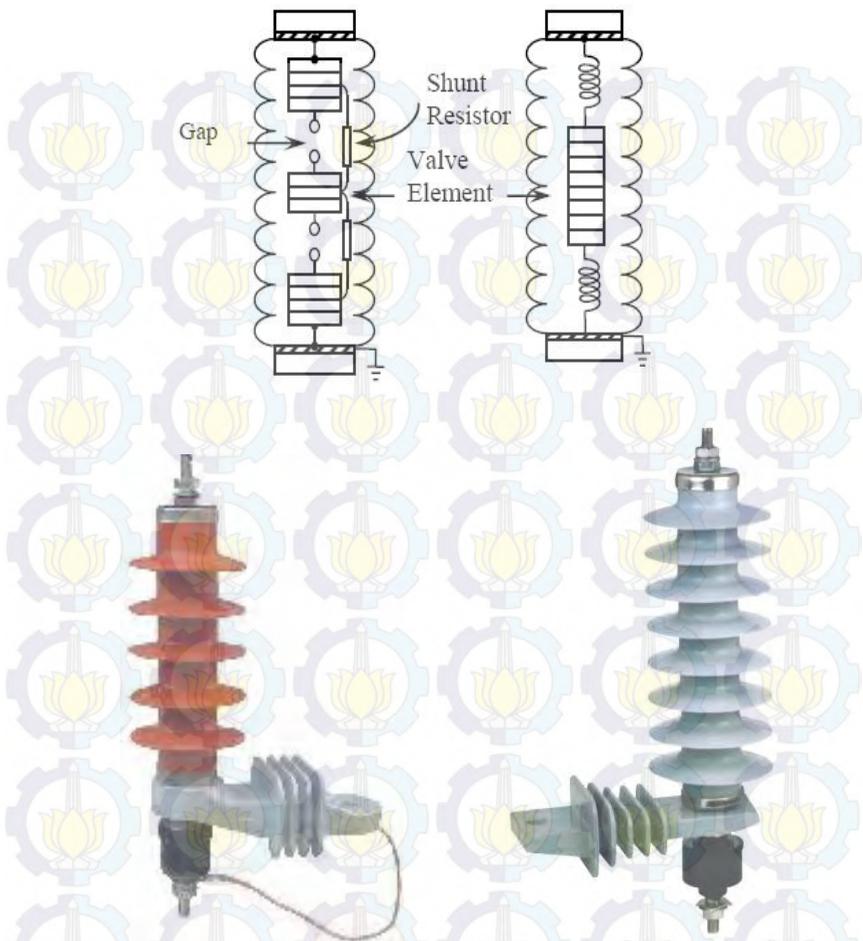


Gambar 3.7 *Pre-insertion inductor*.

Terdapat dua macam *pre-insertion inductor* ini, yaitu tipe tahanan tinggi (*high resistance*) dan tipe tahanan rendah (*low resistance*). Tipe tahanan tinggi sangat baik untuk meredam transien oleh *switching* kapasitor. Namun, dapat menimbulkan penurunan tegangan nominal bus. Bila terjadi penurunan yang besar, lebih baik menggunakan tipe tahanan rendah.

3.8.2 Arrester

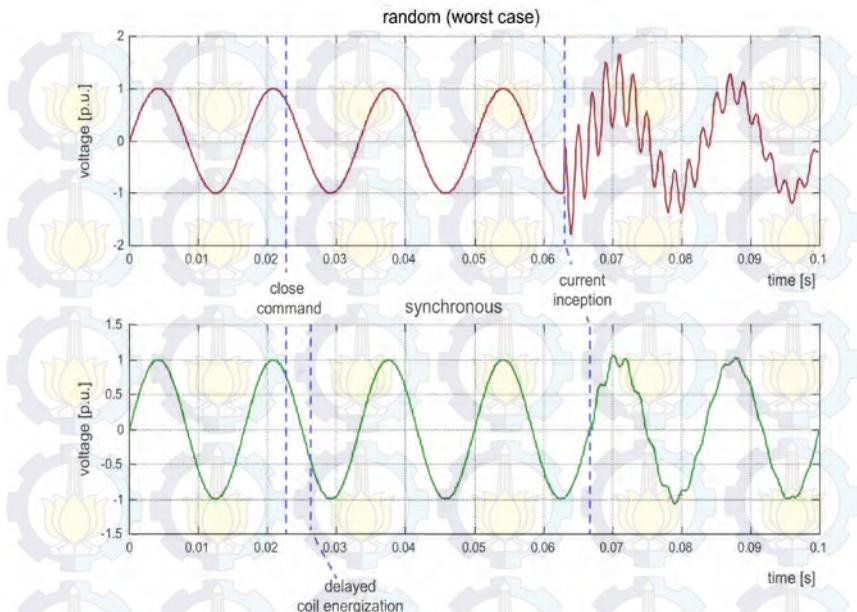
Arrester dapat digunakan sebagai perlindungan pada *capacitor bank* saat terjadi tegangan lebih transien. Jika tegangan lebih transien terjadi maka tegangan ini akan menyalakan *arrester* sehingga *capacitor bank* akan mendisipasikan energi melalui *arrester* ini.



Gambar 3.8 Arrester untuk tegangan lebih transien, tipe *silicon carbide* (kiri) dan tipe *metal oxide* (kanan).

3.8.3 Synchronous Closing Breaker (Penutupan Sinkron)

Penutupan sinkron adalah penutupan kontak CB (*circuit breaker*) dari setiap fasa pada saat tegangan mendekati nol. Terdapat sistem kontrol yang mengatur dan memprediksi kecepatan mekanis dari CB saat proses menutup atau *closing*. Penggunaan VCB sangat dianjurkan karena memiliki ketahanan dielektrik sangat baik.



Gambar 3.9 Ilustrasi *Synchronous Closing Breaker*, penutupan CB pada saat tegangan puncak (atas) dan penutupan CB pada saat tegangan nol (bawah) [12].

Pada gambar 3.9 dapat dilihat bahwa penggunaan metode *Synchronous Closing* bekerja dengan memberikan *delay* atau penundaan waktu menutup dari CB sampai pada posisi mendekati tegangan nol. Dengan demikian tegangan lebih transien dapat dikurangi secara signifikan. Penutupan CB pada saat tegangan puncak menghasilkan tegangan lebih transien yang sangat besar yaitu hampir 2 pu. Kondisi dapat berakibat buruk bagi peralatan sistem tenaga listrik maupun peralatan pada bus beban.

Salah satu tipe sistem kontrol *Synchronous Closing Breaker* dapat dilihat pada gambar 3.10 berikut ini :

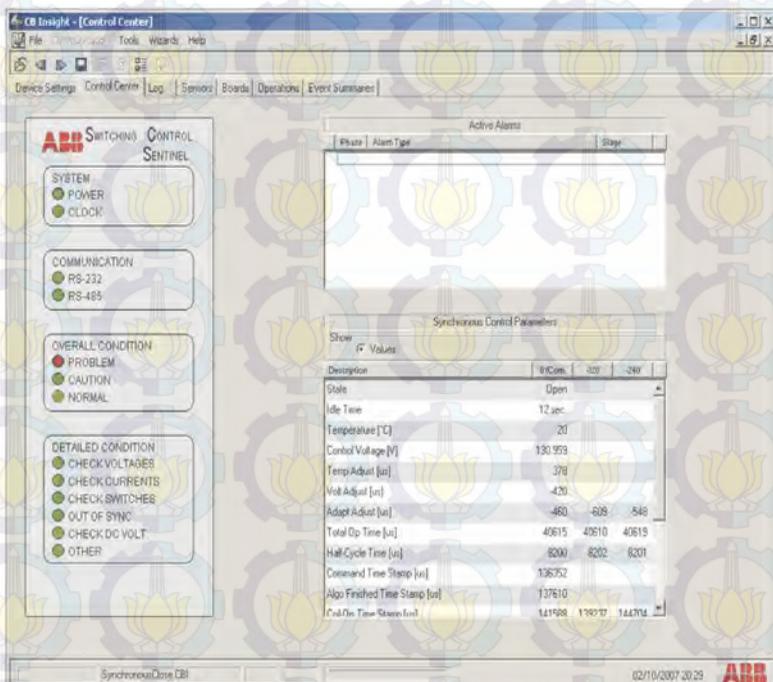


Gambar 3.10 *Switching Control Sentinel (SCS)TM for circuit breakers* dari ABB [12].

Switching Control Sentinel (SCS) dari ABB, kontroler ini berbasis mikroprosesor yang mampu mengendalikan *independent pole circuit breaker* atau CB yang independen (satu fasa). Memiliki sistem memori internal sehingga data operasi tidak akan hilang walaupun sumber daya hilang karena didesain mampu beroperasi walaupun tanpa menggunakan baterai. Tegangan DC (arus searah) yang diperlukan bervariasi mulai dari 48V, 125 V dan 250V ditentukan sesuai dengan kebutuhan industri. Konsumsi daya hanya 0.05 Amper. Dengan ketahanan temperature ambien -40 sampai 70 derajat Celcius, maka alat ini sesuai dan memenuhi kriteria standar industri. Jaminan proteksi level NEMA-1 IP20. Alat ini juga memiliki fitur RS232 atau sistem komunikasi serial yang dapat dihubungkan dengan piranti computer atau laptop [12].

Switching Control Sentinel (SCS) dari ABB didukung oleh aplikasi *software CB InsightTM* seperti ditunjukkan oleh gambar 3.11. *CB InsightTM* merupakan perangkat lunak / *software* yang digunakan untuk

menerima data dari *Switching Control Sentinel (SCS)* atau pun bisa untuk menkonfigurasi itu. Aplikasi ini memungkinkan untuk melakukan *commissioning* atau mengunduh data dengan sederhana dan mudah. Banyak fungsi-fungsi yang disajikan pada aplikasi perangkat lunak ini, diantaranya *alarm information*, *phasor diagrams*, indikator dan fungsi lainnya secara detail dan terperinci.

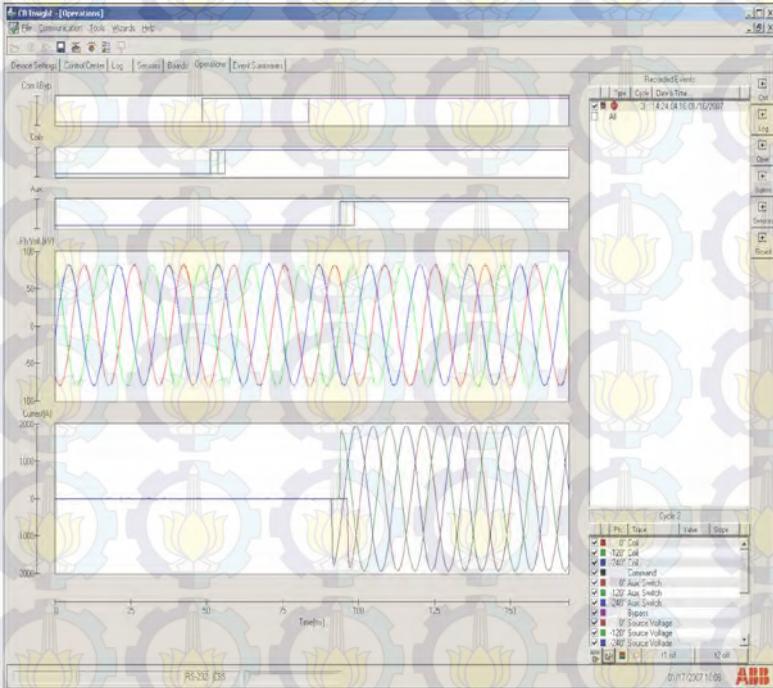


Gambar 3.11 Aplikasi software, *Switching Control Sentinel (SCS)*™ for circuit breakers (control center windows) [12].

Dengan bantuan aplikasi ini, maka data-data penting dan mengetahui data dan keadaan sistem secara langsung (*online*). Selain itu, parameter-parameter lain bisa dilakukan *adjustment* agar didapatkan konfigurasi yang lebih baik.

Sinyal dari gelombang analog dan digital yang terekam oleh SCS (*Sentinel Control Switching*) dapat ditampilkan dan diamati pada fasilitas dari aplikasi software ini. Semua dapat dilihat pada menu

“*Operation Windows*” atau jendela operasi. Bentuk gelombang yang didapatkan dapat dari berbagai macam operasi, misal tegangan dan arus yang dapat *diplot* atau dicetak bila diinginkan. Berikut ini merupakan gambar contoh tampilan yang disajikan oleh *software* SCS :

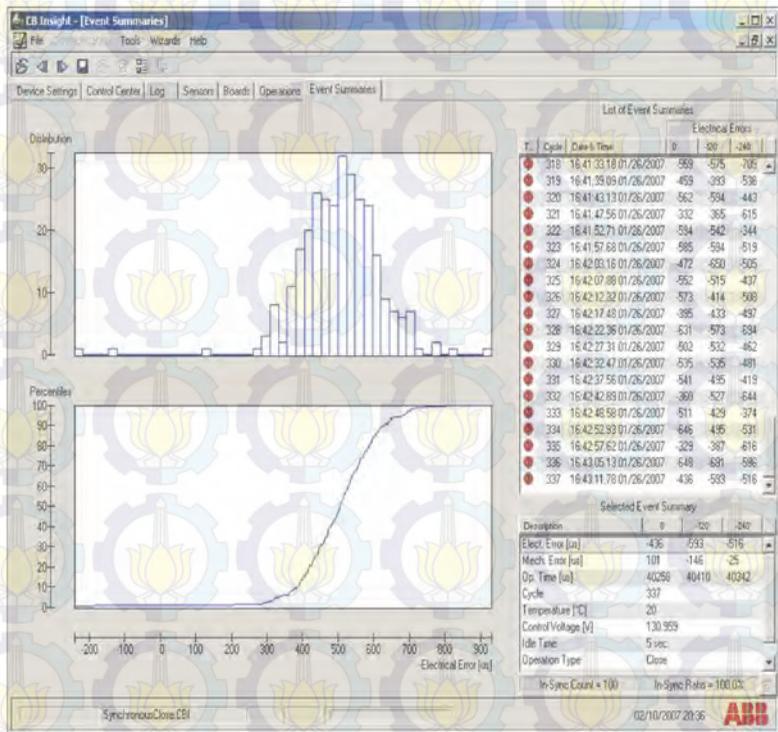


Gambar 3.12 Aplikasi *software*, *Switching Control Sentinel (SCS)™ for circuit breakers, (operation windows)* [12].

Operator dapat memilih dan menentukan *setting* atau pengaturan dari tampilan tersebut, misalnya nilai sesaat dari suatu gelombang sinyal tertentu, menentukan jeda waktu dan memperbesar tampilan sinyal sehingga didapatkan tampilan sinyal yang lebih spesifik pada suatu rentang atau periode waktu tertentu.

Fasilitas yang lain yaitu “*Event Summary Windows*”. Melalui jendela ini dapat diperoleh informasi mengenai operasi lebih dari 100 baris, meliputi nilai *error*, temperatur dan tegangan kontrol pada saat

tertentu. Semuanya dapat dilihat dan diamati dengan jelas dalam bentuk diagram batang/*histogram* dan *percentile plot*. Tampilan ini dapat dilihat pada gambar berikut ini :

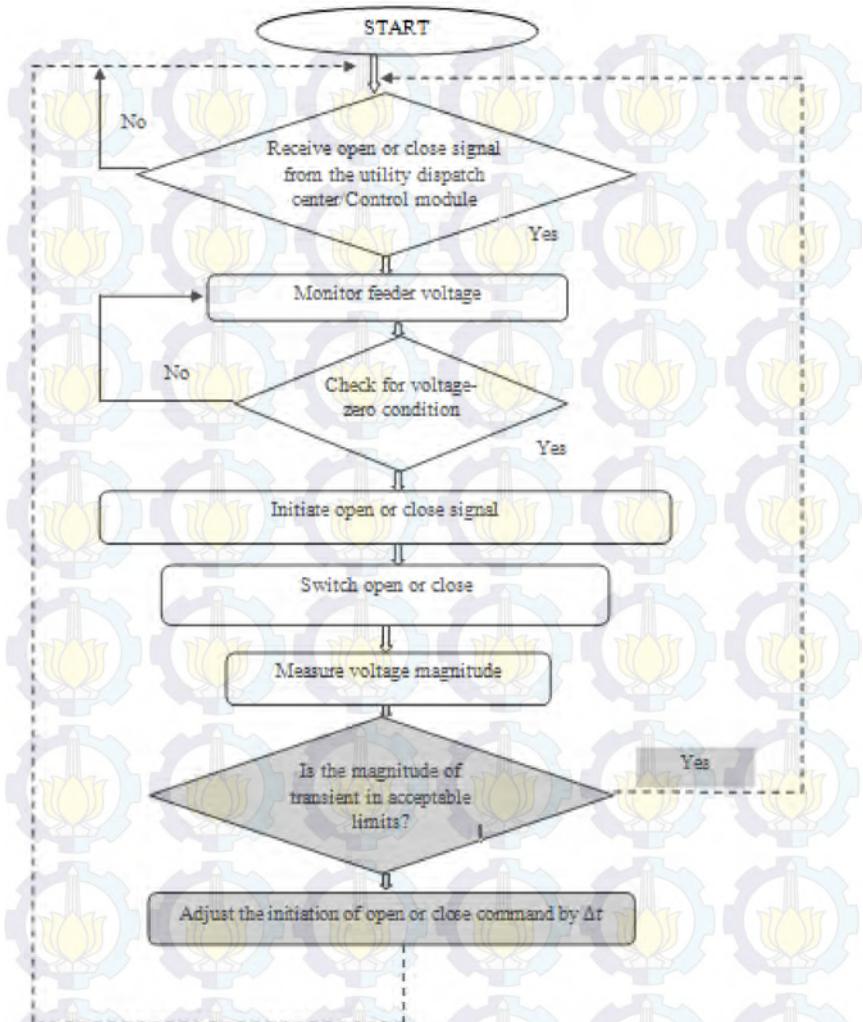


(b)

Gambar 3.13 Aplikasi software, *Switching Control Sentinel (SCS)™ for circuit breakers (event summary windows)* [12].

Dari gambar 3.13 terlihat bahwa nilai *error* dapat dilihat dalam bentuk diagram batang (*hystogram*) dan prosentase. Sedangkan detail *error* dapat diamati pada bagian kanan.

Berikut ini merupakan *flow chart* dari sistem kontrol *Synchronous Closing Breaker* [9].



Gambar 3.14 Flow chart sistem kontrol *Synchronous Closing Breaker* [9].



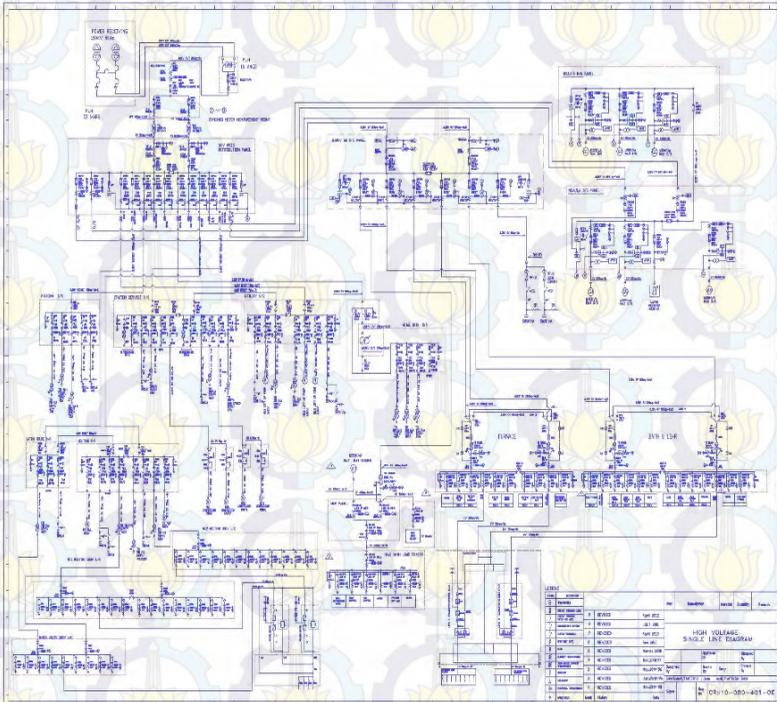
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

PEMODELAN DAN ANALISA

4.1 Simulasi dan Pemodelan Sistem

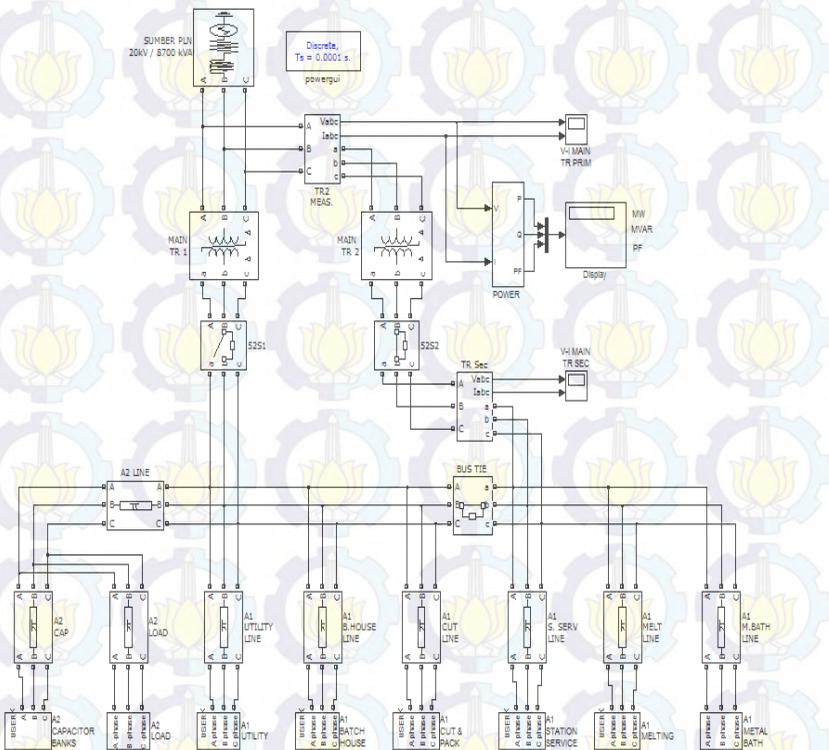
Sistem yang dimodelkan menggunakan *software* MATLAB Simulink ini adalah sistem kelistrikan PT. Asahimas Flat Glass Tbk. Unit A1 dan A2. Data awal diperoleh dari *single line diagram (SLD)* dan data-data di lapangan. Berikut ini merupakan gambar *single line diagram (SLD)* PT. Asahimas Flat Glass Tbk. yang digambar dalam format *software* Autocad 2009. Gambar detail dan lebih jelas disajikan pada halaman lampiran.



Gambar 4.1 Single Line Diagram (SLD) PT. Asahimas Flat Glass Tbk. (dibuat dalam format *software* Autocad 2009).

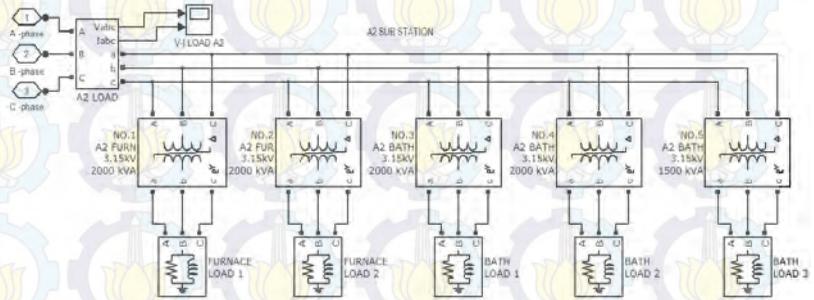
PT. Asahimas Flat Glass Tbk. terbagi menjadi dua unit pabrik, yaitu unit A1 dan unit A2. Keduanya memiliki sistem distribusi listrik yang berbeda. Pada unit A1, substation tersebar menjadi beberapa substation lagi, sehingga jumlah kapasitor *bank* yang digunakan lebih banyak. Berbeda dengan unit A2 yang substation-nya dalam satu lokasi atau ruang *substation*. Unit A2 memiliki hanya dua kapasitor *bank*.

Hasil pemodelan sistem kelistrikan PT. Asahimas Flat Glass Tbk. dengan *software Simulink* dapat dilihat pada gambar 4.1 di bawah ini. Gambar detail dan lebih jelas disajikan pada halaman lampiran.



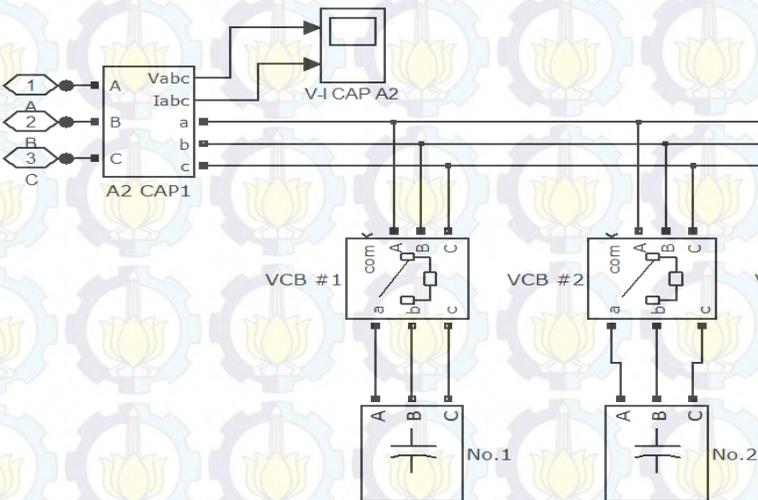
Gambar 4.2 Pemodelan Unit A1 dan A2 dengan MATLAB Simulink.

Di dalam Tugas Akhir ini, analisa dan observasi dibatasi pada Unit A2 saja. Detail pemodelan Unit A2 diperlihatkan oleh gambar 4.2 berikut ini :



Gambar 4.3 Pemodelan distribusi beban Unit A2 dengan MATLAB Simulink.

Sedangkan pemodelan untuk kapasitor A2 ditunjukkan oleh gambar 4.4 berikut ini :



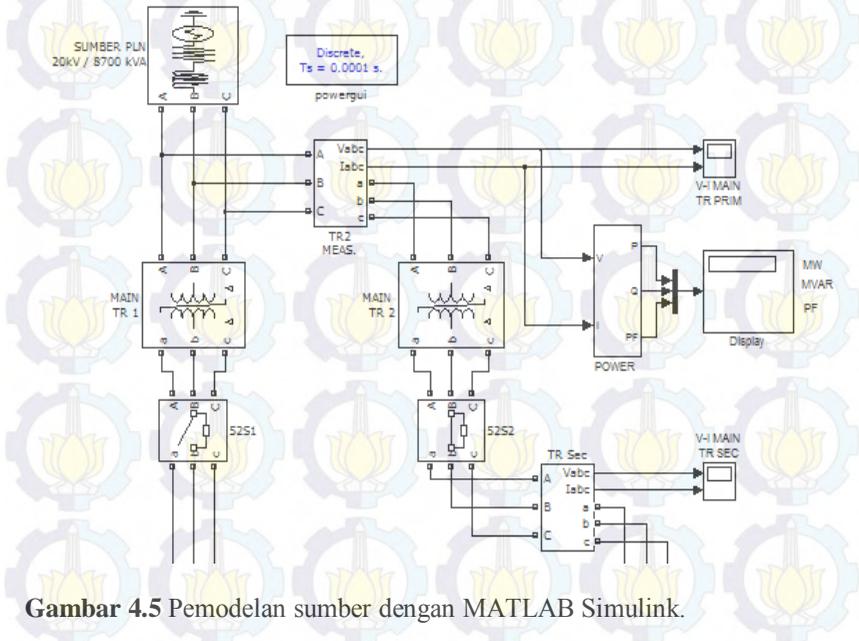
Gambar 4.4 Pemodelan kapasitor *bank* Unit A2 dengan MATLAB Simulink.

4.2 Parameter-Parameter Pemodelan

Parameter untuk pemodelan disesuaikan sesuai data yang diperoleh dari lapangan.

4.2.1 Sumber

Sumber yang digunakan adalah 20kV yang pasok dari PLN (Perusahaan Listrik Negara). Sumber ini memiliki frekuensi konstan yaitu 50 Hz. Faktor daya yang diijinkan oleh PLN adalah 0.85. Nilai faktor daya kurang dari yang ditentukan tersebut akan dikenakan denda. Untuk itu sistem dibuat sedemikian hingga faktor daya memiliki nilai di atas 0.85.

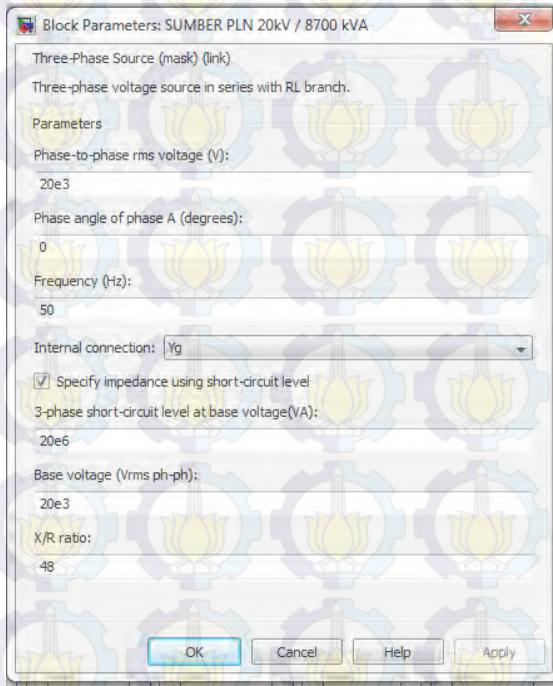


Gambar 4.5 Pemodelan sumber dengan MATLAB Simulink.

Pada sistem kelistrikan PT. Asahimas, sumber 20kV dari PLN diturunkan menjadi 3.1kV menggunakan dua Trafo yaitu *Main Transformer No.1* dan *Main Transformer No.2* yang dapat dioperasikan secara bergantian atau bersama-sama. Namun, pada simulasi ini hanya digunakan *Main Transformer No.2*. Kemudian, pada masing-masing

level tegangan diberikan blok pengukuran tegangan 3 fasa (V_{abc}) dan arus 3 fasa (I_{abc}) yang *output*-nya dapat diamati pada *scope*.

Untuk parameter sumber pada simulasi menggunakan MATLAB Simulink adalah sebagai berikut :



Gambar 4.6 Tampilan *parameter window* sumber MATLAB Simulink.

4.2.2 Transformator

Pada sistem kelistrikan PT. Asahimas, sumber 20kV dari PLN diturunkan menjadi 3.1kV menggunakan dua Trafo yaitu *Main Transformer No.1* dan *Main Transformer No.2* yang dapat dioperasikan secara bergantian atau bersama-sama. Namun, pada simulasi ini hanya digunakan *Main Transformer No.2*. Kemudian, pada masing-masing level tegangan diberikan blok pengukuran tegangan 3 fasa (V_{abc}) dan arus 3 fasa (I_{abc}) yang *output*-nya dapat diamati pada *scope*. Parameter

dari *Main Transformer No.1* dan *Main Transformer No.2* adalah sama seperti terlihat pada gambar 4.5.

Dari *Main Transformer No.1* dan *Main Transformer No.2* dihasilkan level tegangan 3.1kV yang kemudian didistribusikan ke masing-masing Substation A1 dan A2. Di masing-masing Substation level tegangan 3.1kV diturunkan lagi ke level 380V untuk A1 dan 400V untuk A2 oleh Trafo beban. Ada banyak Trafo beban di setiap Substation, namun analisa dibatasi pada Trafo unit A2 saja.

Berikut merupakan *block parameters* untuk *Main Transformer* dan *Load Transformer* dengan Matlab Simulink :



(a)

Gambar 4.7 Tampilan *block parameters* pada MATLAB Simulink (a) *Main Transformer* (b) *Load Transformer*.

Berikut merupakan *block parameters* untuk *Load Transformer* dengan Matlab Simulink :



(b)

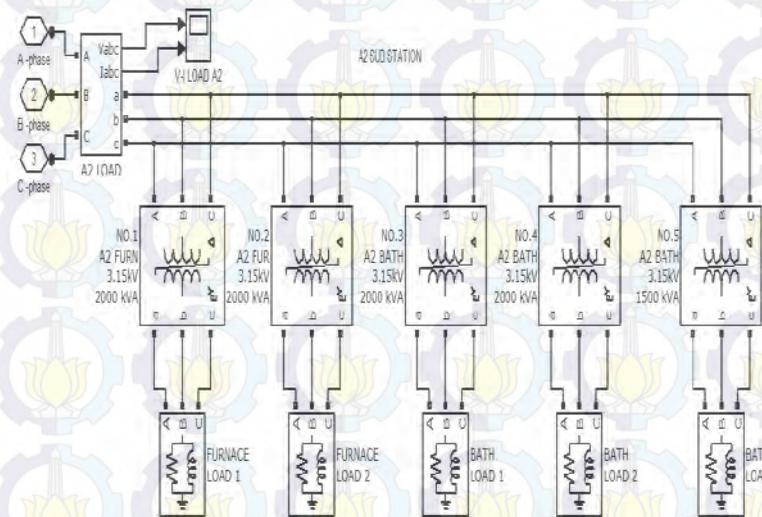
Gambar 4.7 Tampilan *block parameters* pada MATLAB Simulink (a) *Main Transformer* (b) *Load Transformer*.

Parameter-parameter pada blok *transformer* menggunakan nilai-nilai yang didapatkan di lapangan yaitu keterangan pada *name plate* yang melekat pada peralatan masing-masing trafo. Keterangan pada *name plate* itu antara lain, data tegangan, impedansi tegangan,

hubungan/konfigurasi yang digunakan, *tap changer* dan nilai nominal arus dan tegangan. Parameter yang tidak tertera pada *name plate* menggunakan nilai standar yang ada pada blok parameter Matlab Simulink.

4.2.3 Beban

Pada tugas akhir ini beban yang digunakan sebagai simulasi adalah beban dari unit *A2 Substation*. Gambar 4.6 menunjukkan pemodelan dari beban :

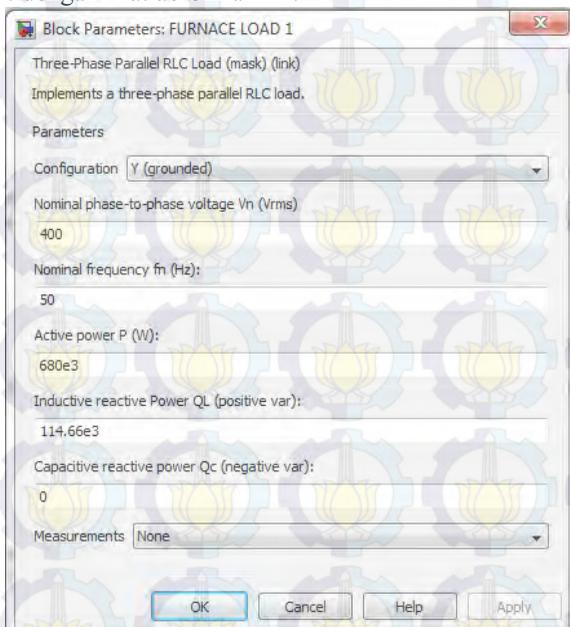


Gambar 4.8 Pemodelan beban *A2 Substation* pada MATLAB Simulink.

Parameter-parameter pada blok beban menggunakan nilai-nilai yang didapatkan di lapangan yaitu keterangan pada *name plate* yang melekat pada peralatan masing-masing beban. Keterangan pada *name plate* itu antara lain, data tegangan, impedansi tegangan, hubungan/konfigurasi yang digunakan, *tap changer* dan nilai nominal arus dan tegangan. Parameter yang tidak tertera pada *name plate* menggunakan nilai standar yang ada pada blok parameter Matlab Simulink. Beban yang digunakan adalah blok paralel induktor dan resistor dengan kata lain adalah beban *lump*. Konfigurasi yang

digunakan masing-masing beban diasumsikan dengan hubungan bintang yang di hubungkan ke tanah (*grounded*).

Berikut merupakan *block parameters* salah satu beban *A2 Substation* dengan Matlab Simulink :



Gambar 4.9 Tampilan *parameter window* beban pada MATLAB Simulink.

Untuk beban-beban yang lain, parameter ditentukan sesuai dengan data beban yang diperoleh di lapangan dan gambar SLD yang tersedia. Data daya aktif (kW) beban diperoleh dari *check sheet* operator. Dengan mengetahui data daya aktif dan faktor daya saat itu, maka daya semu (kVA) dan daya reaktif (kVar) dapat dicari dengan rumus berikut :

$$S = P / PF \quad (4.1)$$

$$Q = S \times \sin \phi \quad (4.2)$$

Dimana,

S = Daya kompleks/total (kVA)

P = Daya nyata (kW)

Q = Daya reaktif (kVar)

PF = *Power Factor* atau Faktor Daya ($\cos \phi$)

ϕ = sudut Faktor Daya

Berikut ini adalah data beban di PT. Asahimas Flat Glass Tbk pada setiap lokasi :

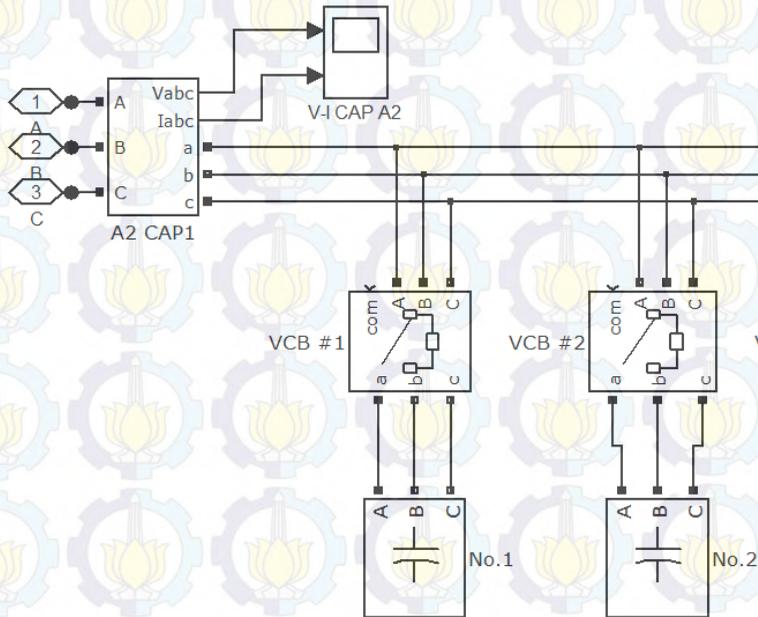
Tabel 4.1 Data beban.

Lokasi	Nama Beban	Daya Aktif	Daya Semu	Daya Reaktif
		kW	kVA	kVar
A2 Sub Station	TR1	680.00	708.44	114.66
	TR2	550.00	599.45	135.80
	TR3	650.00	681.19	110.25
	TR4	830.00	871.92	141.12
	TR5	830.00	899.17	191.04
A1 Metal Bath	TR1	200.00	217.98	49.38
	TR2	104.00	108.99	17.64
	TR3	100.00	108.99	24.69
A1 Cutting & Packing	TR1	170.00	190.73	48.06
	TR2	120.00	136.24	35.91
	TR3	365.00	408.71	102.98
A1 Batch H.	TR1	215.00	245.23	67.33
A1 Utility	TR1	110.00	119.89	27.16
	TR2	105.00	114.44	25.93
	LUP1	120.00	136.24	35.91
	LUP2	125.00	136.24	30.86
	LUP3	OFF	0.00	0.00
A1 Station Service	COMP. 1	OFF	0.00	0.00
	COMP. 2	OFF	0.00	0.00
	COMP. 3	OFF	0.00	0.00
	COMP. 4	OFF	0.00	0.00
	TR1	98.09	108.99	27.46
	TR2	132.42	147.14	37.07
	TR OFFICE	98.09	108.99	27.46
A1 Melting	TR1	485.00	544.95	143.63
	TR2	145.00	163.49	43.09

	TR3	250.00	283.37	74.69
	TR4	160.00	174.38	39.51
A1 Under Lehr	BCF1	OFF	0.00	0.00
	BCF2	155.00	174.38	45.96

4.2.4 Kapasitor

Pada tugas akhir ini kapasitor yang digunakan sebagai simulasi adalah kapasitor dari Unit A2. Gambar 4.10 menunjukkan pemodelan dari kapasitor Unit A2 :

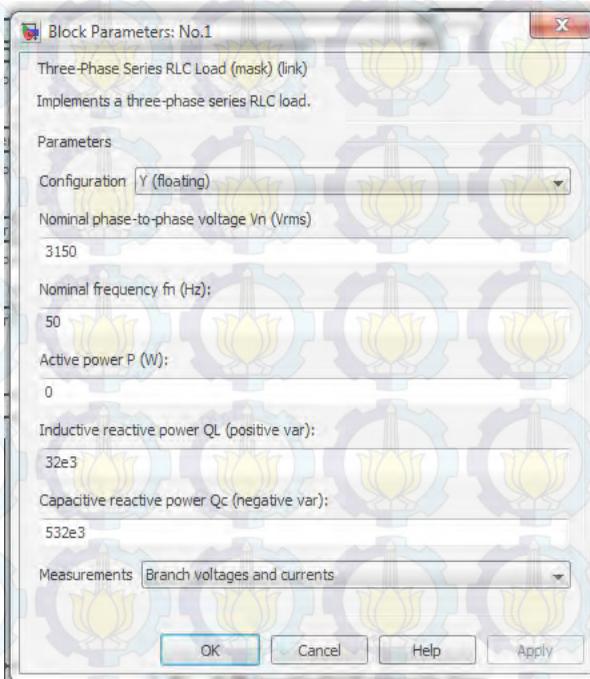


Gambar 4.10 Pemodelan kapasitor A2 Substation pada MATLAB Simulink

Terdapat dua kapasitor yang digunakan pada sistem distribusi 3kV Unit A2. Masing-masing memiliki kapasitas 500kVA dan terhubung bintang. Masing-masing kapasitor dikendalikan oleh VCB (*Vacuum Circuit Breaker*) yaitu VCB No.1 dan VCB No.2 yang dikendalikan oleh sinyal *logic* pada terminal "com". Sinyal *logic* "1" akan membuat VCB dalam keadaan terhubung (*close*) dan mengaktifkan kapasitor terhubung dengan sistem 3kV. Sinyal *logic* "0" akan membuat VCB dalam

keadaan tidak terhubung (*open*) dan melepaskan kapasitor dari sistem 3kV. Melalui terminal “com” ini akan diberikan sinyal pada waktu yang variatif sesuai metoda *switching* yang diterapkan pada saat simulasi dilakukan.

Berikut merupakan *block parameters* salah satu kapasitor di *A2 Substation* dengan Matlab Simulink :



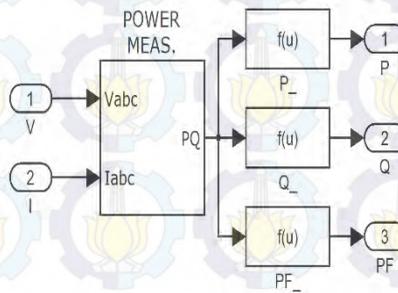
Gambar 4.11 Tampilan *parameter window* kapasitor bank pada MATLAB Simulink.

Parameter-parameter pada blok kapasitor menggunakan nilai-nilai yang didapatkan di lapangan yaitu keterangan pada *name plate* yang melekat pada peralatan masing-masing beban. Keterangan pada *name plate* itu antara lain, data tegangan, impedansi, hubungan/konfigurasi yang digunakan, *tap changer* dan nilai nominal arus dan tegangan. Parameter yang tidak tertera pada *name plate* menggunakan nilai standar

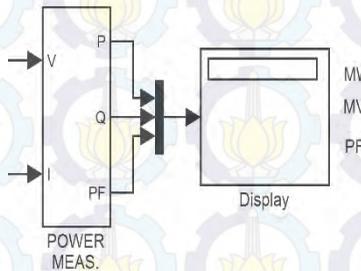
yang ada pada blok parameter Matlab Simulink. Konfigurasi yang digunakan masing-masing kapasitor adalah hubungan bintang yang tanpa di hubungkan ke tanah (*floating wye*).

4.3 Analisa Hasil Simulasi dengan MATLAB Simulink

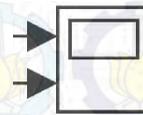
Pemodelan sistem yang telah dibuat, disimulasikan dengan *software* MATLAB *Simulink* dan ditampilkan dalam bentuk grafik sinyal tegangan, arus, *logic* serta tampilan *display* untuk menunjukkan besarnya daya aktif (kW), reaktif (kVar) dan faktor daya. Dari data tersebut akan dipergunakan untuk analisis.



(a)



(b)

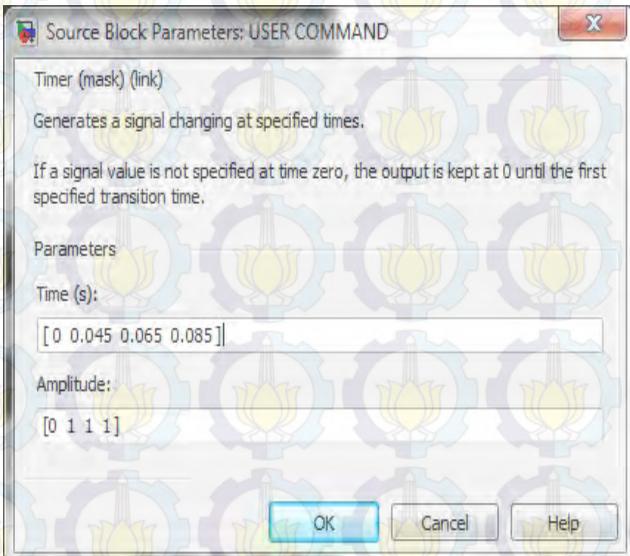


scope

(c)

Gambar 4.12 Blok yang digunakan untuk (a) pengukuran daya, (b) tampilan daya dan faktor daya, dan (c) menampilkan grafik sinyal.

Sedangkan proses *switching* kapasitor dilakukan oleh sebuah atau beberapa blok *timer* yang dapat di atur sebagai perintah kepada VCB untuk *close*. Berikut ini merupakan gambar dari blok *timer* yang digunakan :



(b)

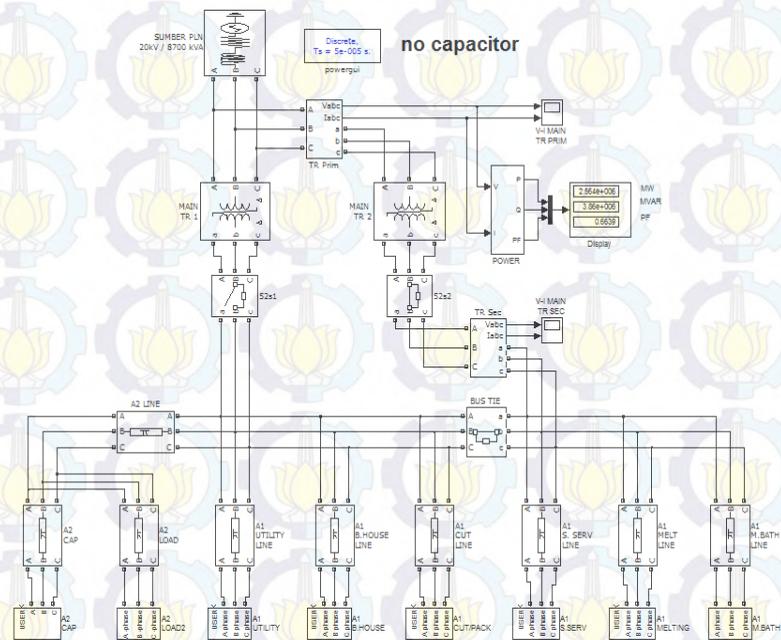
Gambar 4.13 Blok *timer* yang digunakan untuk *switching* kapasitor (a) simbol blok, (b) pengaturan waktu pada *parameter window*.

Pada blok parameter *timer*, memungkinkan untuk memasukkan nilai waktu (*timer*) sebanyak empat *state*. Nilai “on” dipresentasikan

dengan angka logika 1 (satu) dan nilai “off” dipresentasikan dengan angka logika 0 (nol). Demikian angka logika ini dikombinasikan untuk membuat *timer* dengan karakteristik tertentu sesuai dengan simulasi yang dibuat.

4.3.1 Simulasi Tanpa Menggunakan Kapasitor

Simulasi pertama yaitu simulasi sistem tanpa menggunakan kapasitor. Semua kapasitor di seluruh substation dimatikan dengan membuka kontak *breaker*. Sebuah blok ditempatkan untuk mengukur daya aktif, daya reaktif dan nilai faktor daya. Berikut ini gambar pemodelan sistem tanpa menggunakan kapasitor :



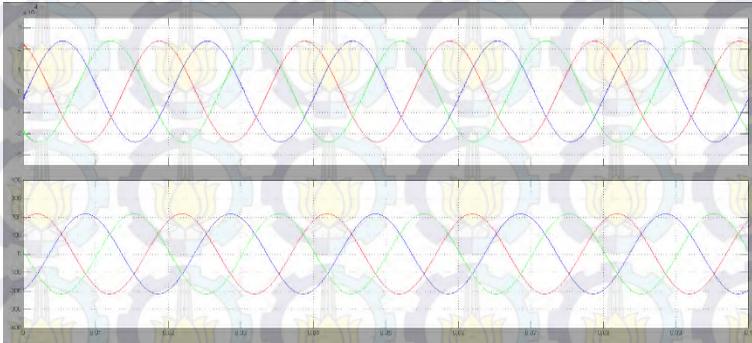
Gambar 4.14 Pemodelan sistem tanpa kapasitor pada MATLAB Simulink.

Setelah dilakukan simulasi, maka didapatkan bentuk gelombang arus dan tegangan yang ditampilkan pada jendela *scope* pada Matlab Simulink. Dari data gelombang tegangan dan arus ini selanjutnya

dilakukan pengukuran tegangan dan arus puncak. Dari data ini dapat diperoleh nilai tegangan dan arus nominal saat *steady state* atau keadaan tunak.

4.3.1.1 Bus Sumber 20kV

Hasil simulasi yang didapat pada bus sumber 20kV adalah sebagai berikut :

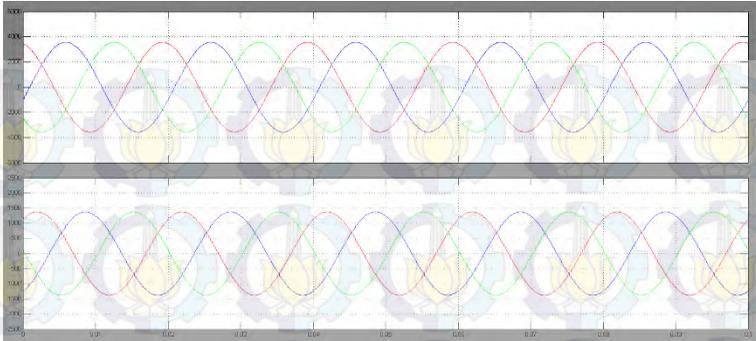


Gambar 4.15 Respon arus dan tegangan sebelum dipasang kapasitor pada bus sumber 20kV (a) respon tegangan, (b) respon arus.

Dari hasil simulasi tanpa kapasitor dapat dilihat nilai tegangan puncak sebesar 24kV pada gambar 4.9 (a), sedangkan nilai arus puncak sebesar 217A pada gambar 4.15 (b).

4.3.1.2 Respon pada Bus Sumber 3kV

Hasil simulasi yang didapat pada bus sumber 3kV adalah sebagai berikut :

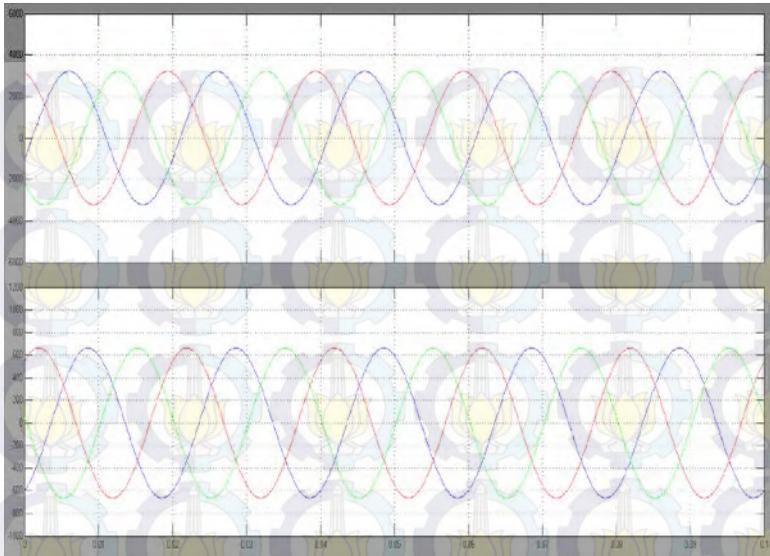


Gambar 4.16 Respon arus dan tegangan sebelum dipasang kapasitor pada bus sumber 3kV (atas) respon tegangan, (bawah) respon arus.

Dari hasil simulasi didapatkan bahwa tegangan puncak adalah 3.5kV dan arus puncak 1,374 A. Dari data tegangan puncak, didapatkan nilai tegangan nominal 2.47kV yaitu 21% lebih rendah dari tegangan nominal yang diperbolehkan (3.15kV). Sedangkan nilai toleransi tegangan yang diperbolehkan adalah +5/-5%. Hal ini disebabkan tidak adanya kapasitor yang berfungsi sebagai kompensator tegangan. Selain tegangan yang rendah, tidak adanya kapasitor juga mengakibatkan faktor daya yang rendah yaitu 0.66 , masih di bawah standar 0.85.

4.3.1.3 Respon pada Bus Beban 3kV

Hasil simulasi pada bus beban adalah sebagai berikut :

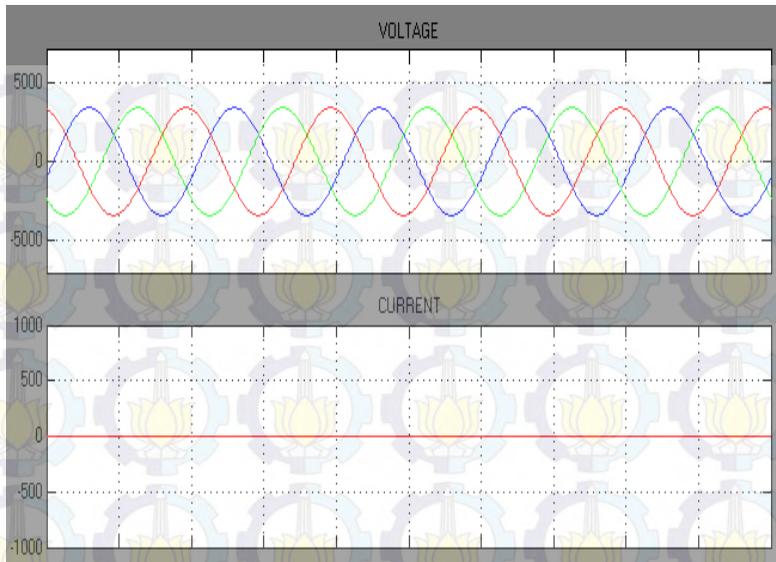


Gambar 4.17 Respon arus dan tegangan sebelum dipasang kapasitor pada bus beban 3kV (atas) respon tegangan, (bawah) respon arus.

Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa tegangan puncak adalah 3.85kV dan nilai arus puncak sebesar 663A. Dari data tegangan puncak, didapatkan nilai tegangan nominal 2.72kV yaitu 13% lebih rendah dari tegangan nominal yang diperbolehkan (3.15kV). Nilai ini di luar batas toleransi tegangan pada industri yaitu +5/-5%. Selain itu, didapatkan nilai faktor daya 0.66 yang juga masih di bawah standar.

4.3.1.4 Respon pada Bus Kapasitor

Hasil simulasi pada bus kapasitor tanpa kapasitor adalah sebagai berikut :



Gambar 4.18 Respon arus dan tegangan sebelum dipasang kapasitor pada bus kapasitor 3kV (atas) respon tegangan, (bawah) respon arus.

Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa tegangan puncak adalah 3.39kV dan nilai arus sebesar 0A. Dari data tegangan puncak, didapatkan nilai tegangan nominal yang diperbolehkan (3.15kV). Nilai ini di luar batas toleransi tegangan pada industri yaitu $\pm 5\%$. Nilai arus kapasitor sama dengan nol dikarenakan VCB tidak dalam kondisi *close* sehingga tidak ada kapasitor yang termuati.

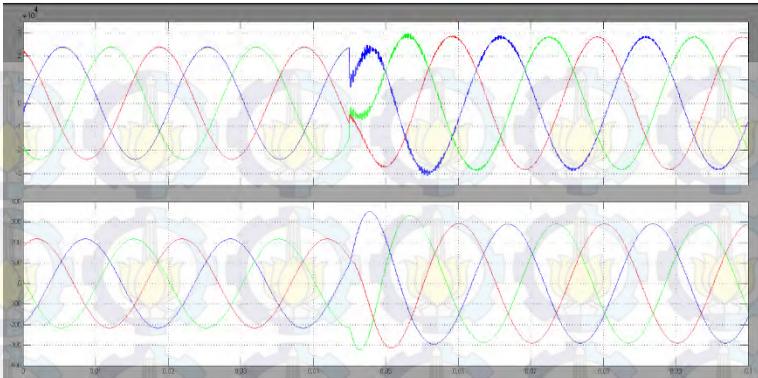
4.3.2 Simulasi dengan *Capacitor Bank Switching*

Pada simulasi dengan kapasitor *switching*, digunakan 3 metode yaitu :

1. *Single Switching*
2. *Back to Back Switching*
3. *Synchronous Closing Breaker*

4.3.3 Pengoperasian *Single Capacitor Bank Switching*

Pengoperasian *Single Capacitor Bank Switching* dilakukan pada $t=0.045$ detik secara bersamaan untuk semua kapasitor baik untuk substation Unit A1 maupun Unit A2.



(a)



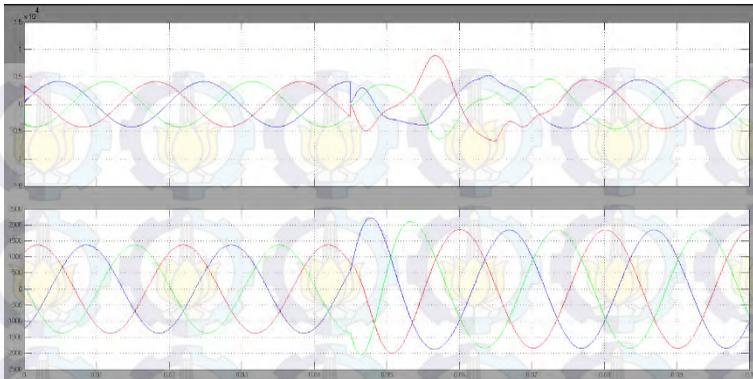
(b)

Gambar 4.21 Respon arus dan tegangan dengan *Single Capacitor Bank Switching* sumber 20kV (a) respon tegangan & arus, (b) sinyal breaker.

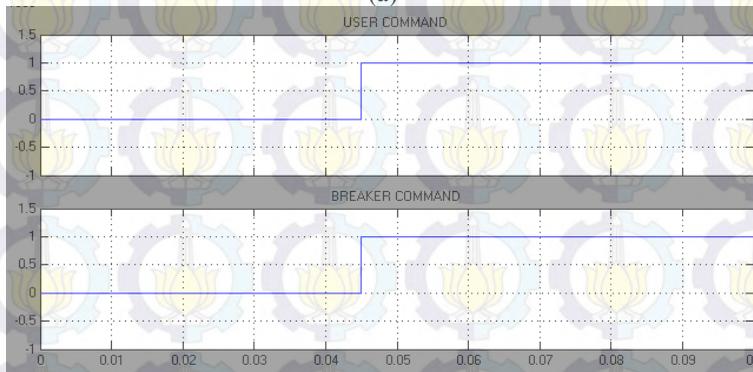
Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa proses *switching* terjadi lonjakan tegangan sebesar 30.72kV atau 1.53 pu. Sedangkan pada arus, terjadi sebesar 351A atau 1.71 pu. Tegangan nominal naik dari 16.97kV menjadi 20.08 kV sebagai akibat kompensasi kapasitor *bank*. Arus mencapai keadaan *steady* pada puncak 291A dan nominal 205A. Terjadi perbaikan faktor daya dari 0.66 menjadi 0.97.

4.3.3.2 Respon Bus Sumber 3kV

Hasil simulasi pada bus sumber 3kV setelah dilakukan *Single Capacitor Bank Switching* adalah sebagai berikut :



(a)



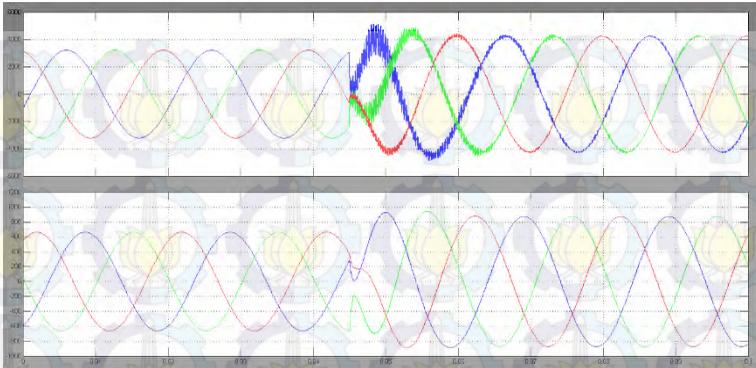
(b)

Gambar 4.22 Respon arus dan tegangan dengan *Single Capacitor Bank Switching* 3kV (a) respon tegangan & arus, (b) sinyal breaker.

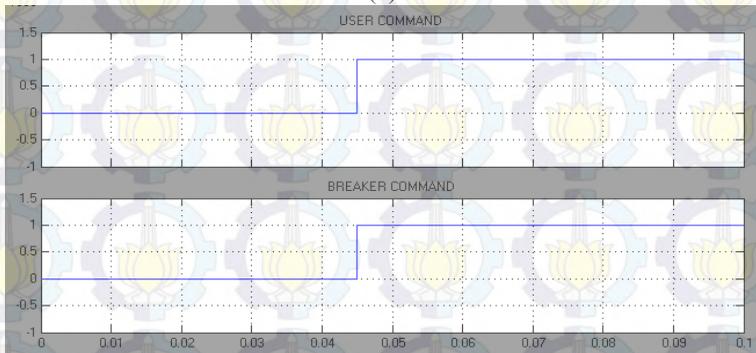
Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa proses *switching* menimbulkan tegangan puncak transien sebesar 8.9kV atau 2.8 pu. Sedangkan pada arus, terjadi lonjakan sebesar 2224A atau 1.7 pu. Tegangan nominal setelah *switching* adalah 3.18 yaitu 0.9% dari tegangan s tandar 3.15kV. sedangkan arus *steady* puncak menjadi 1845A dan nominal 1304A. Faktor daya terkoreksi dari 0.66 menjadi 0.97.

4.3.3.3 Respon Bus Beban 3kV

Hasil simulasi pada bus beban setelah dilakukan *Single Capacitor Bank Switching* adalah sebagai berikut :



(a)



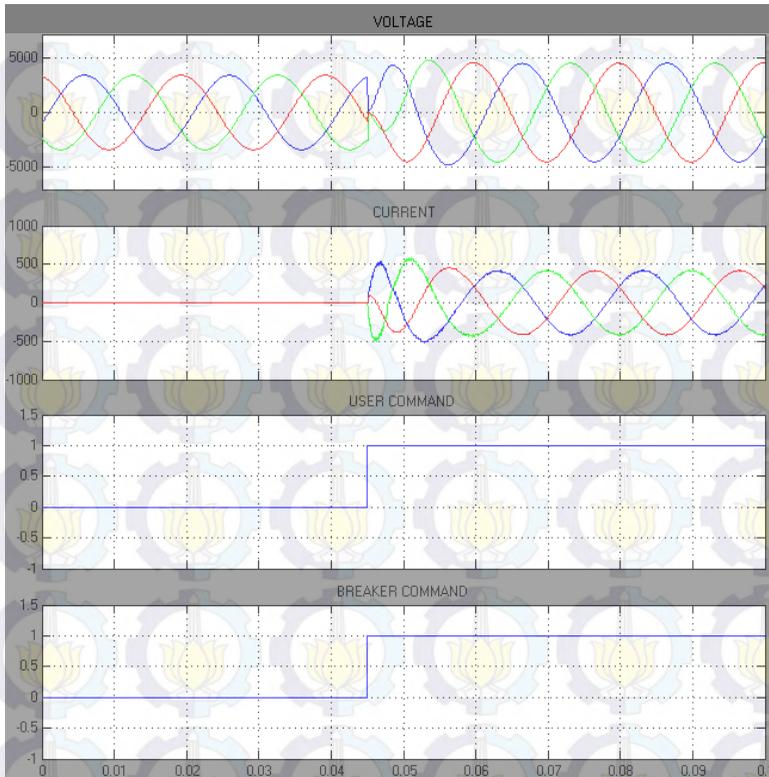
(b)

Gambar 4.23 Respon arus dan tegangan dengan *Single Capacitor Bank Switching* bus beban (a) respon tegangan, (b) respon arus.

Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa proses *switching* menimbulkan tegangan puncak transien sebesar 4.76kV atau 1.51 pu. Sedangkan pada arus, terjadi lonjakan sebesar 944A atau 1.53 pu. Tegangan puncak *steady* 4.3kV dan nominal 3.04 yaitu lebih rendah 3% dari tegangan standar 3.15kV, masih dalam batas toleransi $\pm 5\%$. Sedangkan arus puncak *steady* puncak 875A dan nominal 618A. Faktor daya terkoreksi dari 0.66 menjadi 0.97.

4.3.3.4 Respon Bus Kapasitor

Hasil simulasi pada bus kapasitor setelah dilakukan *Single Capacitor Bank Switching* adalah sebagai berikut :



Gambar 4.24 Respon arus dan tegangan dengan *Single Capacitor Bank Switching* bus kapasitor (atas) respon tegangan, (bawah) respon arus.

Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa proses *switching* menimbulkan tegangan puncak transien sebesar 5.13kV atau 1.63 pu. Sedangkan pada arus, terjadi lonjakan sebesar 578A atau 1.96 pu. Tegangan puncak *steady* 4.48kV dan nominal 3.17 yaitu lebih tinggi 0.4% dari tegangan standar 3.15kV, masih dalam batas toleransi $\pm 5\%$. Sedangkan arus puncak *steady* 418A dan nominal 295A. Faktor daya terkoreksi dari 0.66 menjadi 0.97.

Dari hasil simulasi di atas, dapat diambil data dalam bentuk tabel seperti yang ditunjukkan berikut ini :

Tabel 4.2 Standar tegangan pada masing-masing bus.

Lokasi Bus	Standar Teg. Nominal	Standar Arus Nominal
	kV	A
Sumber 20kV	20.8	206
Sumber 3.15kV	3.15	1,305
Beban A2	3.15	619
Kapasitor A2	3.15	296

Nilai standar tersebut digunakan sebagai acuan untuk menentukan nilai pu (*per unit*) dan merupakan nilai standar perusahaan.

Tabel 4.3 Tegangan dan arus transien pada pengoperasian *Single Capacitor Bank Switching*.

Lokasi Bus	Tegangan Transien		Arus Transien	
	kV	pu	A	pu
Sumber 20kV	30.72	1.48	351	1.71
Sumber 3.15kV	8.9	2.83	2224	1.70
Beban A2	4.76	1.51	944	1.53
Kapasitor A2	5.13	1.63	578	1.96

Tabel 4.4 Perbandingan nilai *steady* sebelum dan sesudah proses *Single Capacitor Bank Switching*.

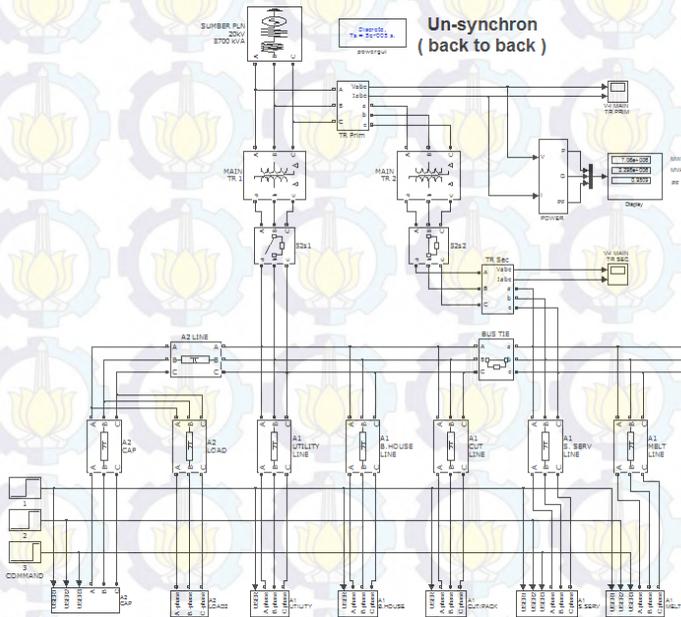
Lokasi Bus	Teg <i>Steady</i>		Toleransi	Arus <i>Steady</i>		Kenaikan
	Sblm.	Sdh.		Sblm.	Sdh.	
	kV	kV	%	A	A	%
Sumber 20kV	16.97	20.0	-3.45	153.4	205.7	34.1
Sumber 3.15kV	2.47	3.18	1.02	971.5	1,304.6	34.2
Beban A2	2.72	3.04	-3.47	468.8	618.72	31.9
Kapasitor A2	2.40	3.17	0.57	0.00	295.57	-

Tabel 4.5 Perbandingan faktor daya sebelum dan sesudah proses *Single Capacitor Bank Switching*.

Lokasi	Faktor Daya	
	Sebelum	Sesudah
Sumber 20kV	0.66	0.97

4.3.4 Pengoperasian *Back to Back Capacitor Bank Switching*

Pengoperasian *Back to Back Capacitor Switching* dilakukan pada $t=0.045$, $t=0.055$ dan $t=0.065$ detik secara berturut-turut.

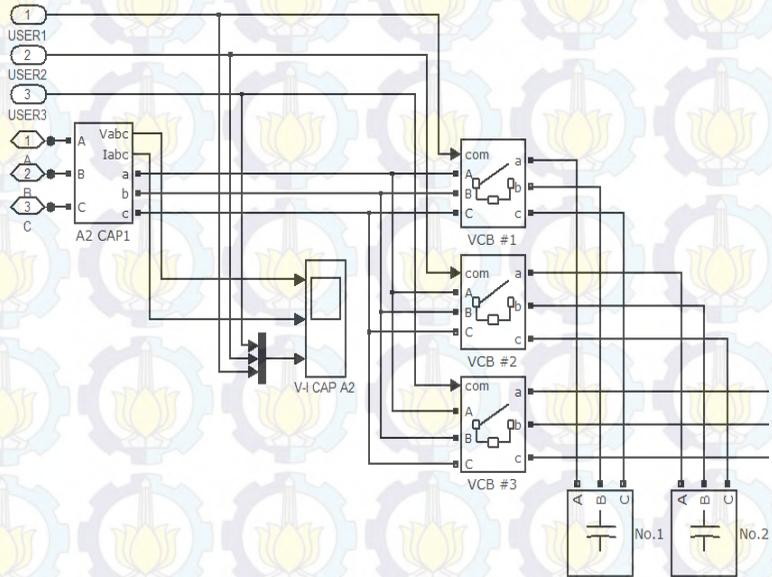


Gambar 4.25 Pemodelan sistem dengan metode *Back to Back Capacitor Switching* dengan MATLAB Simulink.

Setiap kapasitor dikendalikan oleh sinyal *logic* dari tiga *timer*. Masing-masing *timer* mengirimkan sinyal ke kapasitor dengan waktu yang ditentukan, yaitu $t=0.045$, $t=0.055$ dan $t=0.065$ detik.

Untuk kapasitor, yang digunakan untuk observasi adalah kapasitor unit A2. Setiap kapasitor dikendalikan oleh VCB dan VCB sendiri dikontrol oleh sinyal dari terminal “com” dengan diberi nama label

“user”. Setiap kapasitor dikendalikan oleh sinyal *logic* dari tiga *timer*. Masing-masing *timer* mengirimkan sinyal ke kapasitor dengan waktu yang ditentukan, yaitu $t=0.045$, $t=0.055$ dan $t=0.065$ detik.

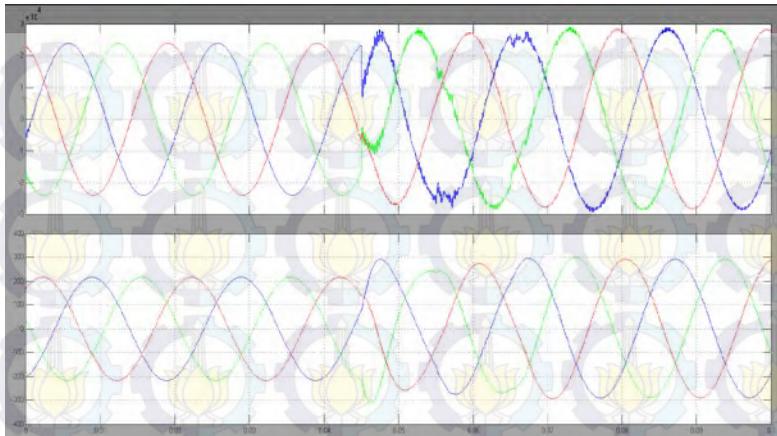


Gambar 4.26 Pemodelan kapasitor dengan metode *Back to Back Capacitor Switching* dengan MATLAB Simulink.

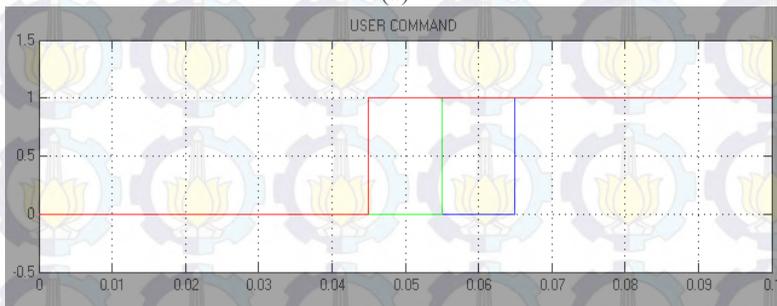
Pada saluran sumber 3kV diberikan blok pengukuran tegangan dan arus yang melewati kapasitor. Dari blok ini, dihubungkan dengan blok *scope* yang berfungsi untuk menampilkan grafik sinyal tegangan dan arus. Selain itu, blok *scope* juga menampilkan grafik sinyal kontrol yang mengendalikan VCB. Dari sinyal tersebut, diperoleh data untuk analisa.

4.3.4.1 Respon Bus Sumber 20kV

Hasil simulasi pada bus sumber 20kV setelah dilakukan *Back to Back Capacitor Switching* adalah sebagai berikut :



(a)



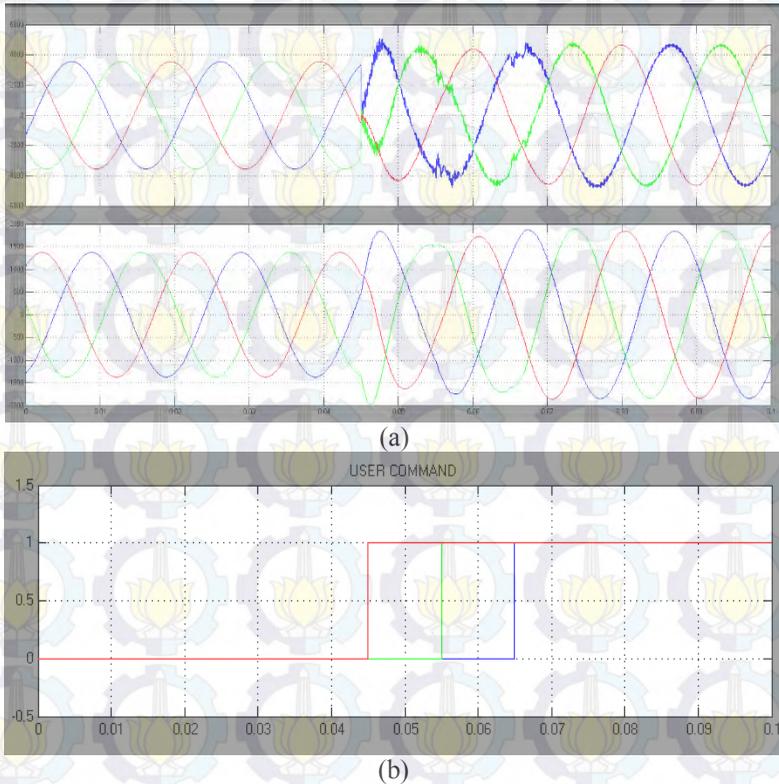
(b)

Gambar 4.27 Respon arus dan tegangan dengan *Back to Back Capacitor Switching* sumber 20kV (a) respon tegangan dan arus, (b) sinyal breaker.

Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa proses *switching* menimbulkan tegangan puncak transien sebesar 30kV atau 1.44 pu. Sedangkan pada arus, terjadi lonjakan sebesar 299A atau 1.45 pu. Tegangan nominal setelah *switching* adalah 20.08 yaitu -3.4% dari tegangan standar 3.15kV. Sedangkan arus *steady* puncak menjadi 291A dan nominal 205.77A. Faktor daya terkoreksi dari 0.66 menjadi 0.97.

4.3.4.2 Respon Bus Sumber 3kV

Hasil simulasi pada bus sumber 3kV setelah dilakukan *Back to Back Capacitor Switching* adalah sebagai berikut :



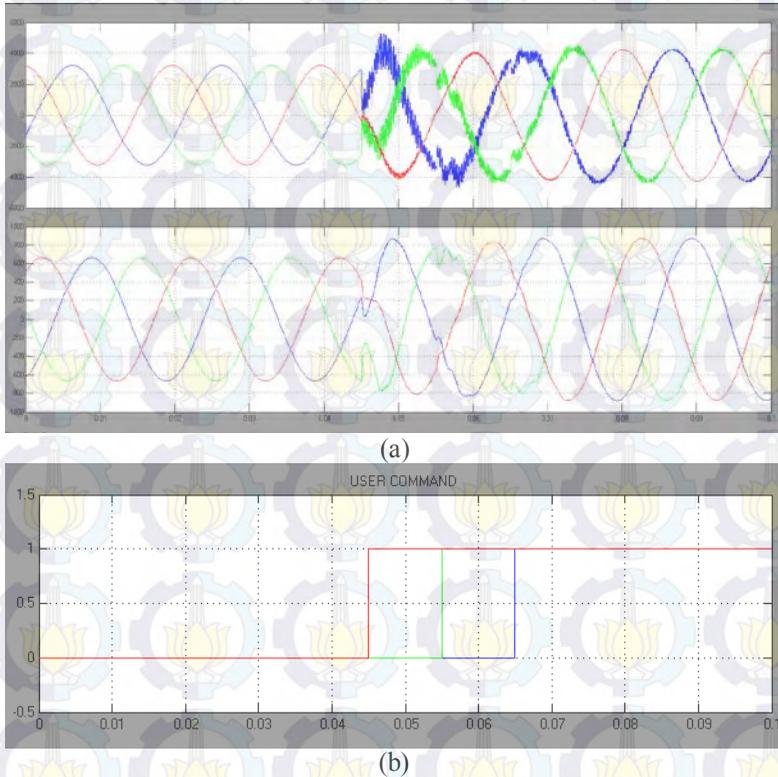
Gambar 4.28 Respon arus dan tegangan dengan *Back to Back Capacitor Switching* sumber 3kV (a) respon tegangan dan arus, (b) sinyal breaker.

Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa proses *switching* menimbulkan tegangan puncak transien sebesar 5.06kV atau 1.61 pu. Sedangkan pada arus, terjadi lonjakan sebesar 1984A atau 1.52 pu. Tegangan nominal setelah *switching* adalah 3.18kV yaitu 1% dari tegangan s tandar 3.15kV. Sedangkan arus *steady* puncak menjadi

1845A dan nominal 1304A. Faktor daya terkoreksi dari 0.66 menjadi 0.97.

4.3.4.3 Respon Bus Beban A2

Hasil simulasi pada bus beban setelah dilakukan *Back to Back Capacitor Switching* adalah sebagai berikut :



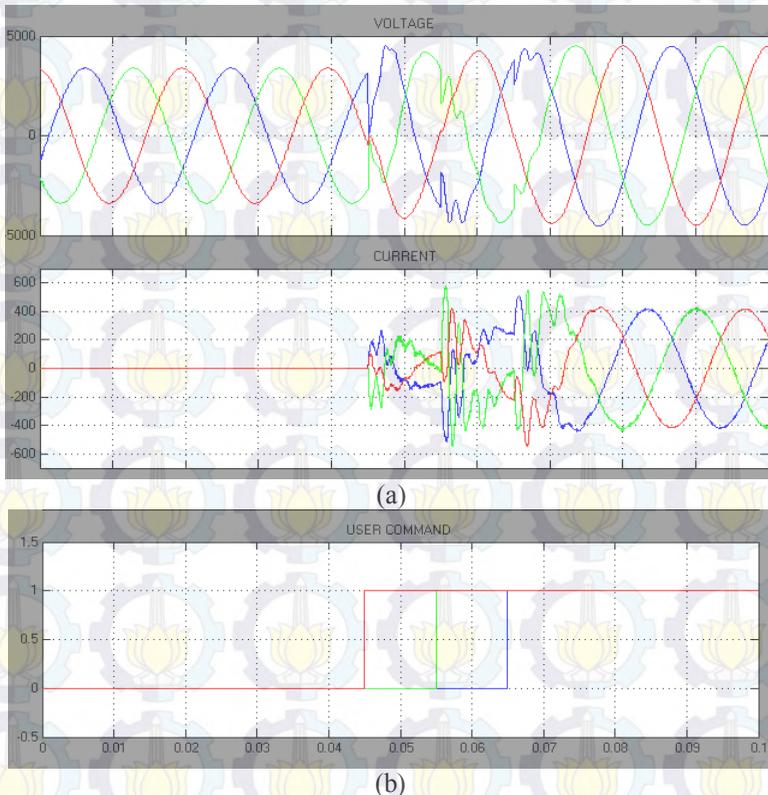
Gambar 4.29 Respon arus dan tegangan dengan *Back to Back* pada bus beban A2 (a) respon tegangan dan arus, (b) sinyal breaker.

Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa proses *switching* menimbulkan tegangan puncak transien sebesar 5.29kV atau 1.68 pu. Sedangkan pada arus, terjadi lonjakan sebesar 900A atau 1.45 pu. Tegangan nominal setelah *switching* adalah 3.04kV yaitu 3.4% dari

tegangan standar 3.15kV. Sedangkan arus *steady* puncak menjadi 875A dan nominal 618A. Faktor daya terkoreksi dari 0.66 menjadi 0.97.

4.3.4.4 Respon Bus Kapasitor

Hasil simulasi pada bus kapasitor setelah dilakukan *Back to Back Capacitor Switching* adalah sebagai berikut :



Gambar 4.30 Respon arus dan tegangan dengan *Back to Back Capacitor Switching* bus kapasitor (a) respon tegangan, (b) respon arus.

Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa proses *switching* menimbulkan tegangan puncak transien sebesar 4.51kV atau 1.43 pu. Sedangkan pada arus, terjadi lonjakan sebesar 580A atau 1.96 pu. Tegangan nominal setelah *switching* adalah 3.17kV yaitu 0.5% dari

tegangan standar 3.15kV. Sedangkan arus *steady* puncak menjadi 418A dan nominal 295.5A. Faktor daya terkoreksi dari 0.66 menjadi 0.97.

Dari hasil simulasi di atas, dapat diambil data dalam bentuk tabel seperti yang ditunjukkan berikut ini :

Tabel 4.6 Standar tegangan pada masing-masing bus.

Lokasi Bus	Standar Teg. Nominal	Standar Arus Nominal
	kV	A
Sumber 20kV	20.8	206
Sumber 3.15kV	3.15	1,305
Beban A2	3.15	619
Kapasitor A2	3.15	296

Nilai standar tersebut digunakan sebagai acuan untuk menentukan nilai pu (*per unit*) dan merupakan nilai standar perusahaan.

Tabel 4.7 Tegangan dan arus transien pada pengoperasian *Back to Back Capacitor Switching*.

Lokasi Bus	Tegangan Transien		Arus Transien	
	kV	pu	A	pu
Sumber 20kV	30	1.44	299	1.45
Sumber 3.15kV	5.06	1.61	1984	1.52
Beban A2	5.29	1.68	900	1.45
Kapasitor A2	4.51	1.43	580	1.96

Tabel 4.8 Perbandingan nilai *steady* sebelum dan sesudah proses *Back to Back Capacitor Switching*.

Lokasi Bus	Teg <i>Steady</i>		Toleransi	Arus <i>Steady</i>		Kenaikan
	Sblm.	Sdh.		Sblm.	Sdh.	
	kV	kV	%	A	A	%
Sumber 20kV	16.97	20.0	-3.45	153.4	205.7	34.1
Sumber 3.15kV	2.47	3.18	1.02	971.5	1,304.6	34.2
Beban A2	2.72	3.04	-3.47	468.8	618.72	31.9

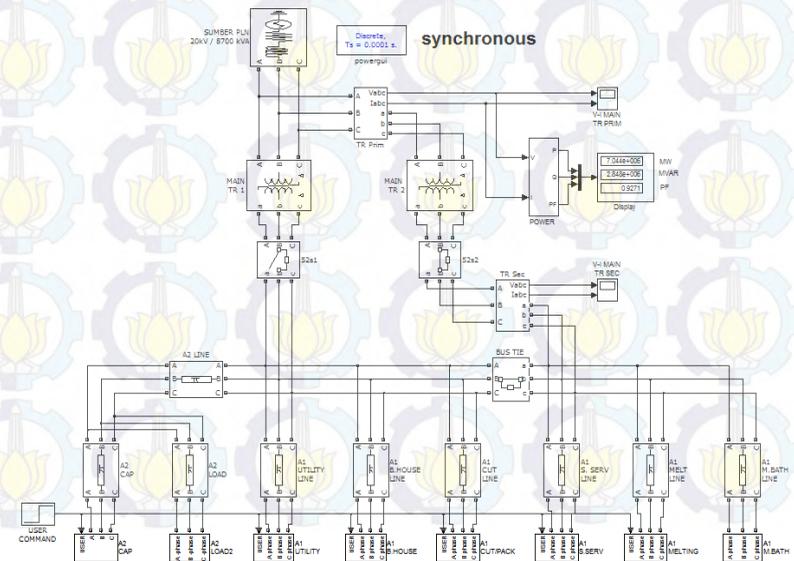
Kapasitor A2	2.40	3.17	0.57	0.00	295.57	-
--------------	------	------	------	------	--------	---

Tabel 4.9 Perbandingan faktor daya sebelum dan sesudah proses *Back to Back Capacitor Switching*.

Lokasi	Faktor Daya	Faktor Daya
	Sebelum	Sesudah
Sumber 20kV	0.66	0.97

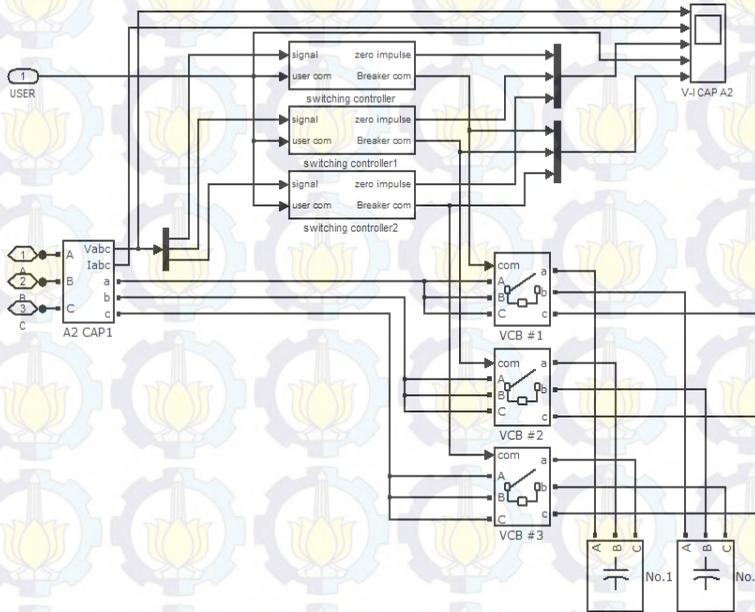
4.3.5 Pengoperasian *Synchronous Closing Breaker* untuk *Capacitor Bank Switching*

Pengoperasian *Synchronous Closing Breaker* merupakan metode terakhir yang digunakan pada simulasi ini. Metode *Synchronous Closing Breaker* ini bekerja dengan menutup VCB pada saat gelombang tegangan setiap fasa berada pada (mendekati) titik nol volt (*zero cross*). Hal ini bertujuan untuk mengurangi lonjakan tegangan transien serendah mungkin. Perintah menutup (*close*) VCB oleh operator tidak selalu berada pada posisi nol volt, untuk itu dibuat satu kontroler untuk menunda waktu perintah *close* ini hingga gelombang tegangan sampai pada titik mendekati nol volt.



Gambar 4.31 Pemodelan sistem untuk metoda *Synchronous Closing Breaker* dengan MATLAB Simulink

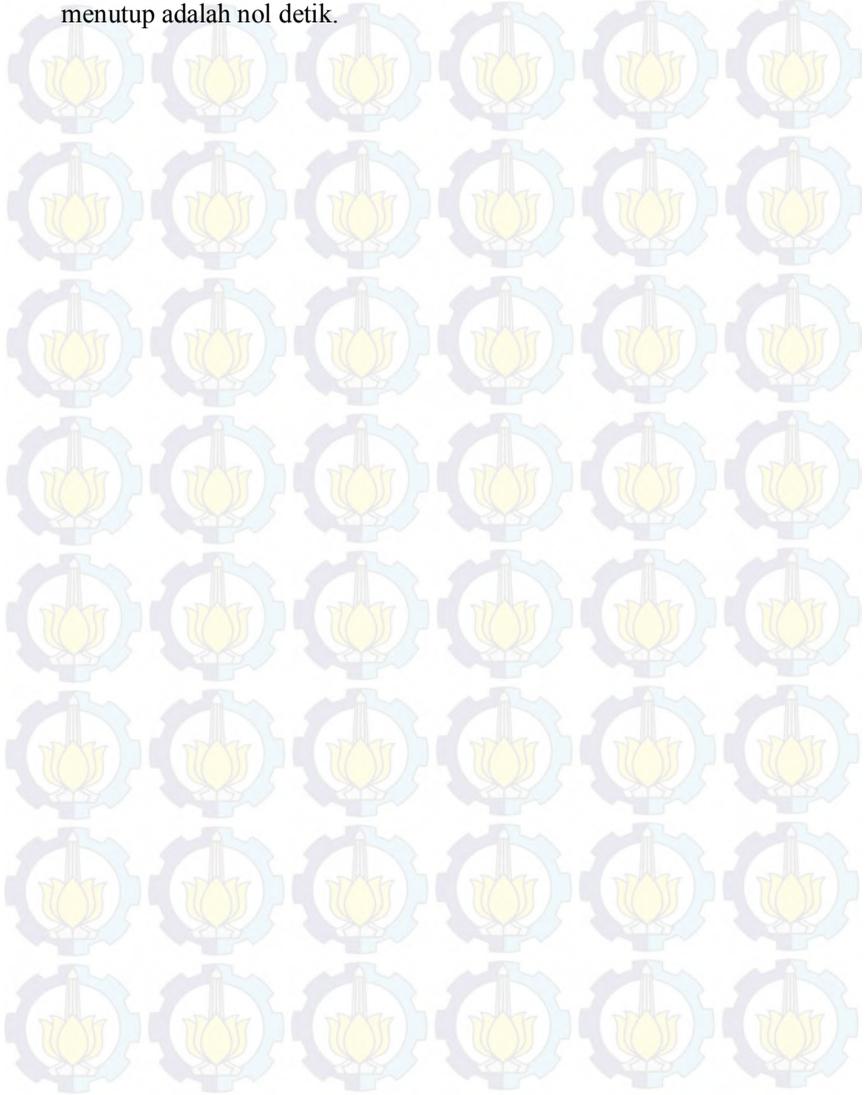
Sistem kontrol bekerja dengan selalu memonitor gelombang tegangan tiap fasa, yaitu fasa A, B dan fasa C. Gelombang tegangan dimonitor melalui *port signal* pada blok kontroler. Dikarenakan sistem ini adalah sistem tiga fasa, maka diperlukan tiga buah kontroler, yaitu *switching controller* untuk fasa A, *switching controller1* untuk fasa B, dan *switching controller2* untuk fasa C.

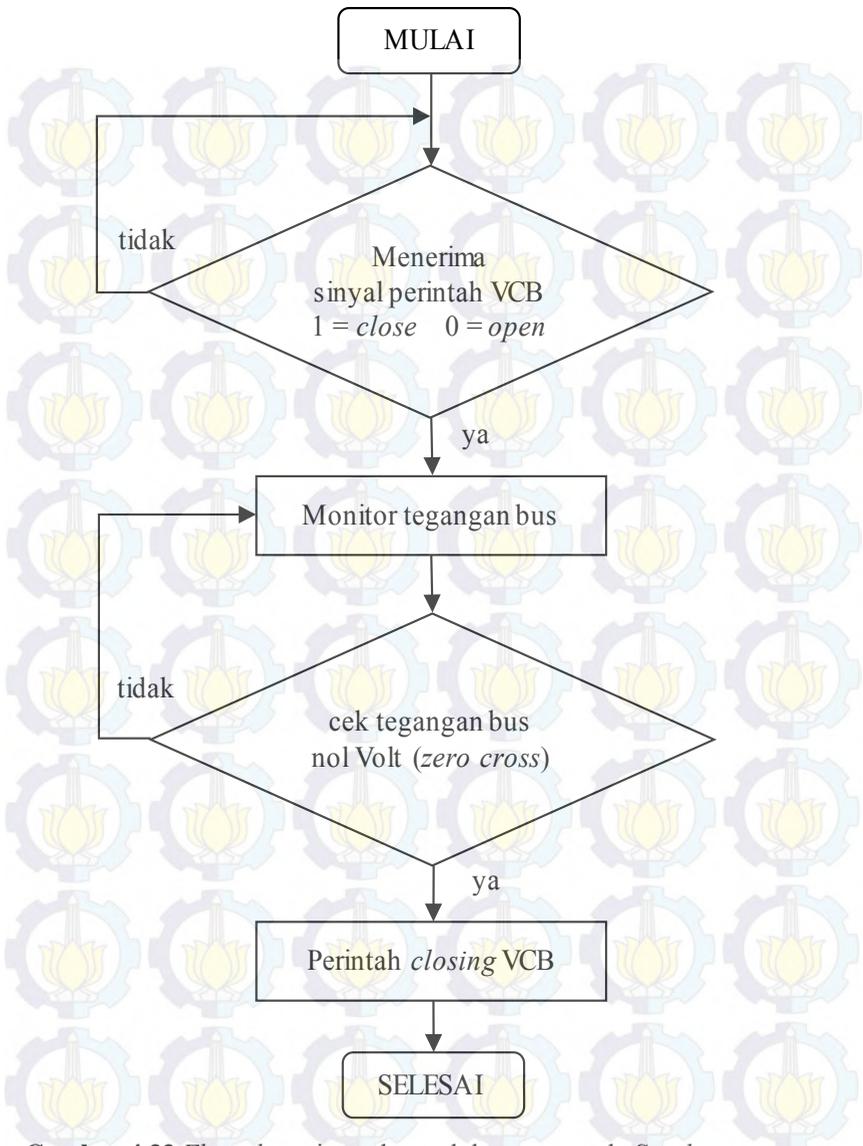


Gambar 4.32 Pemodelan kapasitor dan kontrol untuk metode *Synchronous Closing Breaker* dengan MATLAB Simulink.

Setiap kontroler menunggu perintah dari terminal *user*. Perintah tersebut berupa *logic* satu (1) dan nol (0) yang diterima dari *timer*. perintah 1 berarti permintaan VCB untuk menutup (*close*), dan sebaliknya perintah 0 berarti permintaan VCB untuk membuka (*open*). Jika permintaan VCB untuk menutup diterima, kontroler akan melakukan penundaan waktu (*delay*) sampai gelombang tegangan sampai di titik nol volt pada siklus berikutnya. Pada saat tegangan

menyeberang titik nol volt (*zero crossing*), maka seketika VCB menutup dan meng-*energize* kapasitor. Pada simulasi ini diasumsikan waktu menutup adalah nol detik.

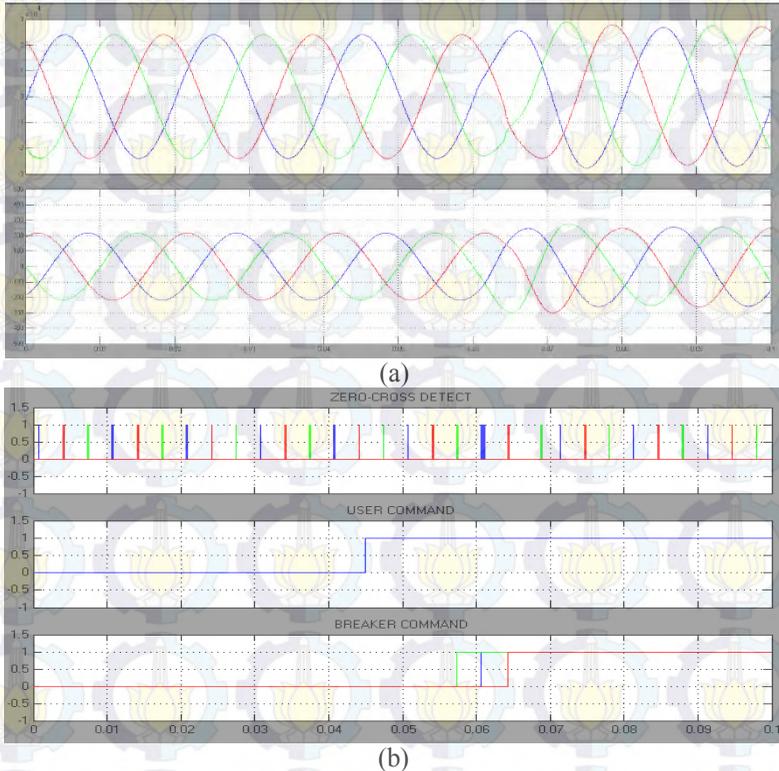




Gambar 4.33 Flow chart sistem kontrol dengan metode *Synchronous Closing Breaker*.

4.3.5.1 Respon Bus Sumber 20kV

Hasil simulasi pada bus sumber 20kV setelah dilakukan *Synchronous Closing Breaker* adalah sebagai berikut :

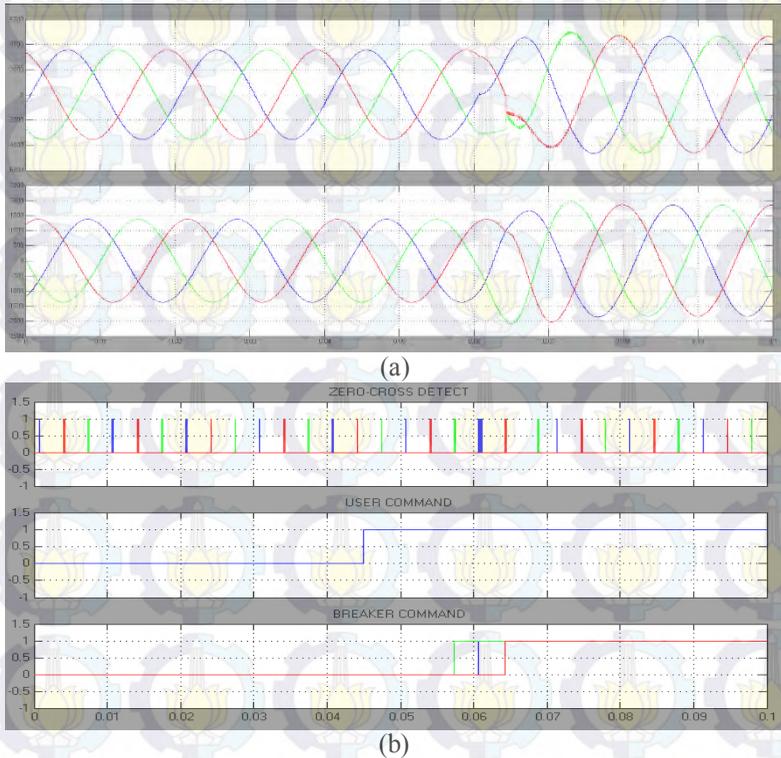


Gambar 4.34 Respon dengan metode *Synchronous Closing Breaker* pada sumber 20kV (a) respon tegangan dan arus, (b) deteksi tegangan nol, sinyal perintah operator dan sinyal perintah VCB.

Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa proses *switching* menimbulkan tegangan puncak transien sebesar 28.9kV atau 1.39 pu. Sedangkan pada arus, terjadi lonjakan sebesar 298A atau 1.45 pu. Tegangan nominal setelah *switching* adalah 20.08 yaitu -3.4% dari tegangan standar 3.15kV. Sedangkan arus *steady* puncak menjadi 290A dan nominal 205.6A. Faktor daya terkoreksi dari 0.66 menjadi 0.97.

4.3.5.2 Respon Bus Sumber 3kV

Hasil simulasi pada bus sumber 3kV setelah dilakukan *Synchronous Closing Breaker switching* adalah sebagai berikut :



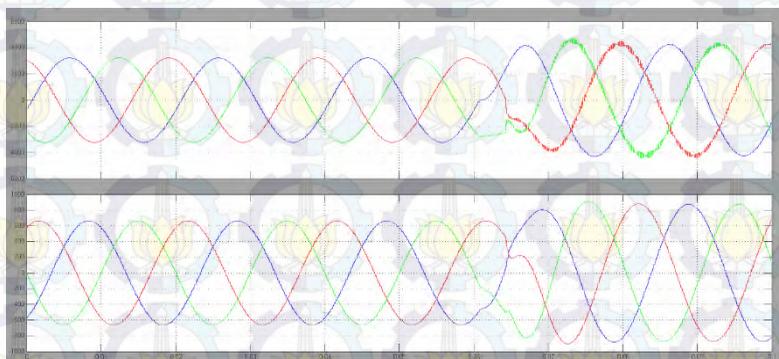
Gambar 4.35 Respon dengan metode *Synchronous Closing Breaker* pada sumber 3kV (a) respon tegangan dan arus, (b) deteksi tegangan nol, sinyal perintah operator dan sinyal perintah VCB.

Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa proses *switching* menimbulkan tegangan puncak transien sebesar 4.8kV atau 1.52 pu. Sedangkan pada arus, terjadi lonjakan sebesar 1903A atau 1.46 pu. Tegangan nominal setelah *switching* adalah 3.18kV yaitu 1% dari tegangan s tandar 3.15kV. Sedangkan arus *steady* puncak menjadi

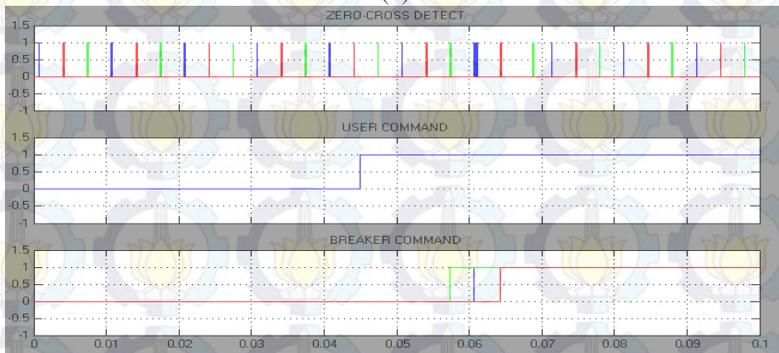
1845A dan nominal 1304A. Faktor daya terkoreksi dari 0.66 menjadi 0.97.

4.3.5.3 Respon Bus Beban

Hasil simulasi pada bus beban setelah dilakukan *Synchronous Closing Breaker* adalah sebagai berikut :



(a)



(b)

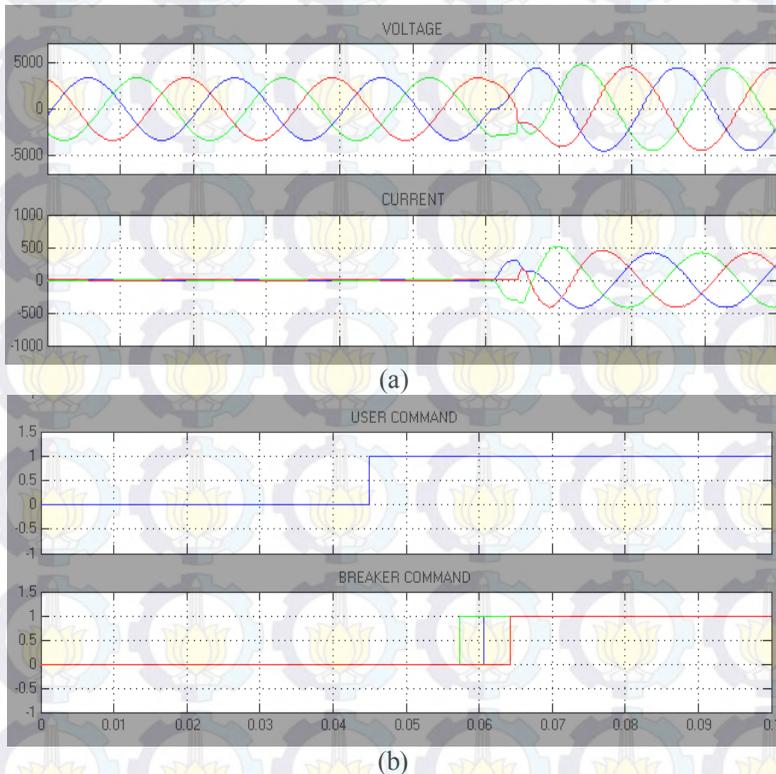
Gambar 4.36 Respon dengan metode *Synchronous Closing Breaker* pada bus 3kV beban Unit A2 (a) respon tegangan dan arus, (b) deteksi tegangan nol, sinyal perintah operator dan sinyal perintah VCB.

Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa proses *switching* menimbulkan tegangan puncak transien sebesar 4.4kV atau 1.4 pu. Sedangkan pada arus, terjadi lonjakan sebesar 900A atau 1.45 pu. Tegangan nominal setelah *switching* adalah 3.04kV yaitu -3.4% dari

tegangan standar 3.15kV. Sedangkan arus *steady* puncak menjadi 875A dan nominal 618A. Faktor daya terkoreksi dari 0.66 menjadi 0.97.

4.3.5.4 Respon Bus Kapasitor

Hasil simulasi pada bus kapasitor setelah dilakukan *Synchronous Closing Breaker* adalah sebagai berikut :



Gambar 4.37 Respon dengan metode *Synchronous Closing Breaker* pada bus kapasitor Unit A2 (a) respon tegangan dan arus, (b) deteksi tegangan nol, sinyal perintah operator dan sinyal perintah VCB.

Dari hasil simulasi di atas dapat dilihat bahwa proses *switching* menimbulkan tegangan puncak transien sebesar 4.7kV atau 1.49 pu. Sedangkan pada arus, terjadi lonjakan sebesar 580A atau 1.96 pu. Tegangan nominal setelah *switching* adalah 3.17kV yaitu 0.5% dari

tegangan standar 3.15kV. Sedangkan arus *steady* puncak menjadi 418A dan nominal 294.8A. Faktor daya terkoreksi dari 0.66 menjadi 0.97.

Dari hasil simulasi di atas, dapat diambil data dalam bentuk tabel seperti yang ditunjukkan berikut ini :

Tabel 4.10 Standar tegangan pada masing-masing bus.

Lokasi Bus	Standar Teg. Nominal	Standar Arus Nominal
	kV	A
Sumber 20kV	20.8	206
Sumber 3.15kV	3.15	1,305
Beban A2	3.15	619
Kapasitor A2	3.15	296

Nilai standar tersebut digunakan sebagai acuan untuk menentukan nilai pu (*per unit*) dan merupakan nilai standar perusahaan.

Tabel 4.11 Tegangan dan arus transien pada pengoperasian *Synchronous Closing Breaker*.

Lokasi Bus	Tegangan Transien		Arus Transien	
	kV	pu	A	pu
Sumber 20kV	28.9	1.39	298	1.45
Sumber 3.15kV	4.8	1.52	1903	1.46
Beban A2	4.4	1.40	891	1.44
Kapasitor A2	4.7	1.49	359	1.21

Tabel 4.12 Perbandingan nilai *steady* sebelum dan sesudah proses *Synchronous Closing Breaker*.

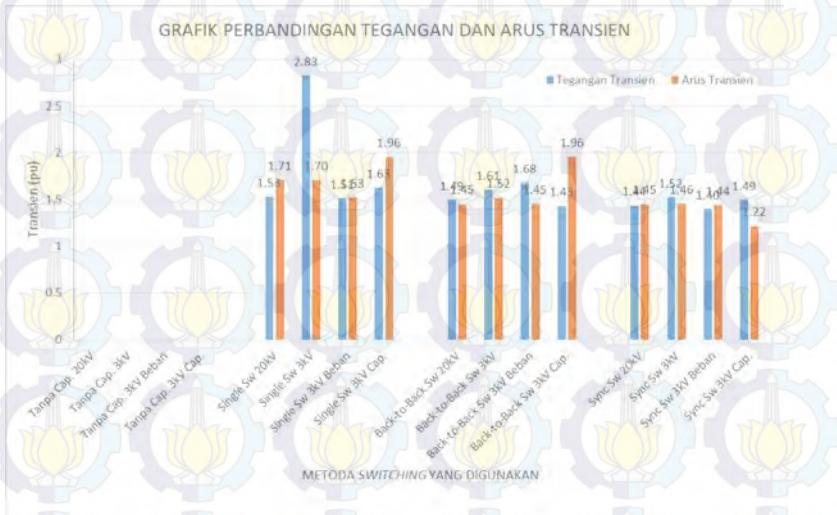
Lokasi Bus	Teg <i>Steady</i>		Toleransi	Arus <i>Steady</i>		Ken aikan
	Sblm.	Sdh.		Sblm.	Sdh.	
	kV	kV	%	A	A	%
Sumber 20kV	16.97	20.0	-3.45	153.4	205.7	34.1
Sumber 3.15kV	2.47	3.18	1.02	971.5	1,304.6	34.2
Beban A2	2.72	3.04	-3.47	468.8	618.72	31.9

Kapasitor A2	2.40	3.17	0.57	0.00	295.57	-
--------------	------	------	------	------	--------	---

Tabel 4.13 Perbandingan faktor daya sebelum dan sesudah proses *Synchronous Closing Breaker*.

Lokasi	Faktor Daya	Faktor Daya
	Sebelum	Sesudah
Sumber 20kV	0.66	0.97

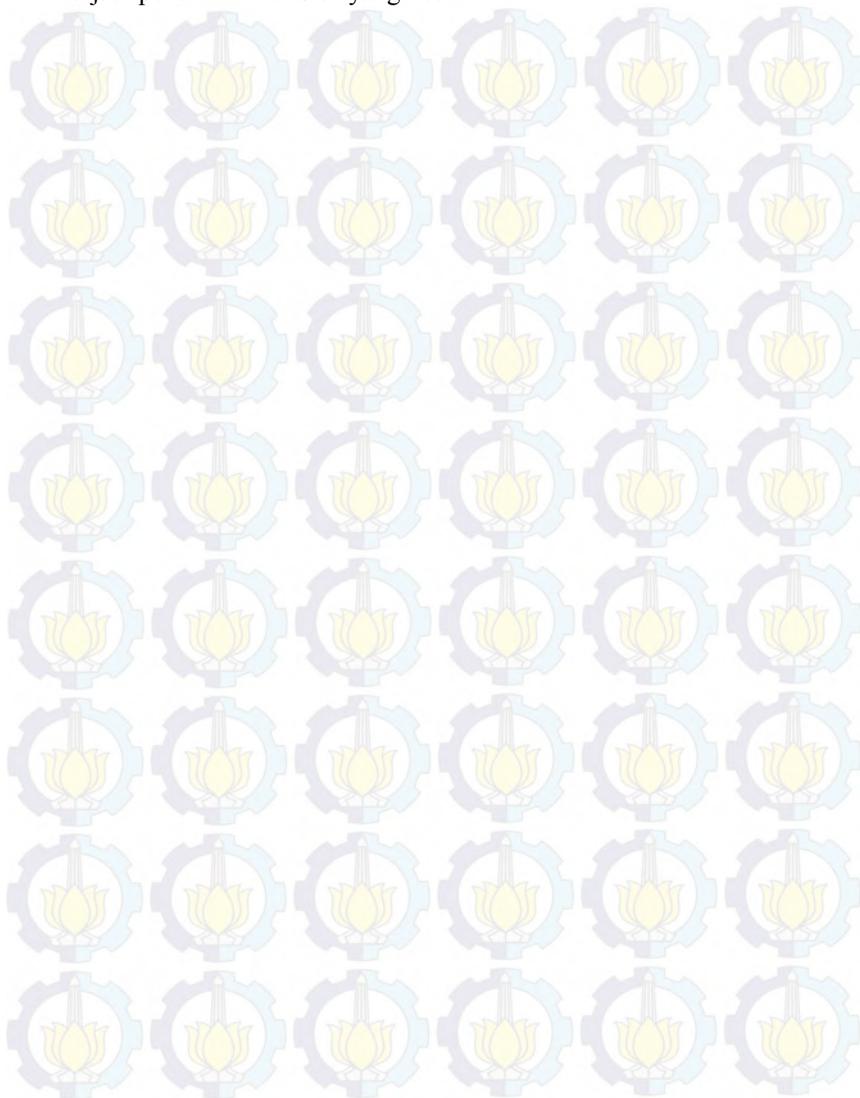
Dari data-data yang diperoleh dari ke-empat simulasi di atas, dapat ditampilkan pada sebuah grafik batang yang ditunjukkan oleh gambar 4.38 berikut :



Gambar 4.38 Grafik nilai tegangan dan arus transien (dari kiri), tanpa kapasitor, *Single Switching*, *Back-to-Back Switching* dan *Synchronous Closing Breaker Switching*.

Dari grafik di atas terlihat bahwa nilai tegangan transien terbesar terjadi pada bus sumber 3kV dengan metode *Single Switching*. Arus transien terbesar terjadi pada bus kapasitor Unit A2 pada metode *Single Switching* dan metode *Back-to-Back Switching*. Efek transien tersebut berkurang secara signifikan pada saat menggunakan metode

Synchronous Closing Breaker Switching. Sedangkan pada bus yang lain terjadi penurunan transien yang kecil.



BAB 5

PENUTUP

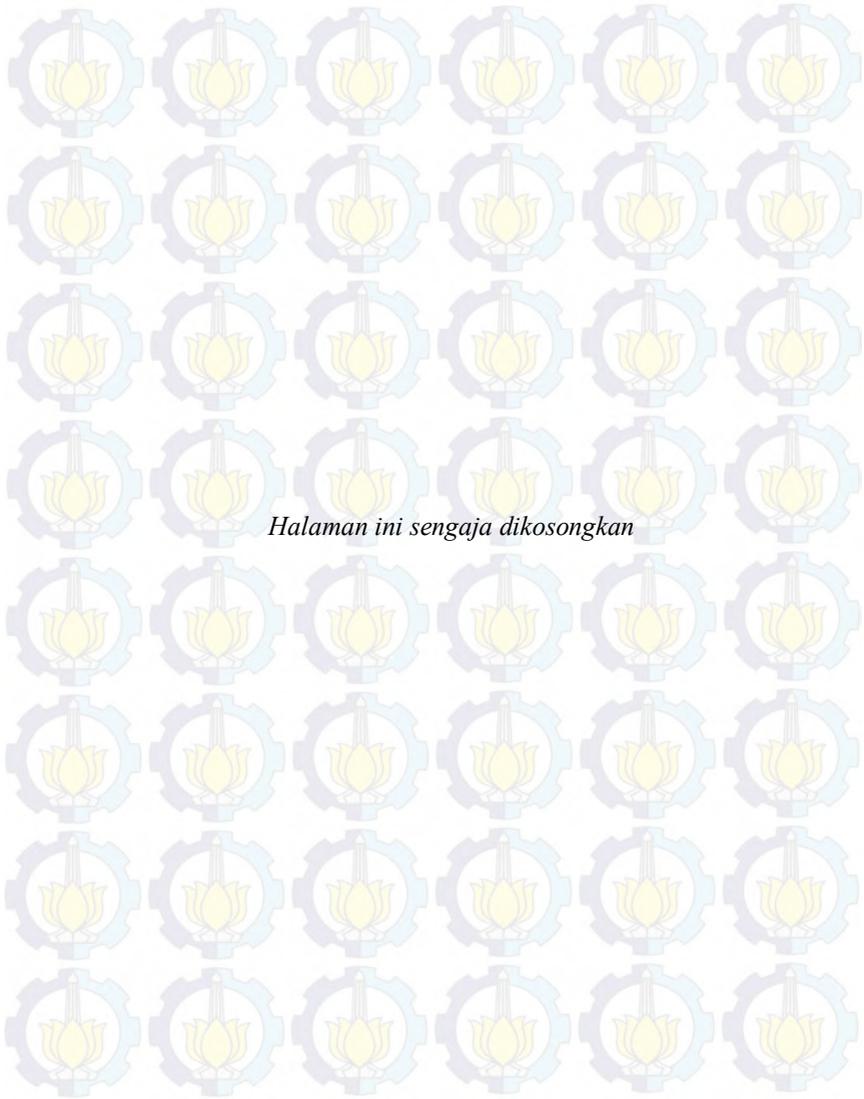
5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data yang didapat dari simulasi dan analisis, maka diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai faktor daya pada sistem kelistrikan PT. Asahimas Flat Glass Tbk sebelum menggunakan *Capacitor Bank* memiliki nilai yang rendah yaitu 0.66.
2. Penambahan *Capacitor Bank* menunjukkan kenaikan nilai faktor daya yang signifikan yaitu menjadi 0.97.
3. Berdasar hasil simulasi pada bus sumber 3kV, metode *Back to Back Switching* memiliki p erforma lebih baik 1.6 pu dibandingkan metode *Single Switching* 2.8 pu.
4. Berdasar hasil simulasi pada bus beban, metode *Single Switching* memiliki performa lebih baik 1.5 pu dibandingkan metode *Back to Back Switching* 1.68 pu.
5. Berdasar hasil simulasi pada bus kapasitor, metode *Back to Back Switching* memiliki p erforma lebih baik 1.4 pu dibandingkan metode *Single Switching* 1.6 pu.
6. Penggunaan metode *Synchronous Closing Breaker* memiliki performa terbaik dalam mengurangi tegangan transien, dibandingkan kedua metode lainnya yaitu 1.5 pu pada bus sumber 3kV. Sedangkan untuk arus transien, penurunan signifikan terjadi pada bus kapasitor yaitu 1.22 pu, dibandingkan dengan kedua metode yang lain yaitu 1.96 pu untuk *Back to Back Switching* dan juga *Single Switching*.
7. Terbukti bahwa penutupan VCB pada tegangan nol dapat mengurangi tegangan dan arus transien secara signifikan.

5.2 Saran

Berdasarkan data hasil simulasi yang didapat, diharapkan menjadi referensi dan pertimbangan dalam upaya memperbaiki sistem kelistrikan di PT. Asahimas Flat Glass Tbk. Diharapkan pula dilakukan penelitian dan pembelajaran lebih lanjut mengenai penggunaan metode *Synchronous Closing Breaker* sebagai salah satu upaya memperbaiki kualitas daya sistem kelistrikan industri.



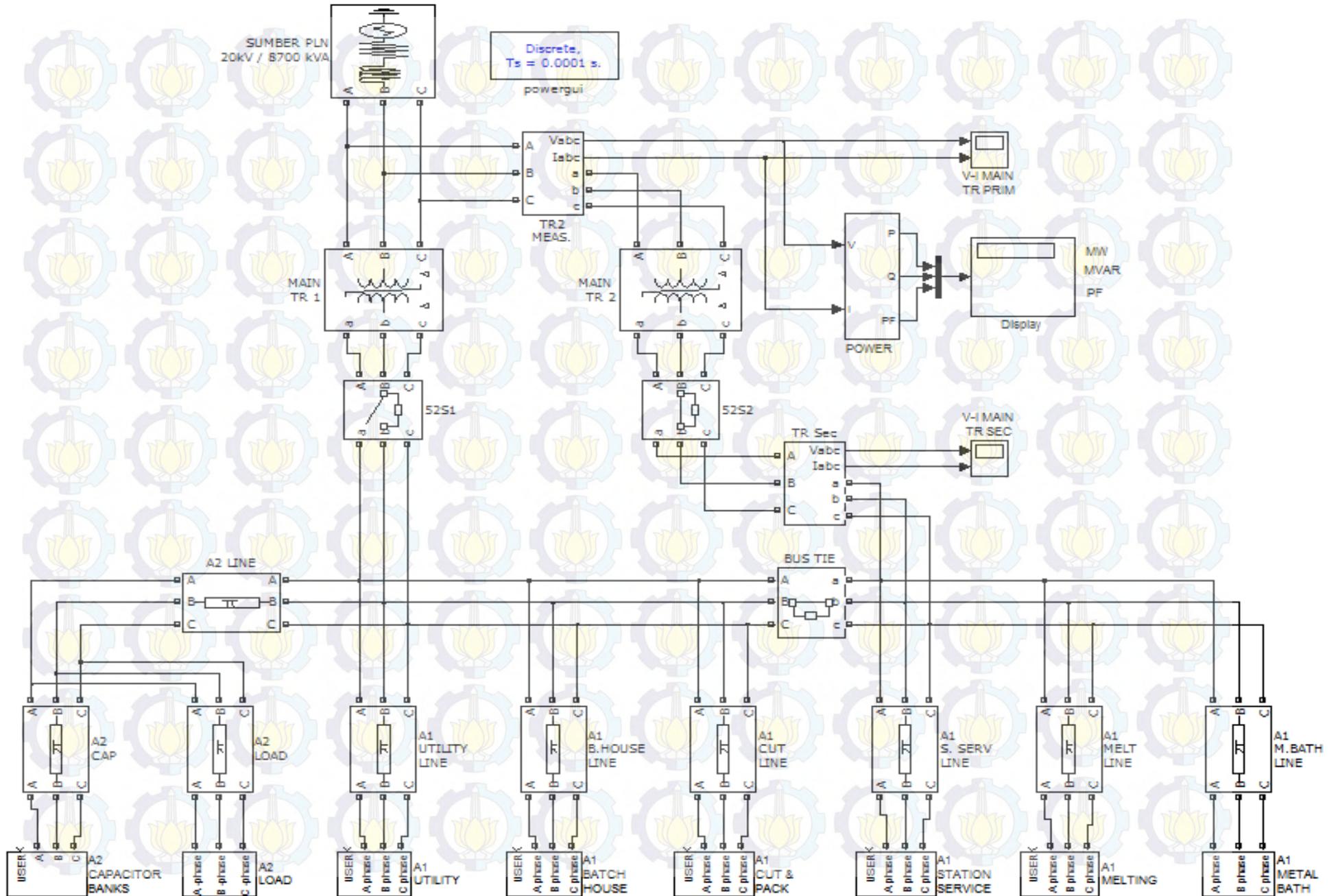
Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Camm, E.H., 1999. "Shunt Capacitor Overvoltages And Reduction Technique". **IEEE/PES Transmission And Distribution Conference And Exposition.**
- [2] Longland, T., 1985. **Power Capacitor Handbook: First Edition**, London : Butterworth & Co (Publishers) Ltd.
- [3] P abla, A.S., 1994. **Sistem Distribusi Daya Listrik**, Jakarta : Penerbit Erlangga.
- [4] Dugan, R.C., 2003. **Electrical Power System Quality: Second Edition**, New York : Ta ta McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- [5], 2008. **Entergy: Power Quality Standarts For Electric Services**, <URL:<http://www.entergy.com>>
- [6].....,2014. "*Phasor Diagram and P hasor Algebra*" <URL : <http://www.electronics-tutorials.ws/acircuits/phasors.html>>
- [7] Hoonchareon, N., 1995. "Transients in Electric Power Systems due to Shunt Capacitor Switching ". **ECE Technical Reports**, Purdue Libraries.
- [8] Das, J.C., 2005. "Analysis And Control Large Shunt Capacitor Bank Switching Transient". **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol.41, No.6, November/December.
- [9] Mupparty, Durga Bhavani., 2011 "Capacitor Switching Transient Modeling And Analysis On An Electrical Utility Distribution System Using Simulink Software" **Masters Theses. Paper 82.** <URL:http://uknowledge.uky.edu/gradschool_theses/82>
- [10] Qingjie, Zhang., Haiwen, Yuan., Yingyi, Liu., 2010 " The Operating Transient Process Analysis and Synchronous Switching Strategies Reseach of Vacuum Breaker". **IEEE Computer Society, Beijing, China.**
- [11] Marselina, Sezilia., 2012. "**Analisis Transien dan Penggunaan Metode Synchronous Closing Breaker Untuk Mengurangi Efek Transien Capacitor Bank Switching di PT. Semen Tonasa 5 "**
- [12] Product Brochure, "Switching Control Sentinel", **ABB**, 2013.



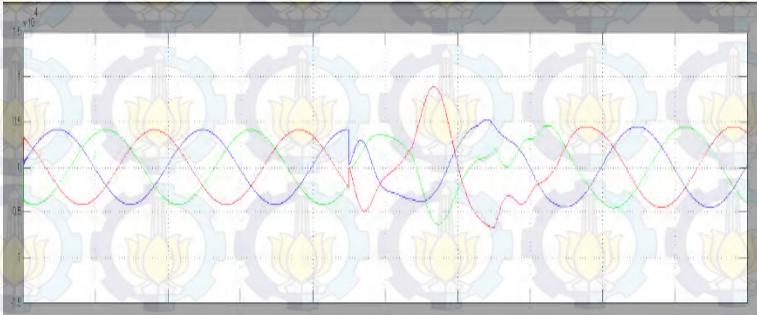
LAMPIRAN – PEMODELAN SISTEM PT. ASAHIMAS FLAT GLASS TBK.



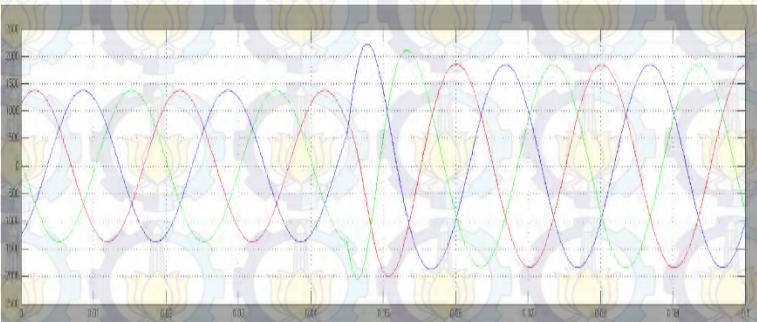
Lampiran Hasil Simulasi Sistem Menggunakan MATLAB Simulink 7.8

1. Metode *Single Switching Capacitor Bank*.

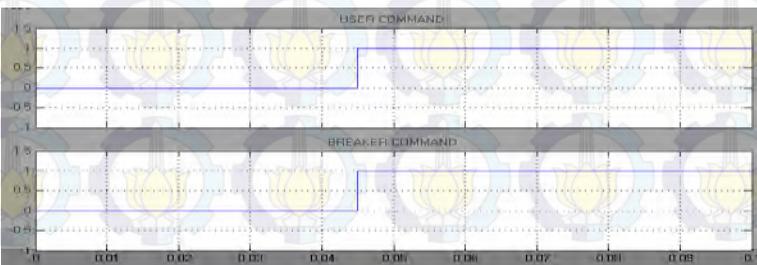
a. Bus Sumber 3kV



tegangan

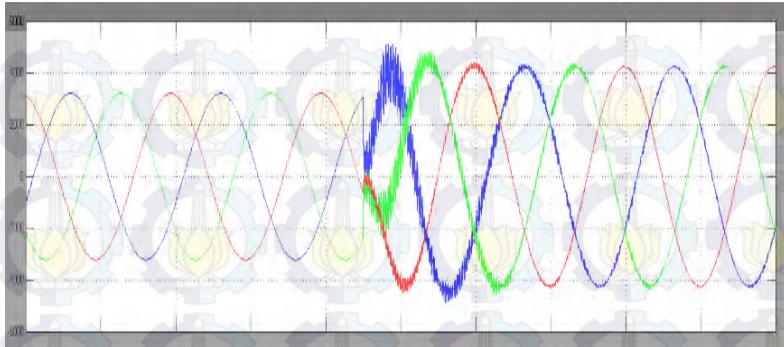


arus

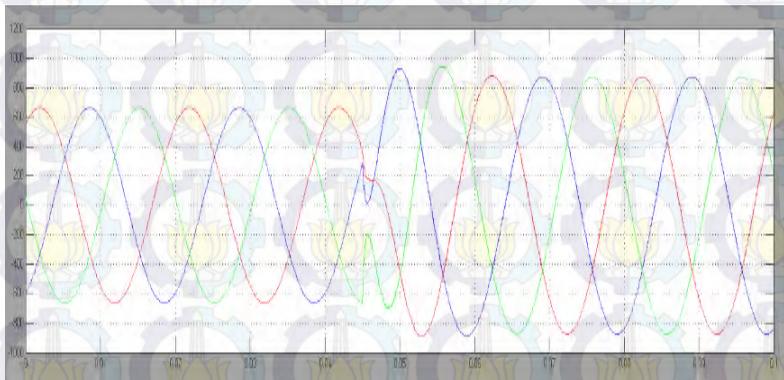


Sinyal perintah dan sinyal VCB close

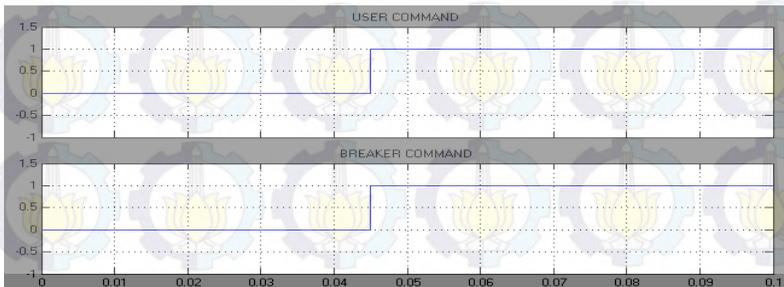
b. Bus Beban 3kV



tegangan

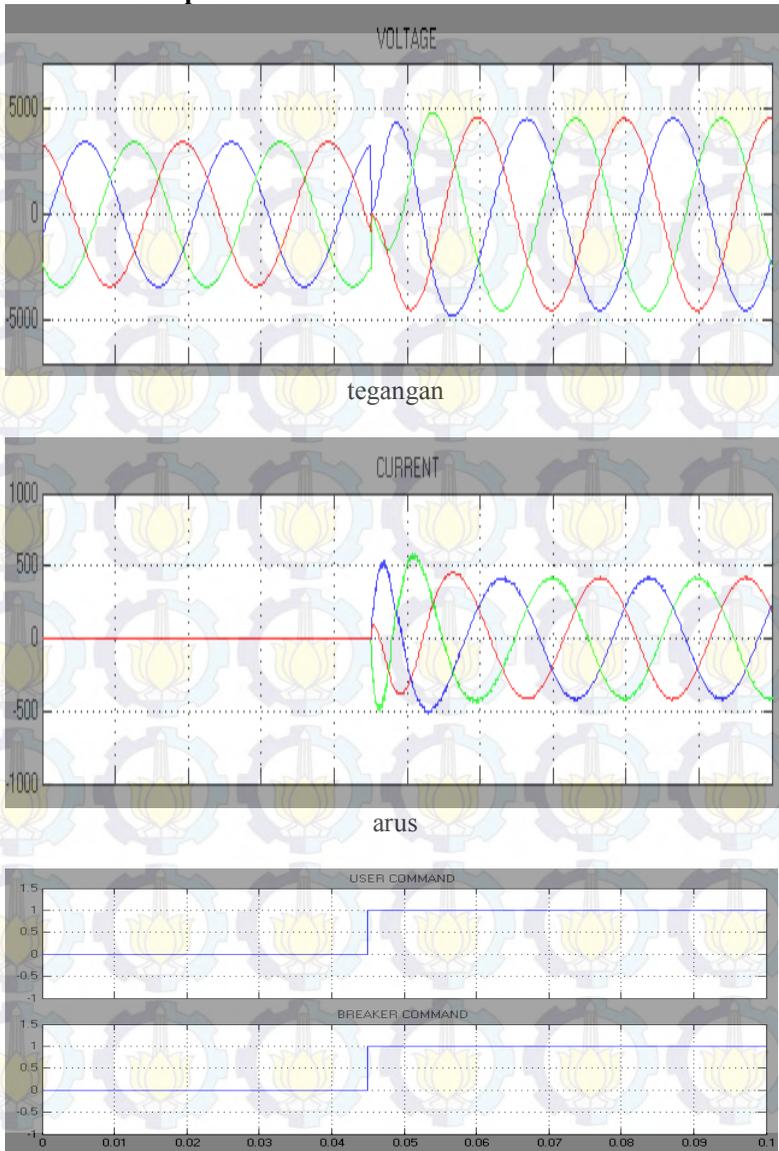


arus



Sinyal perintah dan sinyal VCB *close*

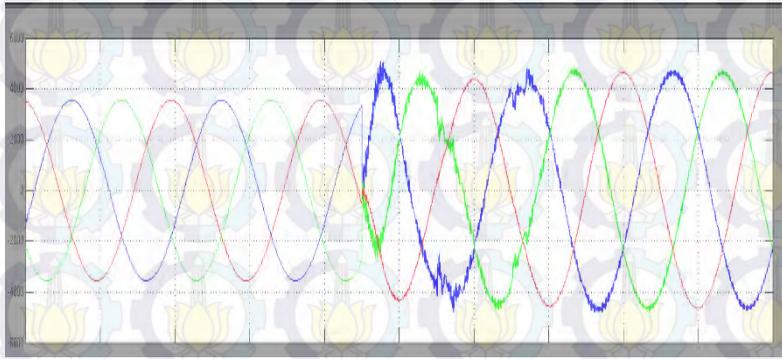
c. Bus Kapasitor



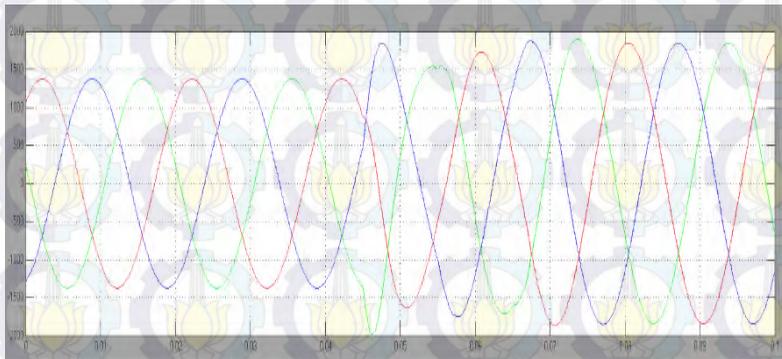
Sinyal perintah dan sinyal VCB close

2. Metode *Back to Back Capacitor Switching*.

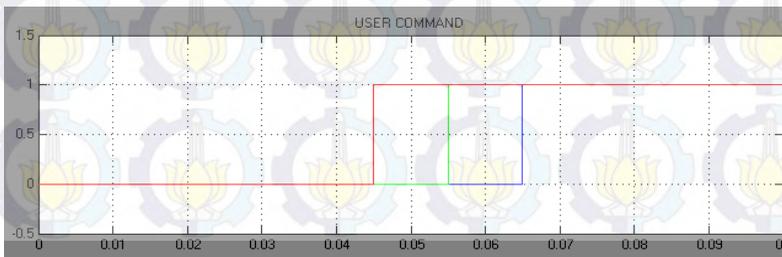
a. Bus Sumber 3kV



tegangan

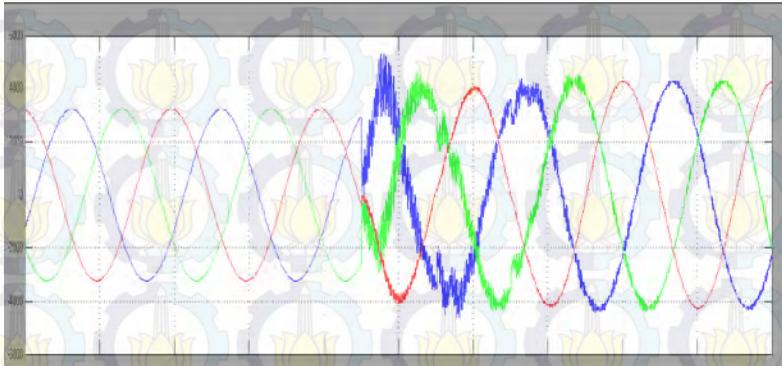


arus

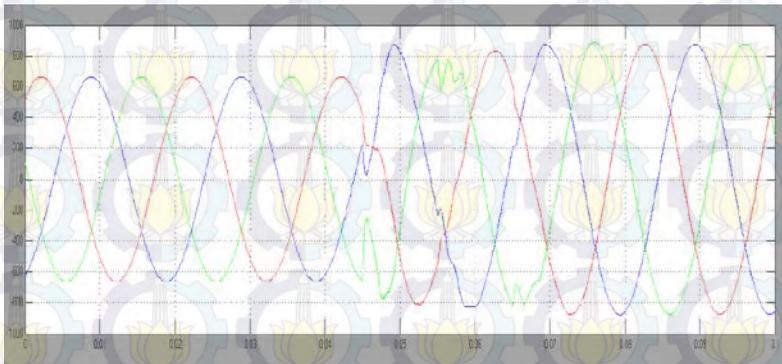


Sinyal VCB close

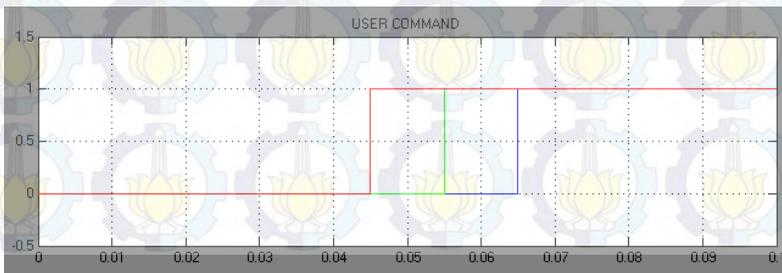
b. Bus Beban 3kV



tegangan

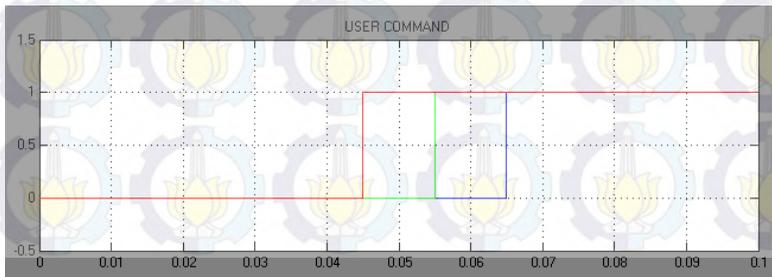
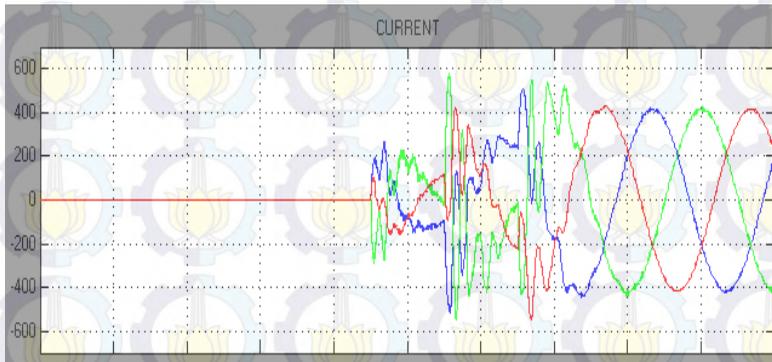
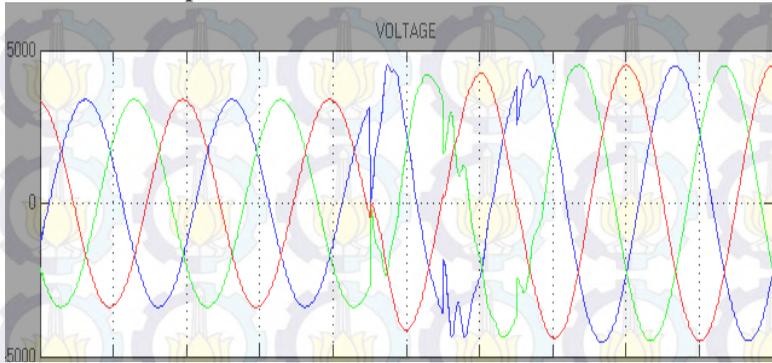


arus

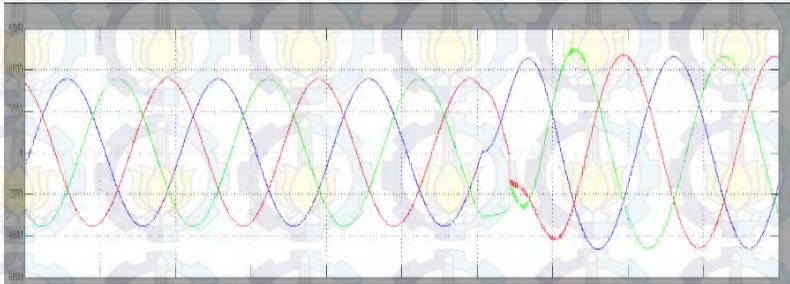


Sinyal VCB close

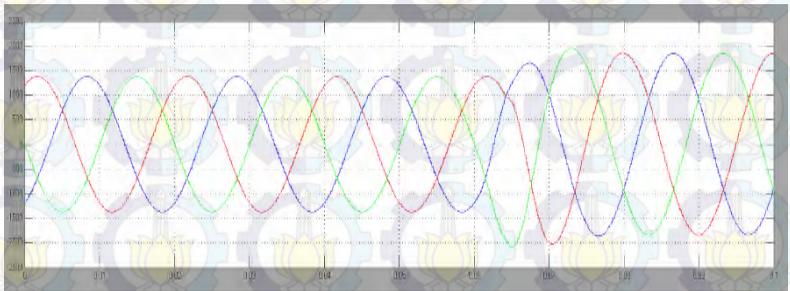
c. Bus Kapasitor



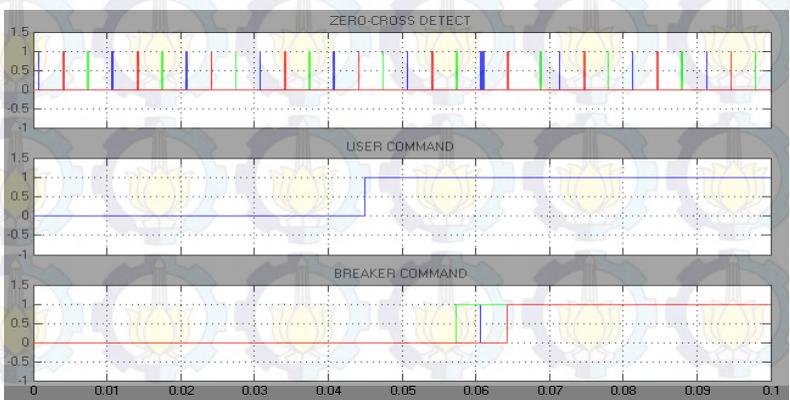
3. Metode *Synchronous Closing Breaker Capacitor Switching*. a. Bus Sumber 3kV



tegangan

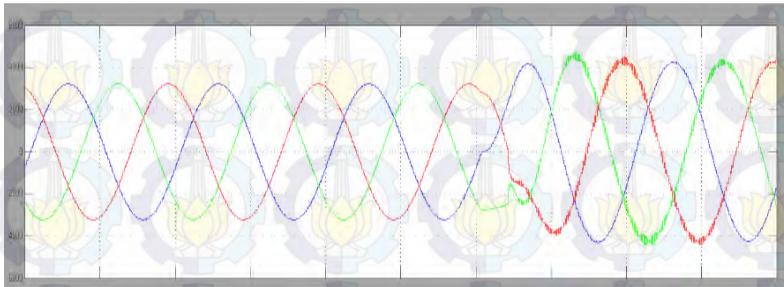


arus

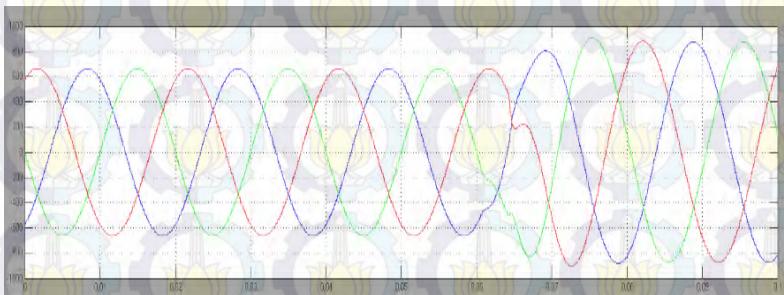


Sinyal zero crossing, perintah dan sinyal VCB close

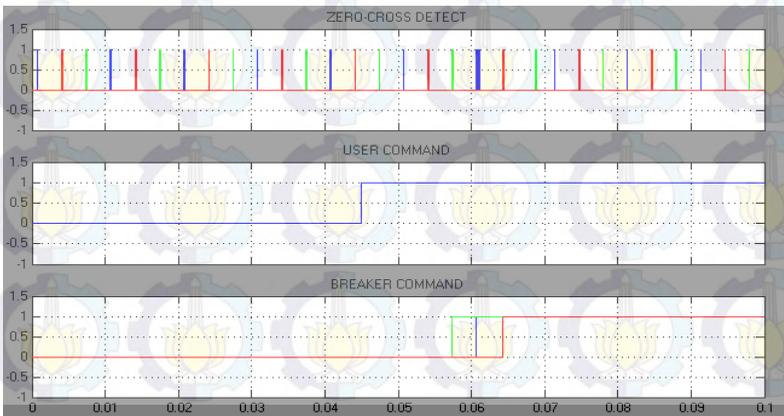
b. Bus Beban 3kV



tegangan

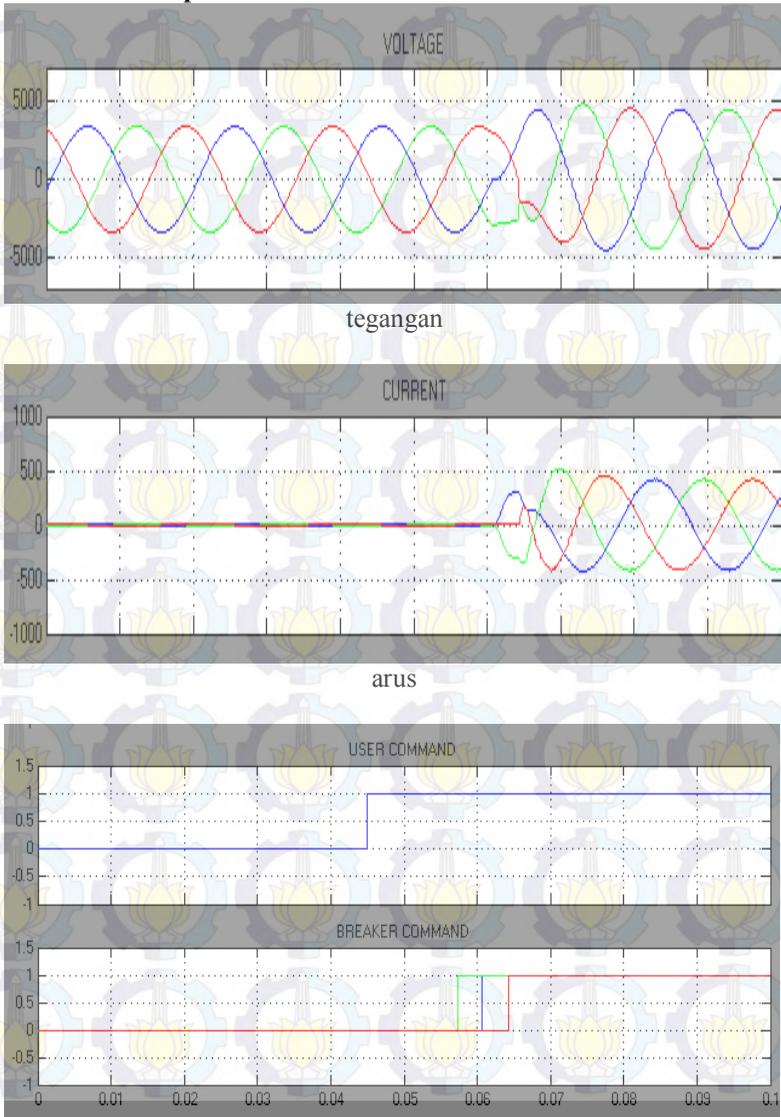


arus



Sinyal zero crossing, perintah dan sinyal VCB close

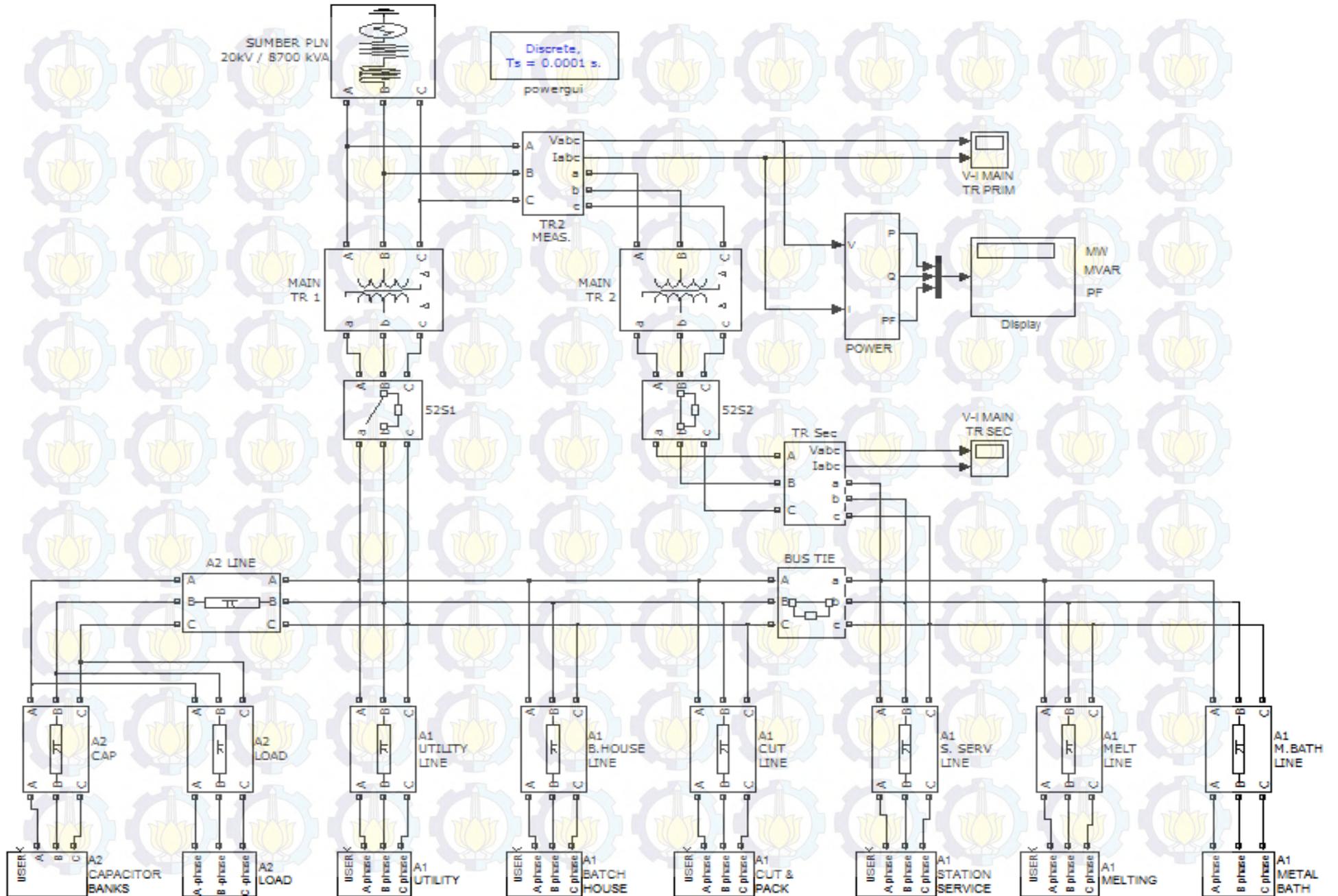
c. Bus Kapasitor



Sinyal zero crossing, perintah dan sinyal VCB close



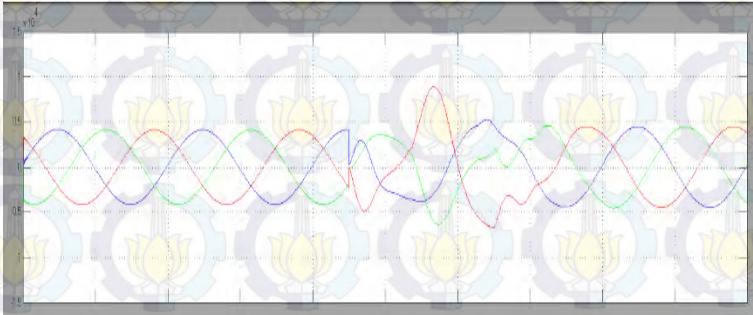
LAMPIRAN – PEMODELAN SISTEM PT. ASAHIMAS FLAT GLASS TBK.



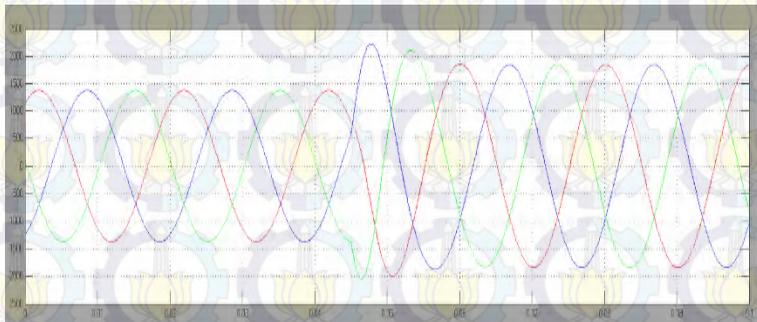
Lampiran Hasil Simulasi Sistem Menggunakan MATLAB Simulink 7.8

1. Metode *Single Switching Capacitor Bank*.

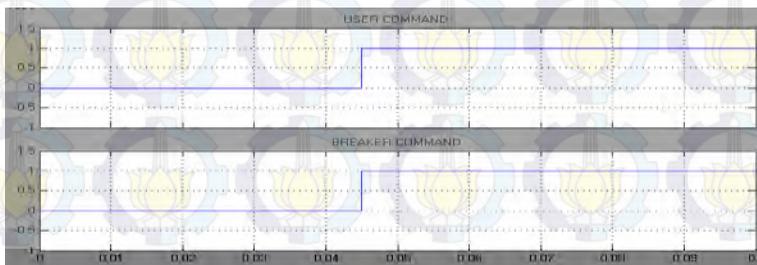
a. Bus Sumber 3kV



tegangan

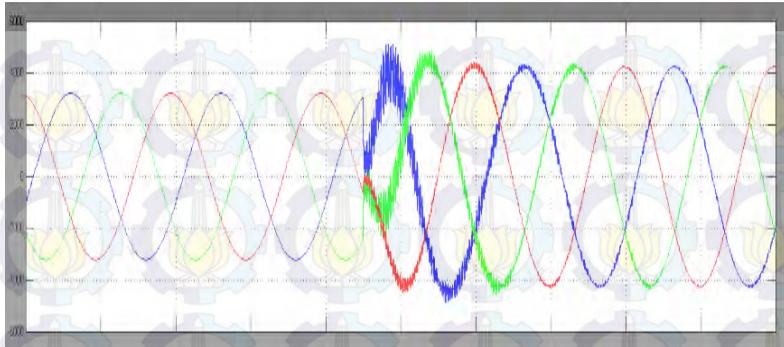


arus

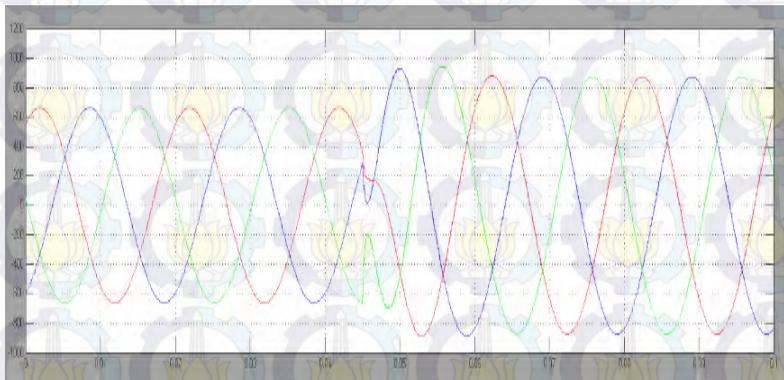


Sinyal perintah dan sinyal VCB close

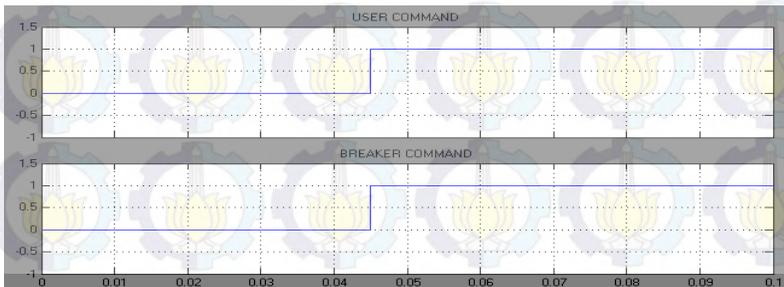
b. Bus Beban 3kV



tegangan

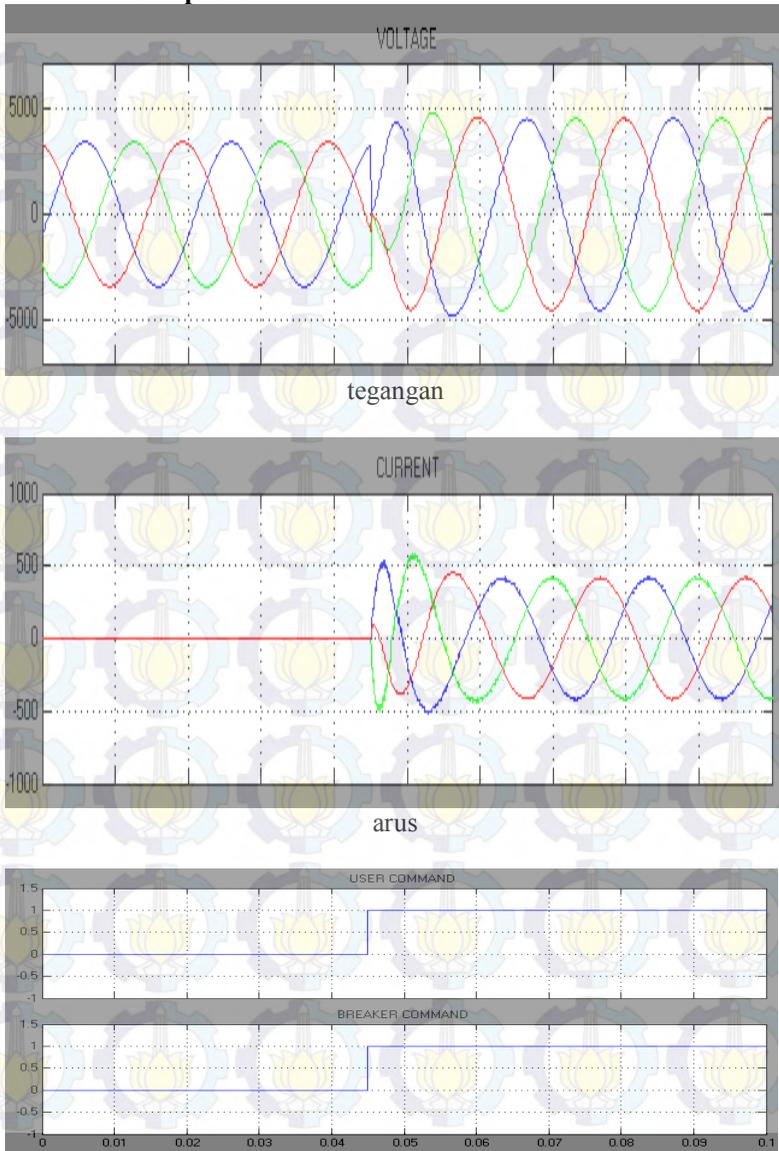


arus



Sinyal perintah dan sinyal VCB *close*

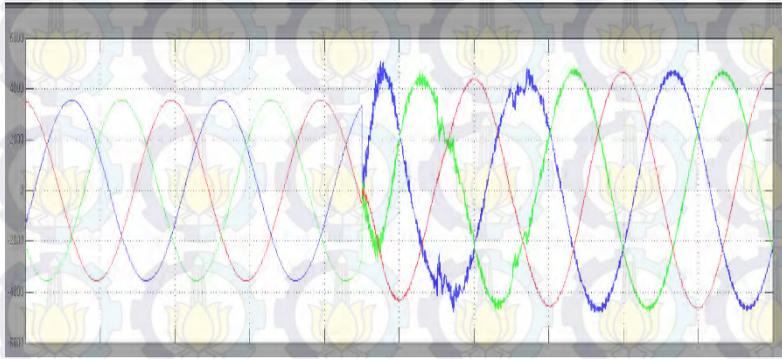
c. Bus Kapasitor



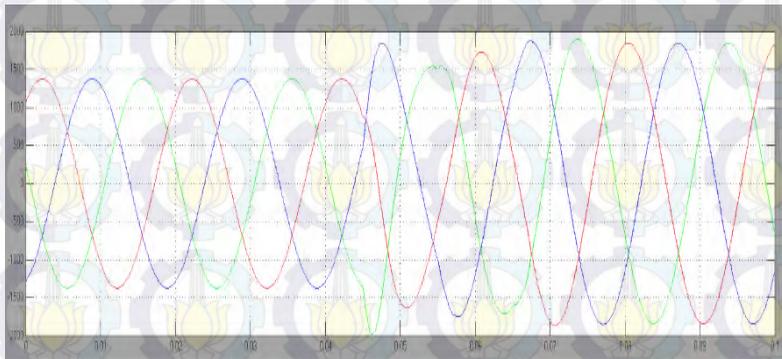
Sinyal perintah dan sinyal VCB close

2. Metode *Back to Back Capacitor Switching*.

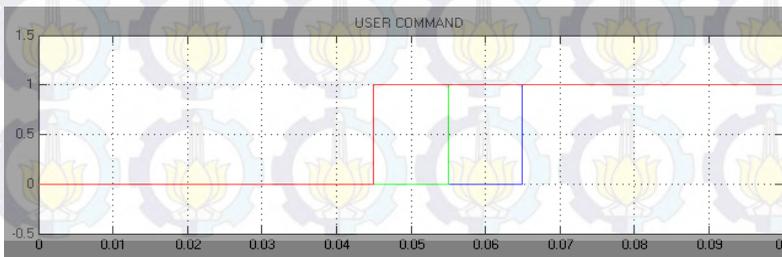
a. Bus Sumber 3kV



tegangan

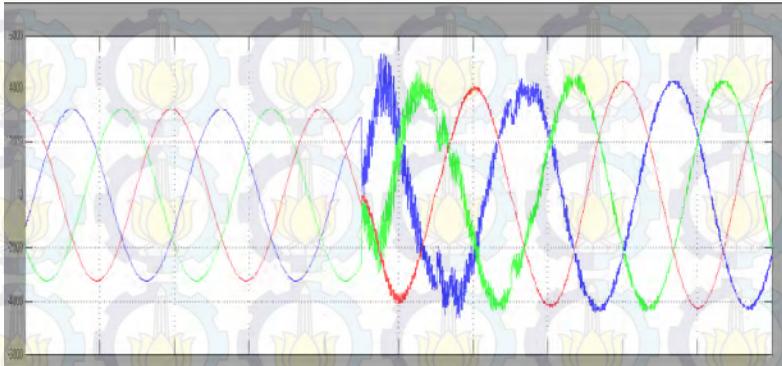


arus

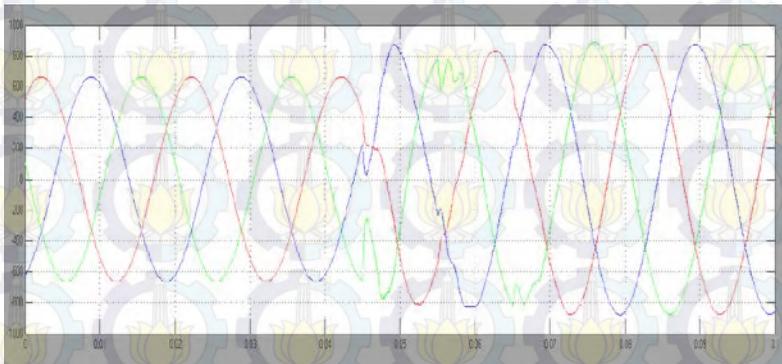


Sinyal VCB close

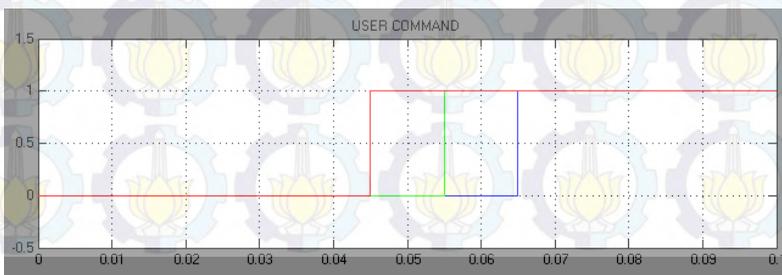
b. Bus Beban 3kV



tegangan

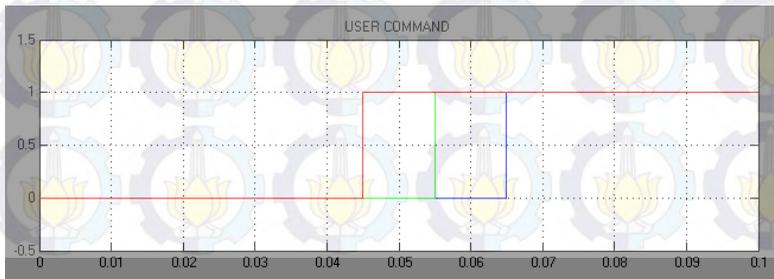
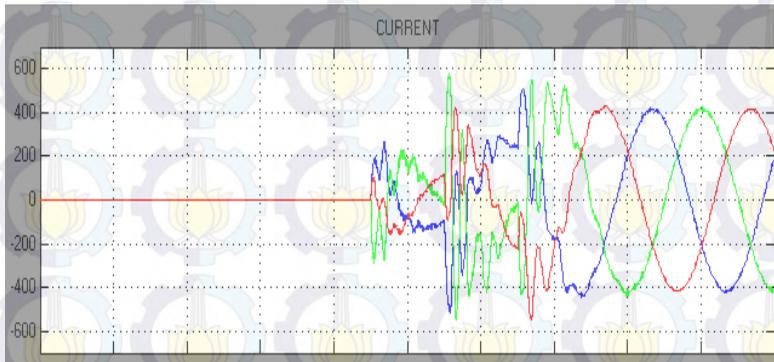
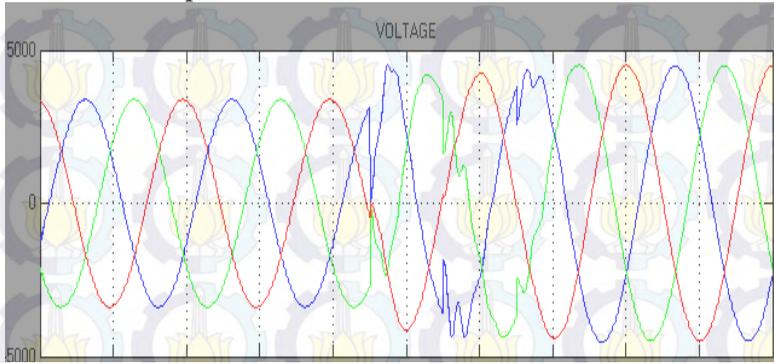


arus

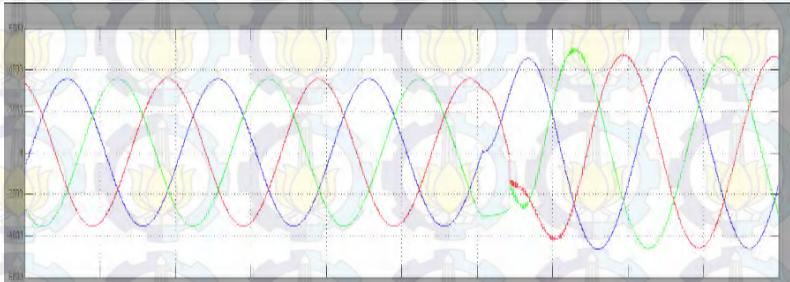


Sinyal VCB *close*

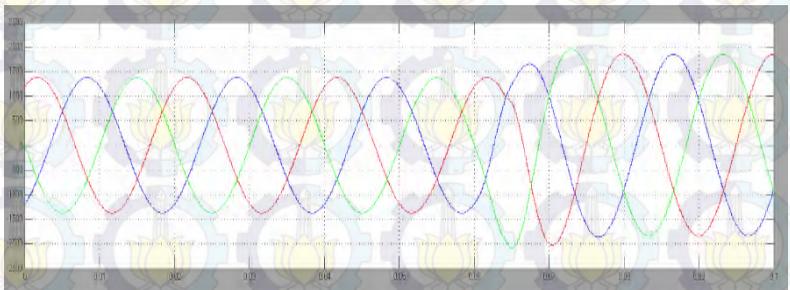
c. Bus Kapasitor



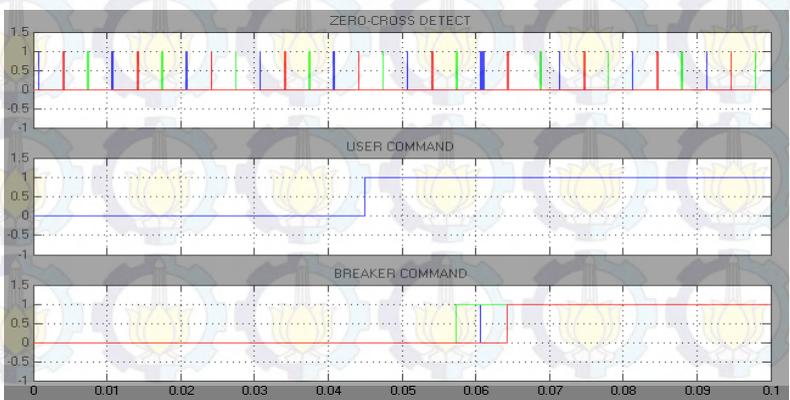
3. Metode *Synchronous Closing Breaker Capacitor Switching*. a. Bus Sumber 3kV



tegangan

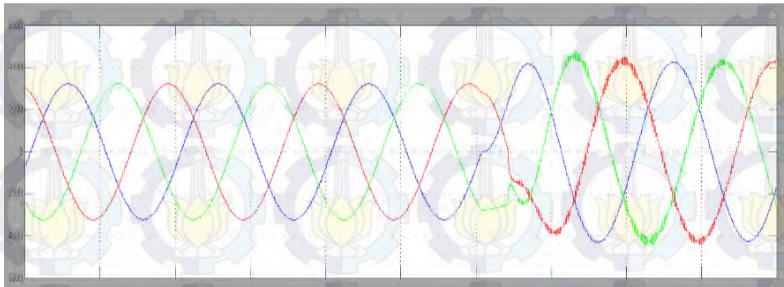


arus

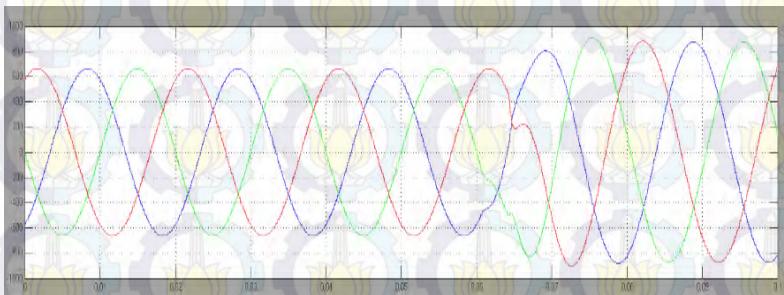


Sinyal zero crossing, perintah dan sinyal VCB close

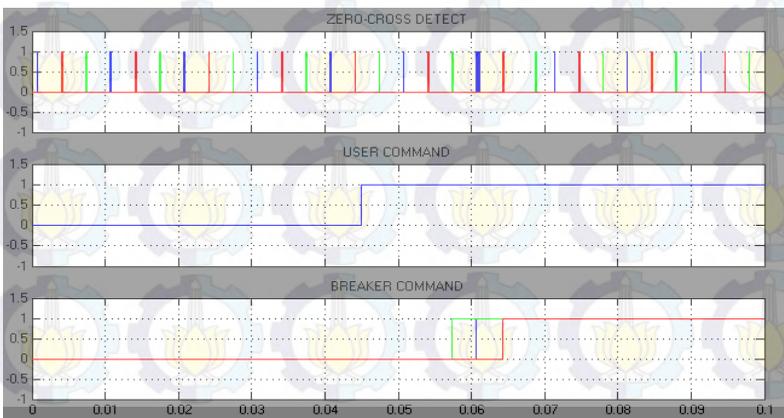
b. Bus Beban 3kV



tegangan

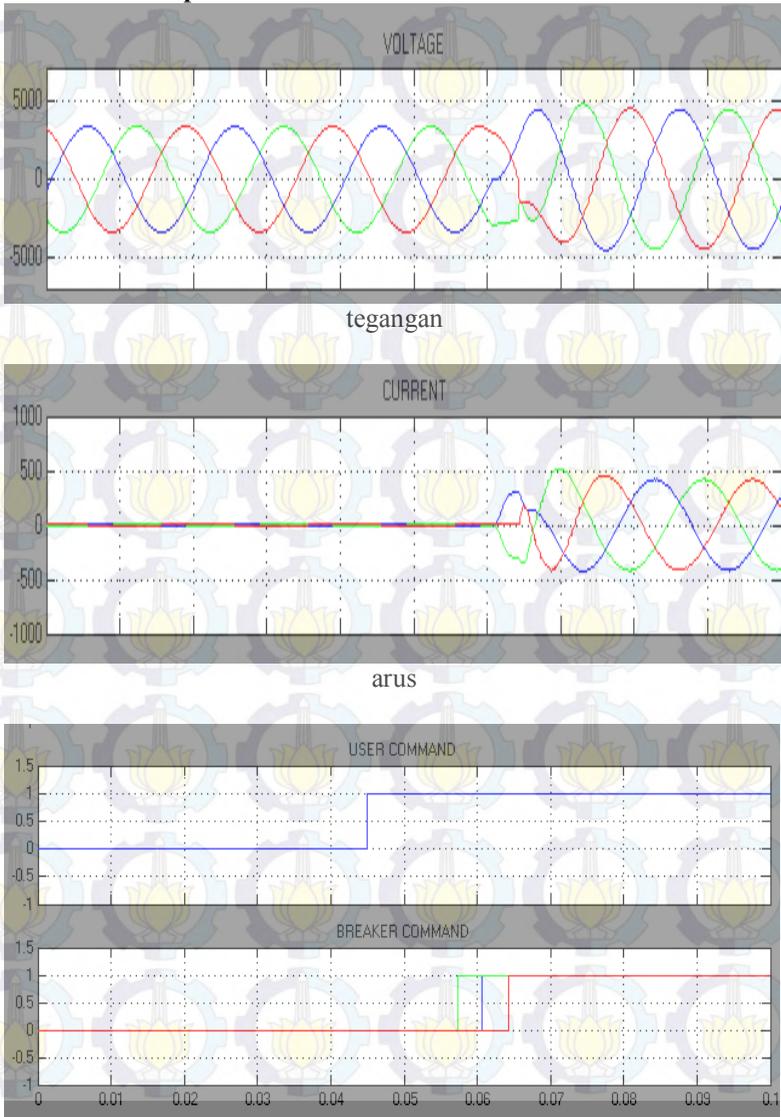


arus



Sinyal zero crossing, perintah dan sinyal VCB close

c. Bus Kapasitor



Sinyal zero crossing, perintah dan sinyal VCB close



BIODATA PENULIS



Dany Harfadli, lahir pada 10 Nopember 1987. Penulis adalah anak pertama dari tiga bersaudara. Lulus SDN Gelam 1 pada tahun 2000, SMPN 2 Sidoarjo pada tahun 2003 dan lulus SMUN 2 Sidoarjo pada tahun 2006. Setelah lulus SMU, penulis melanjutkan kursus di Balai Latihan Kerja Surabaya di bidang kelistrikan dan PLC (*Programable Logic Controller*) selama dua bulan. Kemudian penulis bekerja magang di PT. Campina *ice cream industry* – Brebek, Sidoarjo selama dua bulan.

Selanjutnya penulis bekerja di perusahaan retail PT. Sumber Alfaria Trijaya pada tahun 2007 sebagai pramuniaga (penjaga dan pengelola mini market Alfamart) di jalan Kebalen Surabaya Utara selama delapan bulan. Penulis melanjutkan pendidikan di bangku kuliah pada tahun 2008 Jurusan D3 Teknik Elektro ITS Studi Komputer Kontrol dan lulus pada tahun 2011. Selama kuliah di Jurusan D3 Elektro, penulis aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa (HIMA) D3 Teknik Elektro, Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM-ITS) dan Koordinator Laboratorium Elektronika Terapan D3 Elektro. Setelah lulus dari D3 Elektro, penulis bekerja di perusahaan asing PT. Asahimas Flat Glass Tbk dan melanjutkan kuliah di Program Lintas Jalur Teknik Elektro Teknik Tenaga pada tahun 2011. Saat ini penulis telah dikaruniai seorang putri berusia 4 bulan. Penulis memiliki hobi berenang, bulu tangkis, lari, *fitness*, *hiking*, *gardening*, dan bermain *game* 3D (tiga dimensi). Selain itu penulis tertarik di bidang automotif (mesin motor), elektronika, teknologi perang/tempur dan desain arsitektur 3D. Penulis dapat dihubungi di alamat email : *dany_hard@ymail.com* dan *danyhard.20@gmail.com*