

ABSTRAK

ABSTRAK - Beban industri pada umumnya menggunakan peralatan kontrol dan elektronika daya yang menggunakan bahan semikonduktor yang sangat sensitif terhadap fluktuatif tegangan. Sebagai kompensasi daya reaktif, pada industri biasanya menggunakan *capacitor bank* untuk meningkatkan *power factor*, menurunkan rugi-rugi dan meningkatkan kapasitas saluran. Tapi ternyata penggunaan *capacitor bank* ini juga menimbulkan permasalahan yang berkaitan dengan *capacitor bank switching* selama proses *energizing*. Selama proses *energizing* akan dihasilkan tegangan dan arus transien yang bisa berpotensi merusak peralatan kontrol, peralatan elektronika daya, peralatan *switching* dan *capacitor bank* itu sendiri.

Pada tugas akhir ini dilakukan analisis *capacitor bank switching* pada sistem kelistrikan PT HOLCIM INDONESIA, TBK PLANT CC#2 CILACAP dengan menggunakan MATLAB Simulink 7.0. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa *capacitor bank switching* menghasilkan transien untuk arus dan tegangan pada sistem. Pada sistem dihasilkan tegangan transien maksimum 1.35 pu. Pada tugas akhir ini juga dianalisis penggunaan *pre insertion inductor* untuk mengurangi efek transien yang dihasilkan oleh *capacitor bank switching*. Ternyata penggunaan *pre insertion inductor* sangat efektif menurunkan tegangan transien pada sistem hingga mencapai 1 pu dari tegangan nominal dan arus transien.

Kata kunci : *capacitor bank switching*, *pre insertion inductor*, tegangan lebih transien

ABSTRACT

Loads on the industry generally use control equipment and power electronics that using semiconductor materials that are very sensitive to voltage fluctuation. As reactive power compensation, the industry generally use capacitor banks to improve power factor, decrease the losses and improve the release capacity. But in fact the use of capacitor banks is also cause of the problems associated with the capacitor bank switching during energizing. During the process of energizing will be produced transient of voltage and current which could potentially damage control equipment, power electronics equipment, switching devices and the capacitor bank itself.

This final project is done analysis of capacitor bank switching on the electrical system of PT HOLCIM INDONESIA, TBK PLANT CC # 2 CILACAP using MATLAB Simulink 7.0. From the results of the simulation shows that the capacitor bank switching produce transient of voltage and current in the system. In the system, maximum transient overvoltage generated 1.35 pu. This final project also analysis pre insertion inductor to reduce the effects transien generated by capacitor bank switching. In fact the use of pre insertion inductor is very effective to reduce transien overvoltage on the system to reach 1 pu of nominal voltage and transient of current.

Keywords : capacitor bank switching, pre insertion inductor, transient overvoltage

BAB II

TEORI PENUNJANG

2.1 Kapasitor Daya Pada Jaringan Kelistrikan

Pada dasarnya pemasangan kapasitor daya dalam sistem transmisi dan distribusi mempunyai tujuan untuk memperbaiki faktor daya dan sistem regulasi tegangan pada sistem. Kapasitor daya juga dapat digunakan untuk aplikasi lain yaitu filter harmonisa, proteksi terhadap petir, untuk *transformer testing*, *generator impuls* dan *voltage divider capacitor* [1].

2.1.1 Penggolongan Kapasitor Daya

Pada jaringan distribusi, penggunaan kapasitor daya dapat digolongkan berdasarkan tegangan yang digunakan yaitu *low voltage* dan *high voltage*. Berdasarkan pemasangannya terdiri dari kapasitor seri dan parallel, berdasarkan sistem aplikasinya dibagi menjadi *open-rack design* dan *capacitor in pole-mounted hanger* serta berdasarkan waktu kerjanya yaitu *fixed capacitor* dan *switches capacitor*.

2.1.1.1 Kapasitor Daya Berdasarkan Tegangan Yang Digunakan

Berdasarkan tegangan yang digunakan kapasitor dapat dibagi menjadi 2 yaitu [1]:

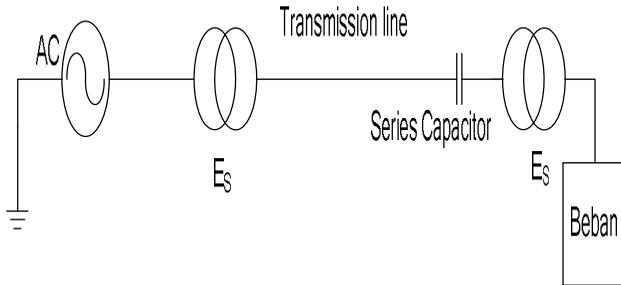
- *Low voltage capacitor bank* yang memiliki tegangan kerja di bawah 1 kV yaitu 380 - 440 V.
- *High voltage capacitor bank* yang memiliki tegangan kerja 1 kV dan di atasnya.

2.1.1.2 Kapasitor Daya Berdasarkan Pemasangannya

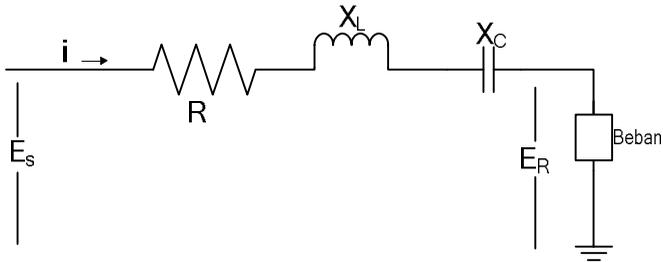
Berdasarkan pemasangannya kapasitor daya dibagi menjadi dua yaitu *series capacitor* dan *shunt capacitor* .

- ***Series capacitor (Kapasitor seri)***

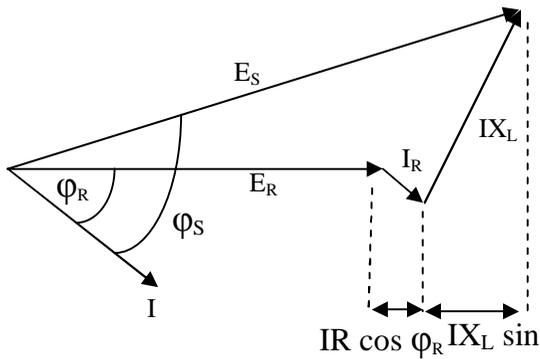
Dasar kerja dari suatu kapasitor seri adalah pemasangannya yang terhubung seri dengan sumber tegangan dan terhubung paralel dengan beban. Pada umumnya kapasitor seri digunakan sebagai kompensasi dari reaktansi jaringan [2]. Untuk aplikasi kapasitor seri dalam sebuah sistem jaringan dapat dilihat pada Gambar 2.1 di bawah ini.



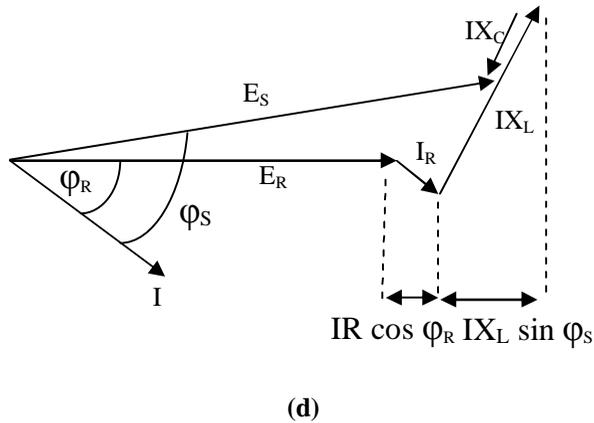
(a)



(b)



(c)



Gambar 2.1. Diagram Sistem Jaringan Dengan Kapasitor Seri. (a) Sistem, (b) Rangkaian Sirkuit, (c) Diagram Phasor Tanpa Kapasitor Seri, (d) Diagram Phasor Dengan Kapasitor Seri [1].

Penggunaan kapasitor seri memiliki beberapa keuntungan [2] yaitu :

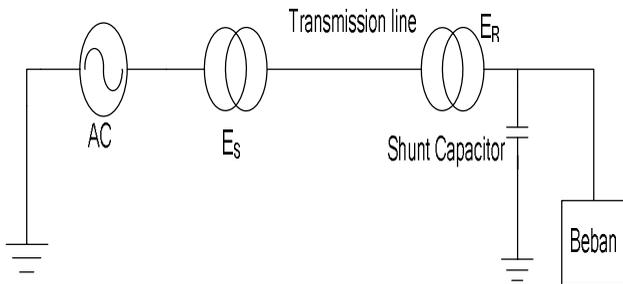
1. Dapat mengatur regulasi tegangan dengan otomatis secara keseluruhan.
2. Dapat meregulasi tegangan secara cepat atau seketika, karena dapat meredam *flickers* pada suplai ketika arus melalui beban seperti pada saat terjadi busur api.
3. Dapat menolong untuk mengatasi dan mengontrol *system power-swing*.
4. Dapat mengurangi efek *transient* dan meningkatkan stabilitas sistem.
5. Dapat mengatur aliran daya pada jaringan sehingga daya yang disalurkan menjadi lebih efektif, misalnya pemasangan kapasitor seri pada jaringan antara dua *feeder* utama.

Pemasangan kapasitor seri sangat berguna untuk membantu meningkatkan kapasitas penyaluran daya dan juga dapat mengatasi kelebihan beban antara dua sistem. Kapasitor seri tidak digunakan secara luas dalam saluran distribusi karena mempunyai sistem yang lebih kompleks. Biaya pemasangan kapasitor seri jauh lebih mahal daripada

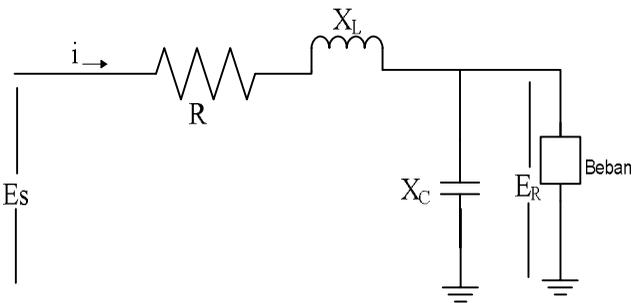
kapasitor paralel dan biasanya kapasitor seri dirancang dengan kapasitas yang lebih besar dengan tujuan untuk mengantisipasi perkembangan beban untuk masa-masa yang akan datang. Hal-hal tersebut menjadi alasan utama sehingga dalam sistem kelistrikan yang sering digunakan adalah kapasitor paralel.

- **Kapasitor Shunt (Kapasitor Paralel)**

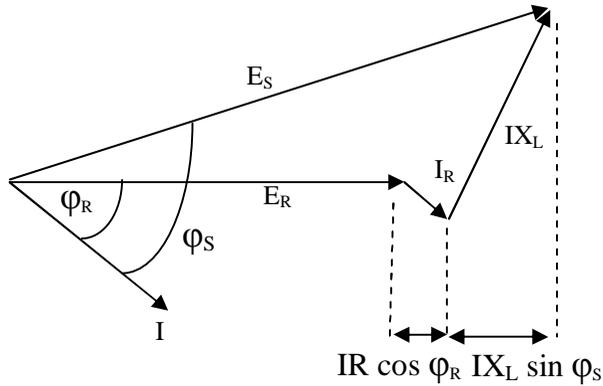
Prinsip kerja dari kapasitor shunt adalah pemasangannya yang dihubungkan paralel dengan sumber tegangan. Pada umumnya kapasitor shunt dipasang untuk memperbaiki pada faktor daya dan diletakkan dekat dengan beban [2]. Untuk aplikasi kapasitor shunt dalam sistem jaringan dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut ini.



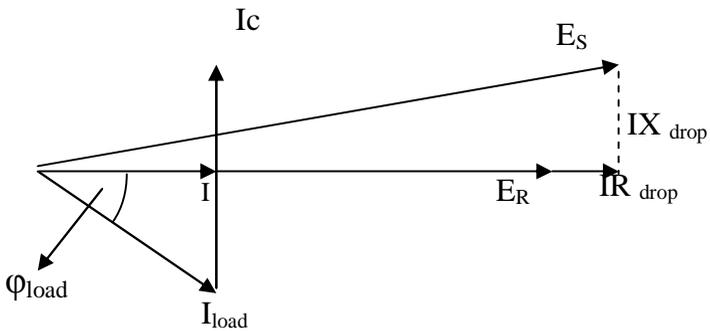
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 2.2. Diagram Sistem Jaringan Dengan Kapasitor Shunt. (a) Sistem, (b) Rangkaian Sirkuit, (c) Diagram Phasor Tanpa Kapasitor Shunt, (d) Diagram Phasor Dengan Kapasitor Shunt [1].

Pemasangan kapasitor paralel pada jaringan distribusi mengakibatkan *losses* akibat aliran daya reaktif pada saluran dapat dikurangi sehingga, kapasitas sistem bertambah. Manfaat penggunaan kapasitor paralel [2] :

1. Berkurangnya *voltage drop* di sepanjang saluran
2. Menaikkan level tegangan pada beban

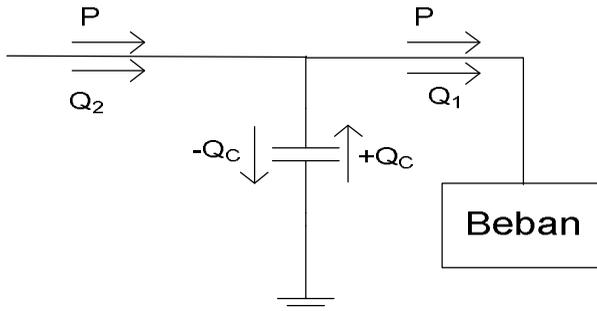
3. Memperbaiki regulasi tegangan
4. Mengurangi I^2X dan I^2R karena pada sistem terjadi pengurangan arus
5. Berkurangnya kebutuhan KVA dari catu daya sehingga kapasitas penyaluran daya lebih besar
6. Memperbaiki faktor daya .

Kapasitor paralel membangkitkan daya reaktif negatif (panah ke bawah) dan beban membutuhkan daya reaktif positif (panah ke atas), jadi pengaruh dari kapasitor adalah untuk mengurangi aliran daya reaktif di dalam jaringan sehingga daya reaktif yang berasal dari sistem menjadi:

$$Q_2 \text{ (total)} = Q_1 \text{ (beban)} - Q_c$$

Di mana :

Q_c adalah daya reaktif yang dibangkitkan oleh kapasitor paralel.



Gambar 2.3. Pengaruh Kapasitor Paralel Terhadap Aliran Daya Beban

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi dalam pemilihan kapasitor seri dan kapasitor paralel, seperti yang tertera pada Tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1. Faktor Pemilihan Jenis Kapasitor [3]

No	Tujuan	Kapasitor seri	Kapasitor paralel
1	Memperbaiki faktor daya	Pilihan kedua	Pilihan pertama

No	Tujuan	Kapasitor seri	Kapasitor paralel
2	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran udara dengan faktor daya normal dan rendah	Pilihan pertama	Pilihan kedua
3	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran udara dengan faktor daya tinggi	Tidak dipakai	Pilihan pertama
4	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran bawah tanah dengan faktor daya normal dan rendah	Pilihan pertama	Tidak dipakai
5	Mengurangi kerugian saluran	Pilihan kedua	Pilihan pertama
6	Mengurangi fluktuasi tegangan	Pilihan pertama	Pilihan kedua

2.1.1.3 Kapasitor Daya Berdasarkan Aplikasinya

Berdasarkan aplikasinya kapasitor daya dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu *capacitor open –rack design* dan *capacitor in pole-mounted hanger*. Jenis kapasitor *open-rack design* biasanya digunakan untuk transmisi tegangan tinggi antara 3.3 kV sampai 66 kV sedangkan jenis *Capacitor in pole-mounted hanger* digunakan untuk tegangan tinggi pada sistem jaringan sekunder , biasanya pada 15 kV.

2.1.1.4 Kapasitor Daya Berdasarkan Waktu Kerjanya

Kapasitor daya berdasarkan waktu kerjanya terdiri dari 2 jenis yaitu kapasitor tetap (*fixed capacitor*) dan *switches capacitor*. Pada dasarnya kapasitor tetap digunakan untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif pada saat beban rendah sedangkan *switches capacitor* digunakan untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif pada saat beban puncak atau diatas beban rendah. Selama beban rendah, *switches capacitor* harus dilepaskan dari sistem.

2.2 Kualitas Daya Pada Sistem Tenaga Listrik

Dalam setiap bidang kelistrikan industri, selalu dibicarakan masalah mengenai kualitas daya listrik (*power quality*). Kualitas daya listrik ini adalah yang sangat vital karena berhubungan dengan efisiensi energi listrik dari segi teknis dan ekonomis yang berujung pada penghematan biaya. Pada dasarnya kualitas daya listrik adalah tingkat kualitas dari suatu sistem kelistrikan dan tingkat efisiensi dari penggunaan energi listrik. Kualitas daya pada dasarnya identik dengan kualitas tegangan karena suplai daya pada sistem hanya dapat mengontrol kualitas tegangan dan tidak bisa mengontrol arus [4].

Pada kualitas daya listrik terdapat masalah yang ditimbulkan oleh penyimpangan arus, tegangan dan frekuensi yang dapat menghasilkan kegagalan operasi pada peralatan tenaga listrik atau peralatan elektronika daya pada suatu industri. Kegagalan operasi ini tidak hanya merugikan konsumen listrik tapi juga merugikan penyedia energi listrik dalam hal ini adalah PLN [4].

2.2.1 Tegangan *Steady State* Pada Konsumen

Tegangan *steady state* adalah tegangan pada konsumen yang masih dapat diperkirakan untuk menerima kondisi diluar operasi normalnya. Ketika beban pada pengguna listrik berubah secara cepat, tidak mungkin untuk mempertahankan tegangan yang konstan, oleh karena itu penyedia listrik akan menyediakan regulasi tegangan untuk menjaga tegangan *steady state* yang batasan-batasannya ditunjukkan pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3 yang diindikasikan oleh standard ANSI C84.1 [9].

Tabel 2.2. ANSI C84.1 Voltage Limits (Service Voltage) [9]

Service Voltage	Range A (2) (4)	Range B (2) (6)
Maximum	+ 5 %	+5.83 %
Minimum	-5 %	-8.33 %

Tabel 2.3. ANSI C84.1 Voltage Limits (Utilization Voltage) [9]

Utilization Voltage	Range A (2) (4)	Range B (2) (6)
Maximum (equipment rated > 600 V)	+ 5 %	+ 5.83 %
Maximum (equipment rated < 600 V)	+ 4.17 %	+ 5.83 %
Minimum	-8.33 % (-10%(3))	-11.67%(-13.33%(3))

Keterangan :

- Service voltage diukur pada PCC (Point of Common Coupling) diantara penyedia dan pengguna listrik.
- Range A diaplikasikan untuk operasi normal
- Range B dioperasikan untuk kondisi yang tidak normal pada sistem pengguna (meliputi kondisi gangguan dan transien)
- *Utilization voltage* diukur pada peralatan listrik

Selain standar yang digunakan pada Tabel 2.3 dan Tabel 2.4, PLN juga menyediakan standar tegangan *steady* yang diijinkan sebesar +5% dan - 10 % dari tegangan nominal.

2.2.2 Parameter Kualitas Daya Listrik

Ada beberapa parameter yang harus diperhatikan dalam masalah kualitas daya listrik, yaitu :

- 1 Faktor daya (*power factor*)
- 2 Tingkat tegangan (*voltage level*)
- 3 Frekuensi daya (*power frequency*)
- 4 Harmonisa individu (*individual harmonics*)
- 5 Total distorsi harmonisa (*total harmonic distortion*)
- 6 *Voltage flicker*
- 7 3-fasa tidak seimbang (*3-phase unbalance*)
- 8 *Voltage dip* dan *swell*
- 9 Transien (*transient*)

2.2.3 Permasalahan Dalam Kualitas Daya Listrik

Dalam menganalisa kualitas daya listrik terdapat fenomena elektromagnetik yang mengakibatkan suatu masalah dalam kualitas daya diantaranya adalah :

2.2.3.1 Short Duration Variation

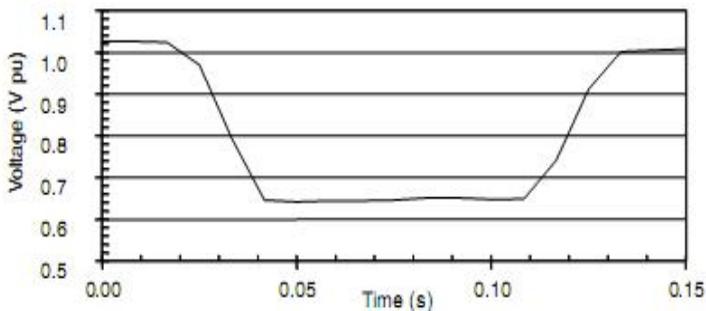
Short duration variation adalah variasi tegangan yang disebabkan oleh kondisi *fault*, *energization* beban-beban besar yang membutuhkan arus starting yang besar ataupun *intermittent loose connections* pada sistem tenaga listrik yang besarnya tergantung pada lokasi gangguan dan kondisi sistem, dimana *fault* ini dapat menyebabkan tegangan *drop* sementara (*sags*), kenaikan tegangan (*swells*) ataupun *complete loss of voltage* (*interruptions*) [4].

2.2.3.1.1 Interruption

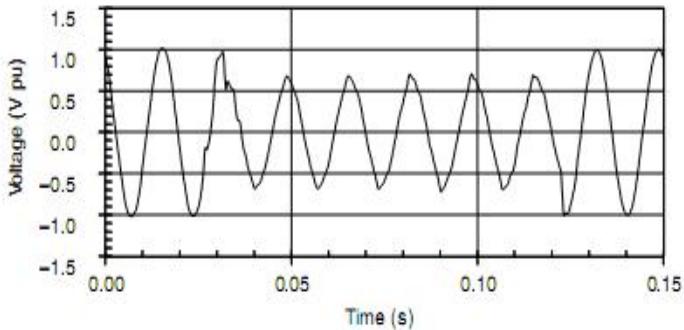
Interruption terjadi karena suplai tegangan ataupun arus pada beban turun kurang dari 0.1 pu untuk periode tidak melebihi 1 menit. *Interruption* dapat terjadi karena gangguan pada sistem tenaga, kegagalan peralatan dan tidak berfungsinya sistem kontrol. *Interruption* dapat diukur dengan lama terjadinya sedangkan besarnya biasanya dibawah 10 persen dari nominalnya. Durasi *interruption* yang disebabkan oleh gangguan pada sistem tenaga tergantung pada waktu operasi peralatan pengaman. *Instantaneous reclosing* pada umumnya akan membatasi *interruption* yang disebabkan oleh *nonpermanent fault* kurang dari 30 *cycles*. *Delayed reclosing* pada peralatan pengaman mungkin akan mengakibatkan *momentary* atau *temporary interruption*. Durasi dari *interruption* yang disebabkan oleh tidak berfungsinya peralatan atau *loose connections* bisa beragam [4].

2.2.3.1.2 Voltage Sag

Voltage sag adalah fenomena penurunan tegangan atau arus efektif antara 0.1 sampai 0.9 pu pada frekuensi daya dari 0.5 *cycle* sampai 1 menit. *Voltage sag* biasanya disebabkan oleh gangguan pada sistem dan juga dapat disebabkan oleh *energization* beban- beban besar ataupun starting dari motor motor besar [4].

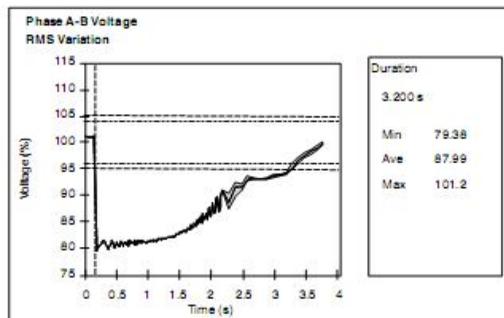


(a)



(b)

Gambar 2.4. Voltage sag yang disebabkan oleh gangguan satu fasa ke tanah.(a) Bentuk gelombang RMS Voltage sag (b) bentuk gelombang Voltage sag [4].

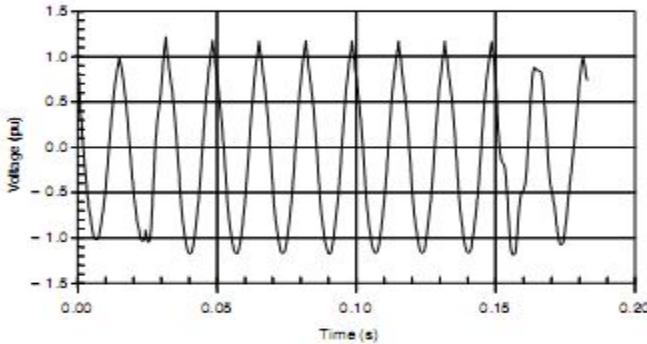


Gambar 2.5. Voltage sag yang disebabkan oleh starting motor [4].

2.2.3.1.3 Voltage Swell

Swell adalah peningkatan tegangan atau arus efektif antara 1.1 dan 1.8 pada frekuensi daya dengan durasi antara 0.5 cycle sampai 1 menit. Seperti pada *sag*, *swell* biasanya disebabkan oleh gangguan tetapi terjadinya tidak sesering pada *sag*. *Swell* juga dapat disebabkan oleh *switching* beban-beban besar ataupun *energizing* pada *capacitor bank*. Karakteristik *swell* dapat ditunjukkan dengan magnitude (nilai RMS) dan lama (*duration*). Pengaruh *voltage swell* selama kondisi gangguan tergantung pada lokasi gangguan, impedansi sistem, dan sistem pentanahan. Pada sistem tanpa grounding gangguan satu fasa ke tanah

akan menjadi 1.73 pu selama kondisi gangguan pada fasa yang tidak terganggu [4].



Gambar 2.6. *Instantaneous voltage swell* yang disebabkan oleh gangguan satu fasa ke tanah [4].

Tabel 2.4. *Voltage Swell Maximum during Ground faults* [9]

System	Over Voltage Maximum (per ANSI C26.92.4)
Ungrounded	1.82 X nominal line-ground voltage
Four wire multigrounded(cable system)	1.5 X nominal line-ground voltage
Three or four wire ungrounded	1.4 X nominal line-ground voltage
Four wire multi grounded (open wire system)	1.25 X nominal line-ground voltage

2.2.3.2 Long Duration Variation

Long duration variation merupakan penyimpangan nilai RMS pada frekuensi daya yang lebih dari 1 menit. *Long duration variation* dapat dibagi menjadi *overvoltage* dan *undervoltage*. *Overvoltage* dan *undervoltage* pada umumnya tidak disebabkan oleh *system faults*, tapi disebabkan oleh variasi pada beban dan operasi *switching* pada sistem [4].

2.2.3.2.1 Overvoltage

Overvoltage adalah peningkatan nilai efektif tegangan AC yang lebih besar dari 110 persen dari tegangan nominal dan lebih lama dari 1 menit dan biasanya disebabkan oleh *switching* beban-beban besar dan *energizing capacitor bank*. *Overvoltage* dapat terjadi karena sistem “lemah” dalam hal regulasi tegangan atau pengaturan tegangan yang tidak mencukupi. Tap seting yang tidak tepat pada trafo dapat juga menyebabkan *overvoltage* pada sistem [4].

2.2.3.2.2 Undervoltage

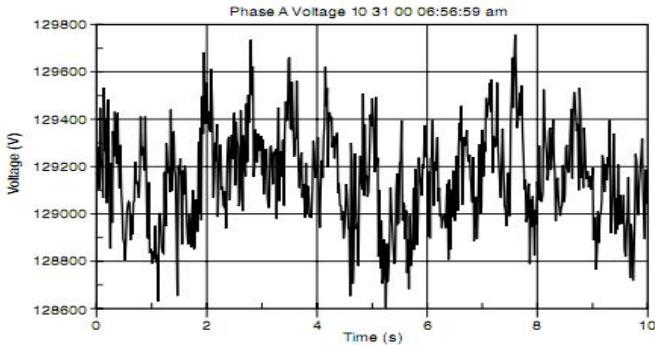
Undervoltage adalah penurunan nilai efektif tegangan AC yang lebih besar dari 90 persen dari tegangan nominal dan lebih lama dari 1 menit. *Undervoltage* dihasilkan dari kejadian *switching* yang merupakan kebalikan dari *switching* pada *Overvoltage*. *Switching* beban “ON” atau *switching* “OFF” pada *capacitor bank* dapat menyebabkan *undervoltage* sampai pengaturan tegangan dapat mencapai pada kondisi yang diijinkan. Kelebihan beban juga dapat menghasilkan *undervoltage* [4].

2.2.3.2.3 Sustained Interruptions

Sustained interruptions terjadi ketika suplai tegangan menjadi nol untuk periode waktu yang melebihi 1 menit. *Voltage interruptions* yang melebihi 1 menit umumnya adalah permanen dan membutuhkan campur tangan manusia untuk memperbaiki sistem [4].

2.2.3.3 Variasi Tegangan (Voltage Fluctuation)

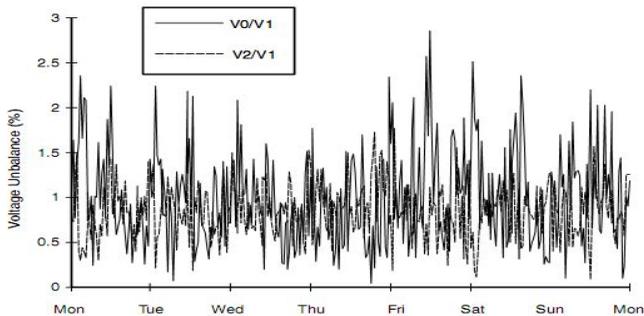
Voltage fluctuation Merupakan perubahan secara acak dan berurutan atau kontinyu, dimana normalnya tidak melebihi antara range 0.9 sampai 1.1 pu menurut ANSI C84.1. Beban yang dapat menyebabkan perubahan arus secara kontinyu dan cepat dapat mengakibatkan variasi tegangan yang biasa disebut *flicker*. Contoh beban –beban yang dapat menyebabkan *flicker* adalah mesin las, tanur busur listrik dan mesin penggiling. Masalah dari *flicker* ini diperoleh dari dampaknya terhadap perubahan tegangan pada lampu yang dapat kelip cahaya lampu yang dapat mengganggu penglihatan pada nilai dan frekuensi tegangan tertentu. *Flicker* yang dihasilkan pada magnitude 0.5 % dan frekuensi 6 sampai 8 Hz masih bisa diukur dengan kepekaan sensitivitas dari mata manusia [4].



Gambar 2.7. Perubahan tegangan yang disebabkan oleh pengoperasian tanur busur listrik [4]

2.2.3.4 Voltage Unbalance

Voltage unbalance sering didefinisikan sebagai simpangan maksimal dari tegangan atau arus rata-rata tiga fasa dalam satuan persen. Sumber utama dari *voltage unbalance* yang kurang dari 2 % beban satu fasa pada sistem 3 fasa [4]. Ketidakseimbangan arus yang dapat menyebabkan *trip* pada peralatan pengaman motor [9].



Gambar 2.8. Tren ketidakseimbangan tegangan pada sebuah feeder [4]

2.2.3.5 Transient

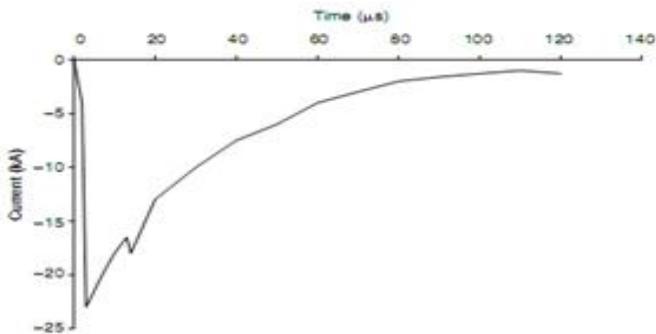
Permasalahan transien telah lama digunakan dalam analisis sistem tenaga untuk menandakan suatu kejadian yang sementara dan

tidak dapat diprediksi pada suatu kondisi tertentu. Definisi yang umum digunakan dalam skala dan pengertian yang sederhana tentang transient adalah bagian dari suatu perubahan dalam sebuah variabel yang tidak muncul selama transisi dari suatu keadaan operasi *steady state* ke kondisi yang lain. Definisi ini dapat digunakan untuk menggambarkan kejadian yang tidak biasa terjadi pada sistem tenaga listrik. Transien dapat diklasifikasikan kedalam dua kategori, *impulsive* dan *oscillatory* dimana keduanya mencerminkan bentuk gelombang transien arus dan tegangan [4].

2.2.3.5.1 Impulsive Transient

Impulsive transient adalah suatu perubahan tiba-tiba dalam keadaan *steady state* dari arus dan tegangan, arus, atau keduanya secara tidak langsung pada polaritas positif atau negatif. Impulsive transient dalam keadaan normal ditentukan oleh *rise time* and *decay time* [4]. Contoh impulsive transient adalah gangguan yang disebabkan oleh petir.

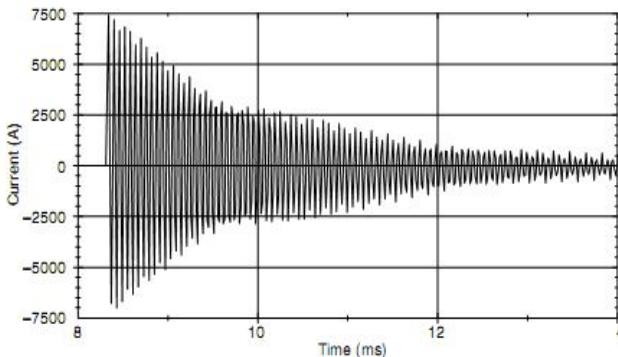
Petir adalah salah satu sumber utama penyebab impulsive transient. Kejadian yang paling sering terjadi adalah sambaran langsung ke kawat fasa. Hal ini dapat menyebabkan tegangan lebih sesaat yang sangat besar dan apabila tegangan ini tidak diamankan maka akan berpotensi merusak peralatan listrik. Pada beberapa kasus, sambaran petir dapat mengenai peralatan pada distribusi primer yang mengalir ke saluran sekunder melalui grounding. Hal ini akan menjadi masalah ketika beban memiliki sisten grounding yang jelek sehingga arus dari sambaran petir mengalir melalui saluran grounding dari beban [4].



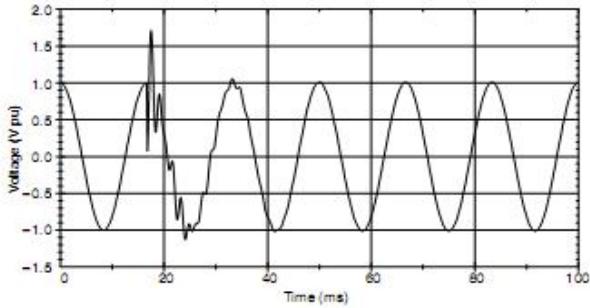
Gambar 2.9. Gelombang arus petir [4]

2.2.3.5.2 Oscillatory Transient

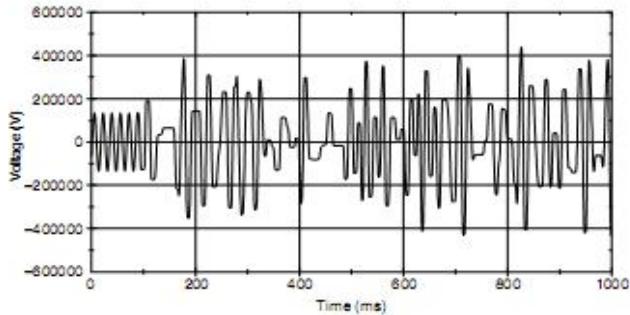
Oscillatory transient adalah suatu perubahan tiba-tiba dalam keadaan *steady state* dari arus dan tegangan, atau keduanya secara tidak langsung pada polaritas positif dan negatif. Karakteristiknya ditentukan oleh *spectral content* (*predominate frequency*), *duration*, and *magnitude*. Pembagian *spectral content* didefinisikan pada table 2.5 adalah tinggi, menengah dan rendah. Oscillatory transient dengan komponen frekuensi utama lebih besar daripada 500 MHz dan durasi yang diukur dalam mikrosekon biasanya adalah 5 mikrosekon disebut juga transien frekuensi tinggi (*high-frequency transients*). Oscillatory transient dengan komponen frekuensi utama diantara 5 dan 500 kHz dengan durasi yang diukur dengan mikrosekon dan biasanya 20 mikrosekon disebut transien frekuensi menengah (*medium-frequency transient*). Transien frekuensi menengah disebabkan oleh *back to back capacitor bank* dan *switching* pada kabel. Dan transien dengan frekuensi utama kurang dari 5 kHz, dan durasi antara 0.3 sampai 50 ms dikategorikan sebagai transien frekuensi rendah (*low-frequency transient*). Fenomena pada kategori ini sering terjadi pada sistem subtransmisi dan distribusi dan disebabkan oleh banyak hal. Yang paling sering adalah *energization* pada *capacitor bank* yang menghasilkan tegangan lebih transien *oscillatory* dengan frekuensi antara 300 sampai 900 Hz. Dengan magnitude dapat mencapai 2 pu, tapi biasanya 1.3 sampai 1.5 pu dengan durasi diantara 0.5 sampai 3 *cycle* tergantung pada redaman sistem [4].



Gambar 2.10. Karakteristik arus transien Akibat *capacitor bank switching* [4]



Gambar 2.11. *Oscillatory transient* frekuensi rendah yang disebabkan oleh *capacitor bank switching* [4]



Gambar 2.12. *Oscillatory transient* frekuensi rendah yang disebabkan oleh *ferroresonance* trafo tanpa beban [4]

Dan Tabel 2.4 dibawah menunjukkan karakteristik fenomena elektromagnetik yang mengakibatkan permasalahan pada kualitas daya listrik .

Tabel 2.5. Karakteristik fenomena elektromagnetik [4]

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1.0 Transient			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5 ns- rise	< 50 ns	
1.1.2 Microsecond	1 μ s- rise	50 ns- 1 μ s	

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1.1.3 Millisecond	0.1 ms-rise	> 1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low frequency	< 5 kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2 Medium frequency	5 -500 kHz	20 μ s	0 – 8 pu
1.2.3 High frequency	0.5-5 MHz	5 μ s	0 – 4 pu
2.0 Short Duration Variation			
2.1 Instantaneous			
2.1.1 Interruption		0.5- 30 cycles	< 0.1 pu
2.1.2 Sag (dip)		0.5- 30 cycles	0.1 – 0.9 pu
2.1.3 Swell		0.5- 30 cycles	1.1 – 1.8 pu
2.2 Momentary			
2.2.1 Interruption		30 cycles- 3s	< 0.1 pu
2.2.2 Sag (dip)		30 cycles- 3s	0.1 – 0.9 pu
2.2.3 Swell		30 cycles- 3s	1.1 – 1.4 pu
2.2 Temporary			
2.2.1 Interruption		3 s - 1 min	< 0.1 pu
2.2.2 Sag (dip)		3 s - 1 min	0.1 – 0.9 pu
2.2.3 Swell		3 s - 1 min	1.1 – 1.2 pu
3.0 Long Duration Variations			
3.1 Interruption, sustained		> 1 min	0.0 pu
3.2 Undervoltages		> 1 min	0.8 – 0.9 pu
3.3 Overvoltages		> 1 min	1.1 – 1.2 pu
4.0 Voltage unbalance		Steady state	10.5 – 2 %
5.0 Waveform Distortion			

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
5.1 DC offset		Steady state	0 – 0.1 %
5.2 Harmonics	0 – 100 th harmonics	Steady state	0 – 20 %
5.3 Interharmonics	0- 6 kHz	Steady state	0 – 2 %
5.4 Notching		Steady state	
5.5 Noise	Broadband	Steady state	0 – 1%
6.0 Voltage fluctuations	< 25 Hz	Intermittent	0.1 – 7 %
			0.2 – 2 Pst
7.0 Power frequency variations		< 10 s	

2.3 Metode Automatic Control Switching Capacitor

Kebutuhan terhadap peralatan kontrol otomatis kapasitor merupakan kebutuhan yang penting dalam *switching capacitor*. Dengan adanya kontrol otomatis memudahkan operator dalam pengoperasian sehingga tingkat *error* dapat ditekan seminimal mungkin. Pada dasarnya *automatic control switching capacitor* ini menggunakan *relay* atau peralatan kontrol lainnya yang sejenis yang memiliki tingkat sensitivitas yang bervariasi terhadap kondisi dari sistem listrik. Pada saat beban puncak maka *relay* atau *switch* akan otomatis menutup (*On*). Demikian juga sebaliknya, jika beban rendah maka *relay* atau *switch* akan otomatis membuka (*Off*). Kapasitor digunakan untuk perbaikan faktor daya, untuk penghematan uang, maka *relay* dan kontaktor yang digunakan untuk pengontrolan secara otomatis oleh karena itu peralatan kontrol harus memiliki kemampuan yang tinggi. Berikut ini adalah beberapa persyaratan untuk peralatan kontrol otomatis kapasitor [1], yaitu :

1. Peralatan kontrol otomatis harus memiliki ketahanan terhadap lingkungan industri.
2. Mudah dalam pengoperasian dan memiliki desain yang sesederhana mungkin.

3. Memiliki kemampuan *switching* terhadap salah satu kapasitor atau *step– step* dalam pengoperasian kapasitor.
4. Peralatan kontrol otomatis harus dapat beroperasi dengan baik dan juga fleksibel, mudah untuk disetting untuk mencegah keadaan *switching* yang tidak stabil.
5. Untuk pengoperasian *multi-stage relay*, peralatan ini harus mampu mempunyai fasilitas atau kemampuan untuk keperluan yang lebih luas, respon yang baik terhadap *loss of voltage* sebaik fasilitas pada *time-delay*.

Untuk suatu perusahaan yang besar yang mendapat suplai dari dua gardu distribusi atau lebih, lebih hemat dan efektif untuk menyediakan *local relay control* pada tiap gardu. Beberapa metode kontrol otomatis yang biasa digunakan yaitu [1] :

1. *Var-sensitive relays*
2. *Current-sensitive device*
3. *Time switches*
4. *Voltage-sensitive device*

2.3.1 *Var-Sensitive Relays*

Cara kerja dari *relay* ini adalah dengan mendeteksi atau mengidentifikasi faktor daya yang dihasilkan oleh hubungan antara tegangan dan arus ke *relay*. Pada kondisi *lagging power factor* dihasilkan sinyal dengan persamaan $E I \sin \phi$ (VAR), maka *relay* akan bekerja pada kondisi *switch on*. Sedangkan pada saat kondisi *leading power factor* akan dihasilkan sinyal negatif sehingga *relay* akan bekerja pada posisi *switch off*. Relay ini memiliki kemampuan *loss-of-voltage feature* yaitu untuk *switch off* secara otomatis apabila terjadi gangguan pada sirkuit [1].

2.3.2 *Current-Sensitive Device*

Relay ini bekerja dengan mendeteksi arus *input* pada beban dan dan arus pada kapasitor. Relay kemudian membandingkan arus tersebut dengan standar arus yang sudah di *set* dan menghasilkan *output* berupa *switch in* atau *switch out* melalui *relay* mekanik yang ketika bekerja akan mengaktifkan kontaktor yang menghubungkan dengan kapasitor. *Relay* jenis ini merupakan versi yang murah untuk peralatan kontrol otomatis pada *capacitor bank*. Pada umumnya *relay* jenis

ini digunakan pada instalasi tegangan rendah pada suatu industri dan hanya digunakan pada *switching single capacitor*, di mana ukuran kapasitor yang digunakan relatif kecil antara 25 sampai 30 kVAR. Bila dibandingkan dengan *VAR sensitive relay*, jelas penggunaan *VAR sensitiverelay* tidak efektif karena biayanya lebih mahal dan hanya digunakan untuk kapasitas yang kecil. Oleh karena itu, digunakan *current-sensitive relay* yang tidak kalah efektif dan memiliki harga yang lebih murah [1].

2.3.3 TimeSwitches

Sama seperti *current-sensitive relay*, *time swiches control* ini hanyadibuat untuk keperluan *switches in* dan *out* pada *single capacitor*. Selain itu, jenis relay ini hanya untuk aplikasi pada industri kecil dengan beban yang tetap dan dapat diprediksi. Jenis *relay* ini dapat beroperasi secara otomatis. Jenis *time switches* yang modern lebih reliabel, dapat diprogram dan harganya relatif murah [1].

2.3.4 Voltage-Sensitive Device

Tipe ini merupakan jenis *relay* lama yang digunakan dan didesain untuk kontrol otomatis kapasitor dan pemeliharaan *bus voltage* pada *substation*. Cara kerjanya dengan mendeteksi tegangan pada sistem dengan *switch in* atau *out* setelah dibandingkan dengan *relay setting* dari *relay* tersebut [1].

2.4 Pengoperasian Capacitor Bank

Ketika sebuah susunan *capacitor bank* dihubungkan pada sebuah sumber tegangan, maka arus transien akan mengalir ke capacitor bank tersebut. Besar dan frekuensi dari arus transien ini tergantung dari kapasitansi dan induktansi dari rangkaian suatu sistem [5]. Pada dasarnya pengoperasian *capacitor bank* dibagi menjadi 2 yaitu secara *single capacitor* dan *back to back* :

2.4.1 Single Capacitor (Kapasitor Tunggal)

Pengoperasian dengan sistem *single capacitor* bisa dilakukan pada satu atau beberapa *capacitor bank* yang tersusun paralel. Untuk beberapa *capacitor bank* yang dipasang paralel, pengoperasian secara *single capacitor* bisa dilakukan dengan *switching* pada masing-masing capacitor bank pada waktu yang bersamaan. Dengan demikian proses *switching* akan menghasilkan suatu arus transien yang seluruhnya

mengambil dari sumber sistem sehingga dihasilkan arus dan tegangan transien yang besar. Untuk mencari arus dan frekuensi dari pengoperasian secara *single capacitor* dapat dilakukan pendekatan menurut **ANSI standart C37.012-1979** [6] dengan rumus sebagai berikut :

$$I_{peak} = 1.41\sqrt{I_{sc} \cdot I_c} \text{ A} \quad (1)$$

$$f_r = f_s \sqrt{I_{sc} \cdot I_c} \text{ Hz} \quad (2)$$

Keterangan :

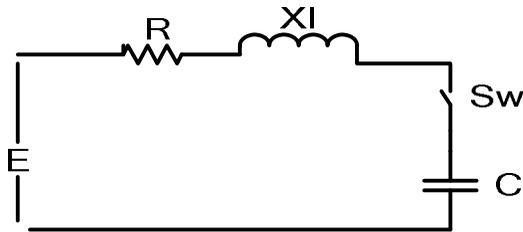
I_{peak} = arus puncak transien

I_{sc} = arus hubung singkat simetris (rms)

I_c = arus yang mengalir pada kapasitor

f_r = frekuensi resonansi

f_s = frekuensi sistem

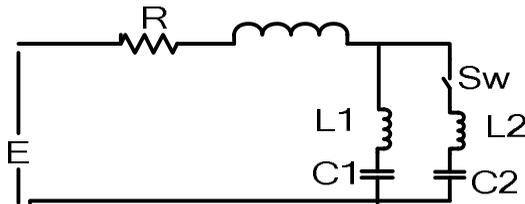


Gambar 2.13. Rangkaian sederhana kapasitor tunggal

2.4.2 *Back to Back Capacitor Bank*

Pengoperasian *capacitor bank* secara *back to back* bisa dilakukan pada beberapa *capacitor bank* yang terpasang secara paralel pada satu bus. Pengoperasian *capacitor bank* secara *back to back* dilakukan dengan *switching* pada *capacitor bank* secara bergantian. *Back to back switching* melibatkan *energizing* sebuah *capacitor bank* ketika *capacitor bank* lain dalam keadaan *energize*. Arus transien dalam kasus ini terjadi melalui proses *interchange* dimana arus yang disuplai dari sumber sistem dapat diabaikan [5]. Dalam pengertian bahwa arus dari sumber hanya dilibatkan pada *capacitor bank switching* yang pertama saja. Pada beberapa *capacitor bank* yang tersusun paralel pada suatu bus, maka arus transien yang mengalir ke *capacitor bank*

tergantung dari reaktansi induktif antara step-step *capacitor bank* [5]. Rangkaian sederhana dua *capacitor bank* yang tersusun paralel pada satu bus dapat dilihat pada Gambar 2.13. Dan untuk mencari nilai arus dan frekuensi transien yang duhasilkan dari pengoperasian dua *capacitor bank* yang tersusun paralel pada satu bus secara *back to back* dapat digunakan rumus pendekatan menurut ANSI standart C37.0731-1973 [6] adalah:



Gambar 2.14. Rangkaian sederhana dua kapasitor paralel

$$I_{peak} = 1750 \sqrt{\frac{V_{LL}(I_{C1} \cdot I_{C2})}{L_{eq}(I_{C1} + I_{C2})}} \text{ A} \quad (3)$$

$$f_r = 9.5 \sqrt{\frac{f_s \cdot V_{LL}(I_{C1} + I_{C2})}{L_{eq}(I_{C1} \cdot I_{C2})}} \text{ Hz} \quad (4)$$

Keterangan :

V_{LL} = tegangan sistem (*line to line*)

L_{eq} = induktansi ekivalen antara *capacitor bank*

I_{C1} = arus yang melalui *capacitor bank* 1

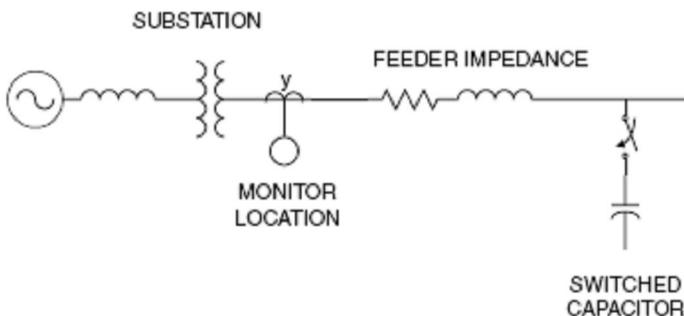
I_{C2} = arus yang melalui *capacitor bank* 1

2.5 Tegangan Lebih Transien Akibat *Capacitor Bank Switching*

Capacitor bank digunakan pada sistem transmisi dan distribusi sebagai kompensasi daya reaktif. Keuntungan utama menggunakan *capacitor bank* adalah biaya yang rendah dan sangat fleksibel dari sisi pemasangan dan operasinya. *Capacitor bank* diimplementasikan dalam sistem sebagai regulasi sistem tegangan, meningkatkan kemampuan

dalam mengalirkan daya, mengurangi biaya energi, dan meningkatkan faktor daya .

Meskipun memberikan keuntungan pada sistem, tetapi Bagaimanapun juga kita tidak boleh meremehkan kondisi *energizing* pada *capacitor bank* yang akan menghasilkan *transient oscillation* dalam sistem tenaga. Pada beberapa kejadian dalam suatu kelistrikan di industri menunjukkan bahwa operasi *switching* pada *capacitor bank* dianggap sebagai sumber utama penghasil tegangan lebih transien pada banyak pengguna sistem tenaga listrik. Transien ini dapat menyebabkan kerusakan peralatan pada penyedia dan pengguna sistem tenaga listrik, yang tergantung pada parameter sistem seperti ukuran kapasitor, ukuran transformator dan tipe dari beban yang terhubung ke sistem. Terjadinya *Transient Overvoltage* yang terjadi pada proses *capacitor bank switching* diakibatkan *short circuit* yang terjadi pada saat pelepasan muatan pada kapasitor selama pengisian. Selama terjadi perubahan tegangan yang disebabkan oleh *capacitor bank switching "on"*, sehingga pada sistem akan dihasilkan *ripple effect* yang akan beresilasi sampai mencapai keadaan *steady state*. *Switching* pada *Capacitor Bank* selalu disertai dengan lonjakan arus yang dibatasi oleh impedansi dari sistem dan resistansi dari jaringan. Terjadinya *Transient Overvoltage* diikuti oleh kenaikan tegangan (*Voltage Rise*) yang akan beresilasi dalam frekuensi yang ditentukan oleh induktansi dan kapasitansi dalam sirkuit (*LC Circuit*) [5].



Gambar 2.15. SLD dari pengoperasian *capacitor bank*[4]

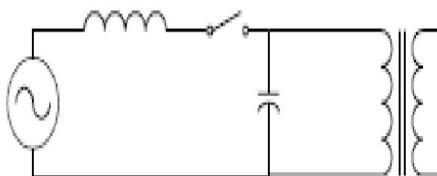
Saat kapasitor di *switch on* maka akan mengakibatkan tegangan transien antara 1.0 pu sampai 2.0 pu tergantung pada peredaman sistem. Ketika transien mencapai 2 pu atau lebih maka akan tidak berpotensi

menghasilkan energi yang bersifat merusak isolasi sistem tetapi sering menyebabkan kegagalan operasi pada peralatan elektronika daya. Pada pengguna akhir, tegangan transien yang dihasilkan bias mencapai 3 sampai 4 pu yang berpotensi menyebabkan kerusakan pada semua tipe peralatan pelanggan [4].

2.6 Permasalahan Yang Disebabkan *Capacitor Bank Switching*

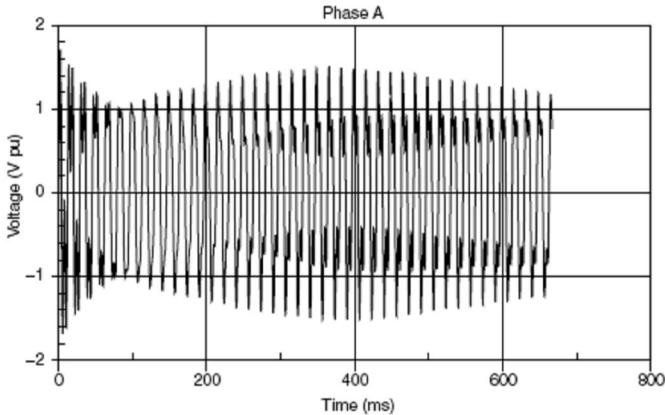
Pada keadaan normal, tegangan lebih transien disebabkan oleh capacitor bank switching, tidak dipertimbangkan pada sistem kelistrikan karena transien yang dihasilkan dibawah level peralatan pengaman pada sistem yang beroperasi (1.8 pu atau diatasnya). Meskipun demikian, pada kondisi yang ganjil atau acak ketika *prestrikes* atau *restrikes* pada peralatan *switching* muncul, akan menghasilkan beberapa kerusakan baik pada peralatan *switching* itu sendiri maupun sistem secara keseluruhan [7].

Transien yang berkaitan dengan *capacitor bank switching* memungkinkan untuk menghasilkan kegagalan kerja transformator. *Energizing* trafo menghasilkan arus *inrush* yang kaya akan komponen harmonisa untuk periode yang panjang sampai 1s. Jika sistem menghasilkan resonansi paralel, maka akan dihasilkan *dynamic overvoltage* yang menyebabkan kegagalan *arrester* dan masalah pada peralatan yang sensitive terhadap fluktuatif tegangan. Permasalahan akan muncul ketika *energizing* trafo besar diikuti *energize* dari *capacitor bank* pada suatu industri [7]. Studi menunjukkan bahwa *energizing* transformator dan *capacitor bank* secara bersamaan akan menyebabkan tegangan lebih transient yang yang mempunyai frekuensi resonansi dalam arus *inrush* transformator yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi pada transformator [4]. Rangkaian ekivalennya dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Rangkaian ekivalen *energizing* capacitor bank dan trafo secara bersamaan[4]

Karakteristik *dynamic overvoltage* dapat dilihat pada gambar 2.17 dibawah ini.

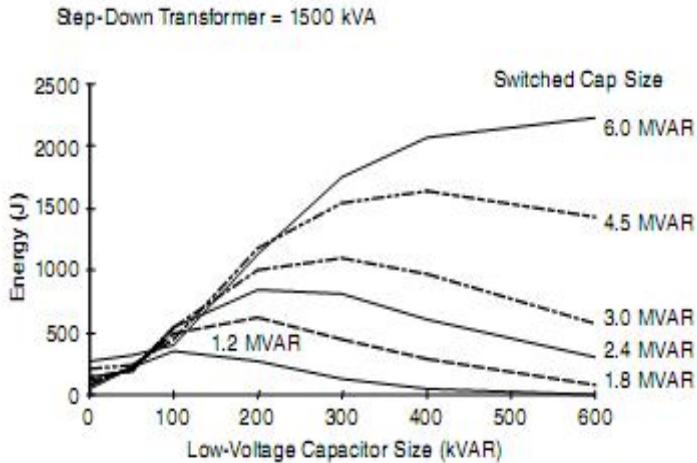


Gambar 2.17. *Dynamic overvoltages* selama *transformer energizing*[4]

Pada *adjustable speed drives* (ASD) dapat mengalami kerusakan serius ketika terjadi transien yang disebabkan *capacitor bank switching* bahkan tanpa melibatkan peningkatan transien sekalipun. Ini dikarenakan pada ASD mengandung peralatan semikonduktor yang memiliki *peak inverse voltage* (PIV) yang rendah dan rating *metal oxide varistor* (MOV) yang rendah juga yang digunakan untuk melindungi peralatan elektronika daya [7].

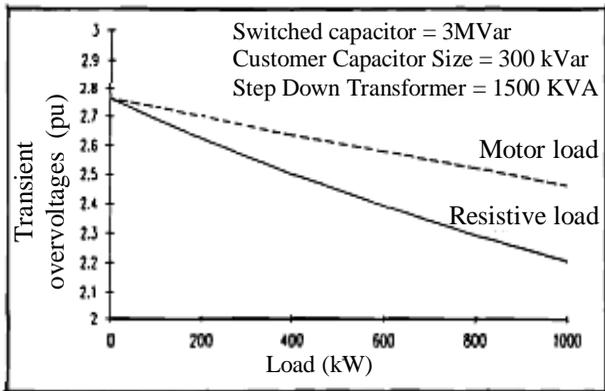
2.7 Dampak Perubahan Parameter Sistem Terhadap Peningkatan Transien

Pada dasarnya ada beberapa parameter yang dapat mempengaruhi besarnya transien yang muncul akibat *capacitor bank switching*. Parameter yang pertama adalah besarnya kapasitor yang akan di *switch*. Dari gambar 2.18 menunjukkan bahwa peningkatan besarnya kapasitas kapasitor juga akan meningkatkan besarnya energi yang dihasilkan untuk menghasilkan transien.



Gambar 2.18. Pengaruh besarnya kapasitor pada peningkatan transien [4]

Pada gambar 2.17 menunjukkan pengaruh dari beban resistif maupun motor pada peningkatan magnitudo transien. Dari kurva dapat ditunjukkan bahwa beban resistif menyediakan redaman yang lebih baik daripada beban motor yang hanya menyediakan redaman kecil pada sistem dalam hal mengurangi tegangan lebih transien. Sebenarnya sangat menguntungkan dan merupakan hal yang tidak bisa dianggap remeh pada suatu industri yang mempunyai beban yang sebagian besar adalah motor karena beban motor akan bertindak sebagai peredam tegangan lebih transien yang dihasilkan oleh *switching* kapasitor [7].



Gambar 2.19. Magnitude tegangan lebih transien pada bus tegangan rendah sebagai fungsi dari karakteristik beban pelanggan [7]

Faktor- faktor lain yang dapat mempengaruhi peningkatan transien adalah hubungan *capacitor bank* ke sistem dan lokasi pemasangan kapasitor. Pada dasarnya semakin besar sumber (semakin kecil impedansi sumber) maka semakin kecil tegangan lebih transien yang dihasilkan. *Capacitor bank* yang dihubungkan secara ungrounded-wye menghasilkan tegangan transien *phase to phase* yang lebih besar daripada *capacitor bank* yang dihubungkan dengan *grounded-wye* [4].

2.8 Metode Untuk Mereduksi Tegangan Lebih Transien

Ada beberapa metode yang digunakan untuk mereduksi yang digunakan untuk mereduksi tegangan lebih transien diantaranya adalah *pre insertion inductor*, *surge arrester*, dan *synchronous closing breaker*.

2.8.1 Pre Insertion Inductor

Pre insertion inductor adalah teknologi yang banyak digunakan untuk mengurangi efek tegangan lebih transien pada sistem tenaga listrik. Teknologi ini termasuk teknologi konvensional tapi sangat efektif untuk mengurangi tegangan lebih transien. *Pre insertion inductor* ini melengkapi impedansi sistem dengan pemasangannya pada sistem secara seri dengan *capacitor bank*. *Pre insertion inductor* ini akan membatasi arus transien yang dihasilkan dari *capacitor bank switching*.

Pre insertion inductor ini terdiri dari beberapa jumlah lapisan atau gulungan yang terbuat dari bahan *stainless steel* atau *aluminium*

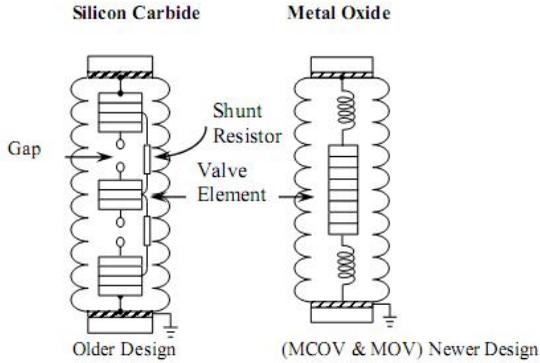
yang dipenuhi filamen berlapis *fiberglass* untuk membentuk suatu kaca bening yang diperkuat dengan suatu tabung. Lapisan terluar dilapisi dengan mantel *silicone alkid* yang berfungsi sebagai ketahanan terhadap cuaca. Jika yang digunakan adalah gulungan *stainless steel* maka yang terbentuk adalah *pre insertion inductor* dengan tahanan tinggi (*high resistance*) sedangkan apabila yang digunakan adalah gulungan aluminium maka yang dihasilkan adalah *pre insertion inductor* dengan tahanan rendah (*low resistance*). *Pre insertion inductor* dengan *high resistance* akan menghasilkan suatu redaman yang sangat baik pada saat terjadi arus transien yang dihasilkan oleh *capacitor bank switching*. Tetapi penggunaan *pre insertion inductor* untuk yang *high resistance* dan *low resistance* harus memperhatikan pengaruhnya pada sistem pada saat mencapai tegangan *steady*. Apabila penggunaan *high resistance* mengakibatkan penurunan tegangan pada sistem yang terlalu besar maka penggunaan *low resistance* sebaiknya direkomendasikan.



Gambar 2.20. *High resistance pre insertion inductor* [7]

2.8.2 *Surge Arrester*

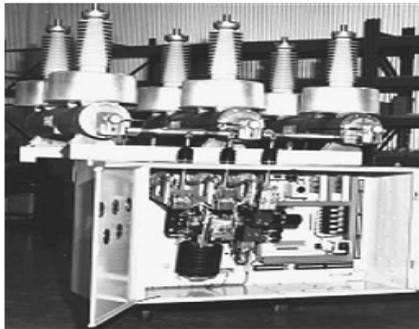
Surge Arrester tipe gap dapat digunakan sebagai perlindungan pada *capacitor bank* saat terjadi tegangan lebih transien. Jika tegangan lebih transien terjadi maka tegangan ini akan menyalakan *arrester* sehingga *capacitor bank* akan *discharge* untuk mendisipasikan energi ke dalam *arrester* [8].



Gambar 2.21. Tipe *arrester* yang digunakan untuk tegangan lebih transien

2.8.3 *Synchronous Closing Breaker*

Teknologi ini melibatkan penutupan kontak dari setiap fasa saat tegangan mendekati nol. Untuk menyempurnakan penutupan yang mendekati nol maka diperlukan suatu peralatan *switching* yang memiliki ketahanan dielektrik yang tinggi saat kontak bersentuhan. Meskipun sulit untuk mencapai nilai tegangan nol saat kontak bersentuhan, tapi pada dasarnya penutupan terjadi secara konsisten pada ± 0.5 ms [4].



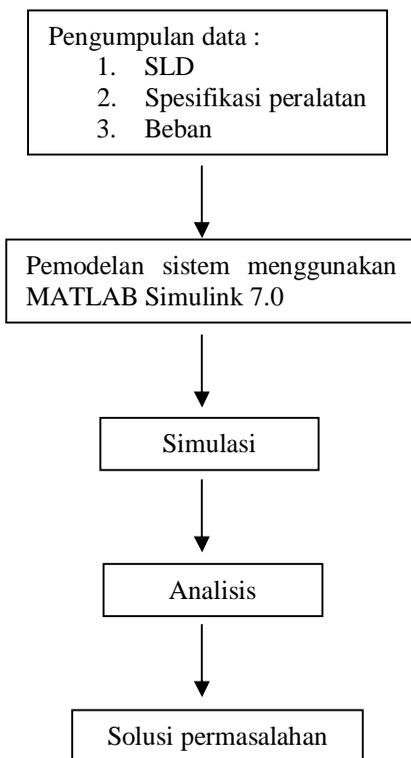
Gambar 2.22. *Synchronous closing breaker* [4]

BAB III

PEMODELAN SISTEM KELISTRIKAN PT HOLCIM INDONESIA, TBK PLANT CC#2 CILACAP

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam tugas akhir ini bisa dilihat pada *flowchart* pada Gambar 3.1. Metode ini digunakan sebagai langkah-langkah dalam menyelesaikan tugas akhir ini.



Gambar 3.1. Flowchart metode penelitian tugas akhir

3.2 Pemodelan Sistem

Sistem yang digunakan pada tugas akhir ini adalah sistem kelistrikan industri pada PT HOLCIM INDONESIA, TBK PLANT CC#2 CILACAP. Data awal sistem diperoleh dalam bentuk pemodelan dengan menggunakan *software* ETAP 4.0 yang dapat dilihat pada Gambar 3.2. Pada tugas akhir ini, simulasi dilakukan dengan menggunakan MATLAB Simulink 7.0 yang pemodelannya bisa dilihat pada Gambar 3.3. Karena data awal dari sistem dimodelkan dengan ETAP 4.0 sedangkan simulasi dalam tugas akhir ini adalah menggunakan MATLAB Simulink7.0, maka SLD pada ETAP 4.0 tersebut diubah ke Simulink 7.0 dengan parameter sistem, peralatan dan beban yang telah disesuaikan dengan data awalnya agar tidak terjadi perbedaan yang terlalu besar di antara penggunaan kedua *software* tersebut. Sistem utama terdiri dari sumber 150 kV, trafo 150/6.3 kV dan beban. Nilai tegangan nominal yang digunakan sebagai dasar perhitungan untuk analisis hasil simulasi adalah nilai tegangan puncak *line to ground* dimana pada tegangan sumber 150 kV mempunyai nilai tegangan puncak (*line to ground*) sebesar :

$$V_{peak} (line\ to\ ground) = V_{rms} X \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

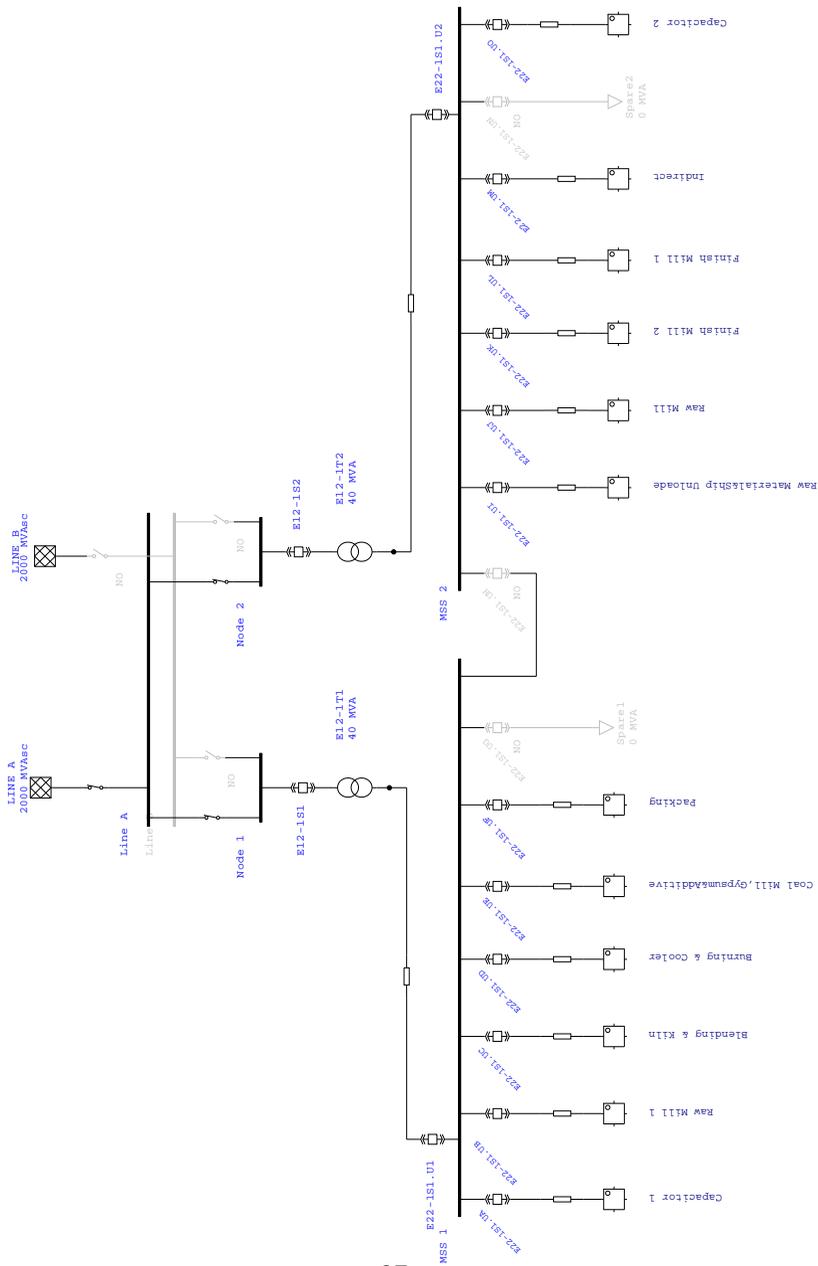
$$V_{peak} (line\ to\ ground) = 150\ kV X \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{peak} (line\ to\ ground) = 122.47\ kV$$

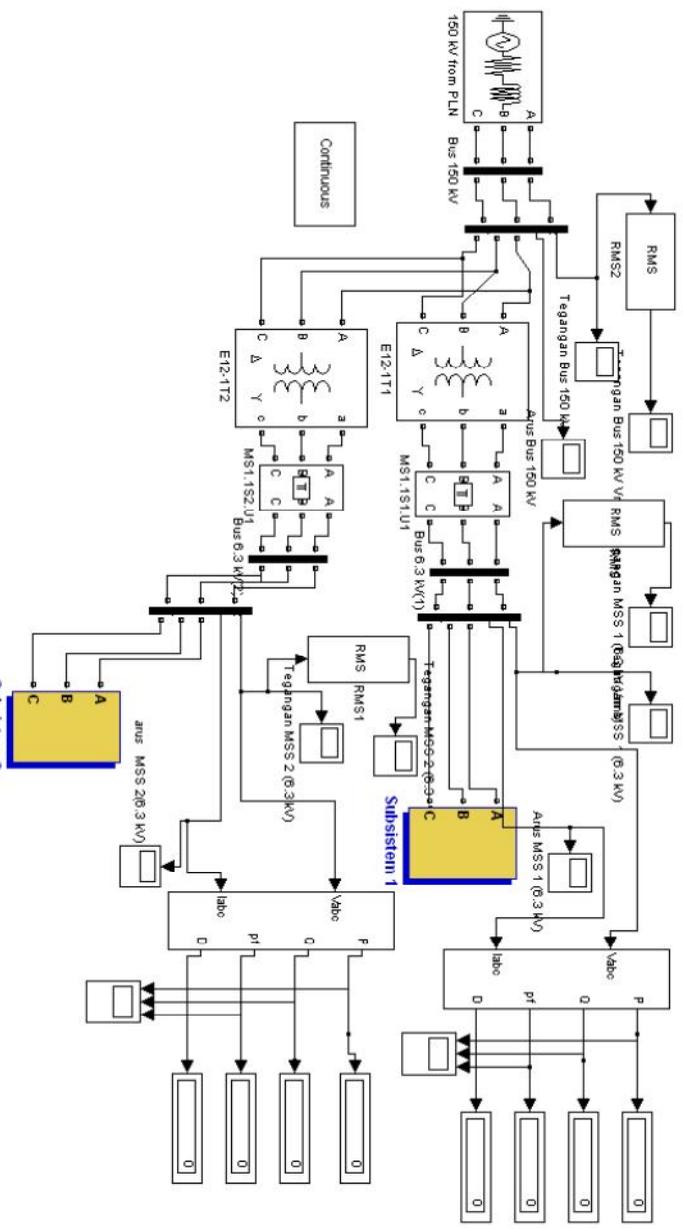
Pada tegangan nominal 6.3 kV :

$$V_{peak} (line\ to\ ground) = 6.3\ kV X \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{peak} (line\ to\ ground) = 5.143\ kV$$



Gambar 3.2. Pemodelan sistem menggunakan ETAP 4.0



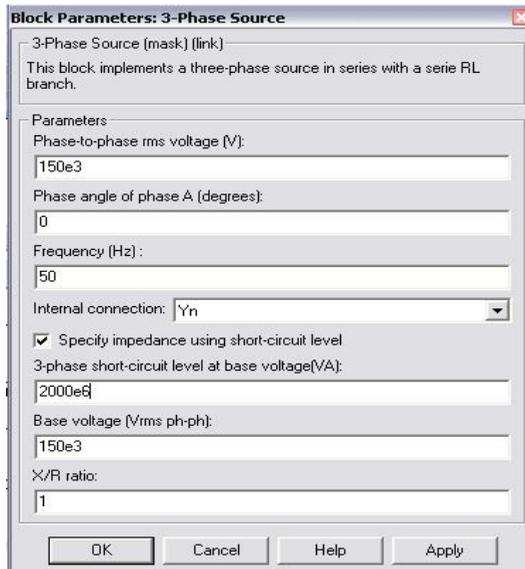
Gambar 3.3. Pemodelan sistem menggunakan MATLAB Simulink 7.0

3.3 Parameter Sistem

Karena data awal sistem diperoleh dari pemodelan ETAP 4.0, sedangkan pada simulasi tugas akhir ini menggunakan MATLAB Simulink 7.0 maka parameter sistem yang akan digunakan harus disesuaikan dengan data awalnya sehingga nantinya hasil yang diperoleh adalah hasil yang optimal dan tidak terjadi perbedaan yang terlalu jauh dari penggunaan kedua *software* tersebut.

3.3.1 Sumber

Pada sistem, sumber yang digunakan merupakan sumber 150 kV yang berasal dari jala-jala PLN dan pada pemodelan menggunakan MATLAB 7.0 digunakan sumber tiga fasa dengan parameter yang disesuaikan dengan data pada ETAP 4.0.



Gambar 3.4. Tampilan *window* sumber tiga fasa pada MATLAB Simulink 7.0

Penyesuaian parameter sumber ini sangat penting karena nilai dari MVAsc berpengaruh pada besarnya magnitude dari transient yang

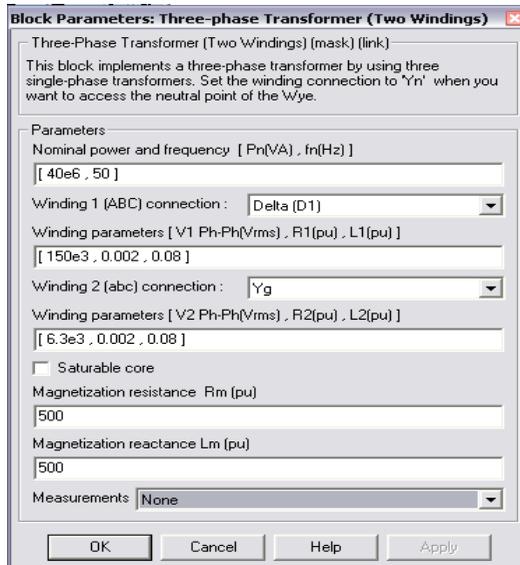
dihasilkan dari *switching capacitor bank*. Parameter sumber yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.1 sebagai berikut :

Tabel 3.1. Data sumber pada sistem

V_{LL} rms (kV)	150
Frekuensi (Hz)	50 Hz
Konfigurasi	Yn
MVA _{Asc} (MVA)	2000
X/R	1

3.3.2 Transformator

Pada sistem terdapat 2 trafo utama yaitu trafo E12-1T1 dan trafo E12-1T2. Trafo E12-1T1 akan menyuplai beban pada bus beban MSS 1 dan trafo E12-1T2 bertugas menyuplai beban-beban pada bus beban MSS 2. Kedua trafo mempunyai parameter yang sama, seperti pada Tabel 3.2.



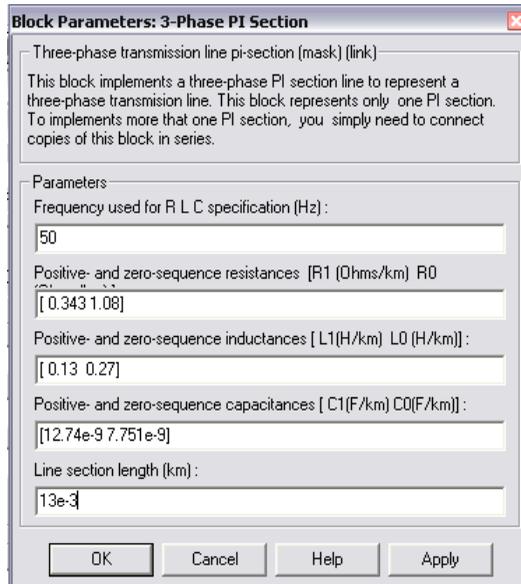
Gambar 3.5. Tampilan *window* trafo tiga fasa pada MATLAB Simulink 7.0

Tabel 3.2. Data trafo E12-1T1 dan trafo E12-1T2

Rating MVA	40
Rating kV primer/kV sekunder	150/6.3
Hubungan belitan	Δ/Y_g
Frekuensi (Hz)	50

3.3.3 Data Saluran

Data saluran atau kabel juga diperoleh dari data awal dengan parameter yang dapat dilihat pada Tabel 3.3 dan Tabel 3.4. Tampilan *window* yang digunakan untuk mengisi parameter saluran pada MATLAB Simulink 7.0 dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Tampilan *window* saluran pada MATLAB Simulink 7.0

Tabel 3.3. Data impedansi saluran

Nama saluran	Reaktansi (ohms/km)		Resistansi (ohms/km)	
	Positive sequence	Zero sequence	Positive sequence	Zero sequence
Cable 1	0.101	0.25	0.101	0.2

Nama saluran	Reaktansi (ohms/km)		Resistansi (ohms/km)	
	Positive sequence	Zero sequence	Positive sequence	Zero sequence
Cable 2	0.101	0.25	0.064	0.2
Cable 3	0.109	0.27	0.098	0.31
Cable 4	0.112	0.28	0.128	0.4
Cable 5	0.118	0.25	0.196	0.62
Cable 6	0.105	0.26	0.08	0.25
Cable 7	0.109	0.27	0.098	0.31
Cable 8	0.101	0.25	0.064	0.2
Cable 9	0.101	0.25	0.064	0.2
Cable 10	0.118	0.25	0.196	0.62
LS1.1S1.UD	0.13	0.27	0.343	1.08
LS1.1S2.UD	0.13	0.27	0.343	1.08
MS1.1S1.U1	0.101	0.25	0.064	0.2
MS1.1S2.U1	0.101	0.25	0.064	0.2

Tabel 3.4.Data panjang saluran

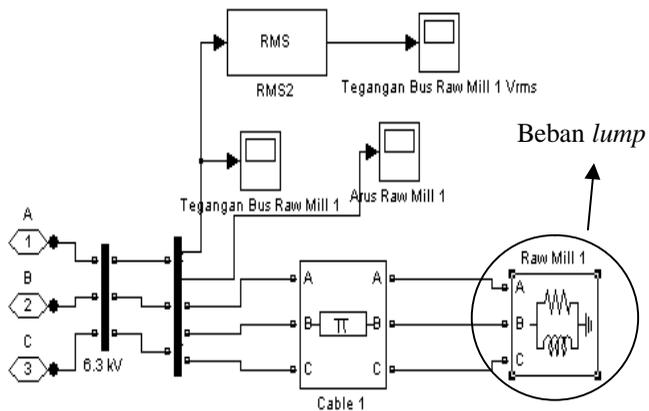
Nama saluran	Panjang saluran (km)
Cable 1	0.2
Cable 2	1.5
Cable 3	1.5
Cable 4	0.25
Cable 5	0.3
Cable 6	0.3
Cable 7	0.3
Cable 8	0.35
Cable 9	0.35
Cable 10	0.3
LS1.1S1.UD	0.013
LS1.1S2.UD	0.013
MS1.1S1.U1	0.026
MS1.1S2.U1	0.026

3.3.4 Beban

Beban yang digunakan dalam pemodelan tugas akhir ini adalah beban *lump*. Pemodelan beban *lump* pada MATLAB Simulink 7.0 dapat dilihat pada Gambar 3.7, dimana parameter-parameter yang dibutuhkan dalam pemodelan diperoleh dari *bus loading* pada ETAP 4.0 dan dapat dilihat pada tabel 3.5 dibawah :

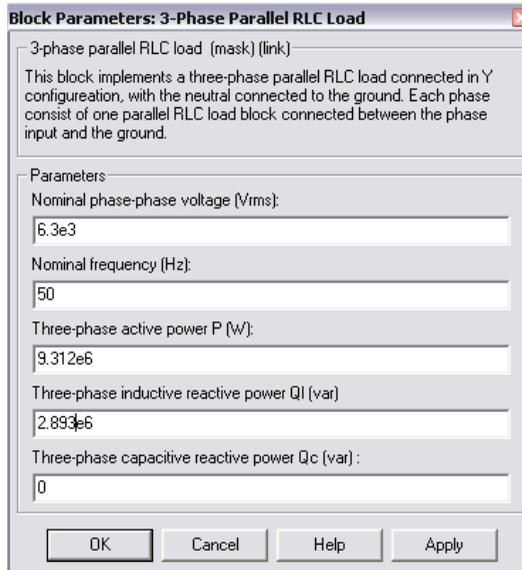
Tabel 3.5. Data beban

Lokasi	MW	MVAR
Bus MSS 1		
Raw Mill 1	9.312	2.893
Blending & Kiln	9.334	3.242
Burning & Cooler	7.216	3.186
Coal Mill, Gypsum dan Additive	2.923	0.946
Packing	1.670	1.109
Bus MSS 2		
Raw Material & Ship Unload	3.714	1.863
Raw Mill	8.185	3.631
Finish Mill 1	9.053	2.844
Finish Mill 2	9.586	3.209



Gambar 3.7. Pemodelan beban *lump* pada MATLAB Simulink 7.0

Tampilan *window* untuk mengisi parameter beban pada MATLAB Simulink 7.0 dapat dilihat pada Gambar 3.8.



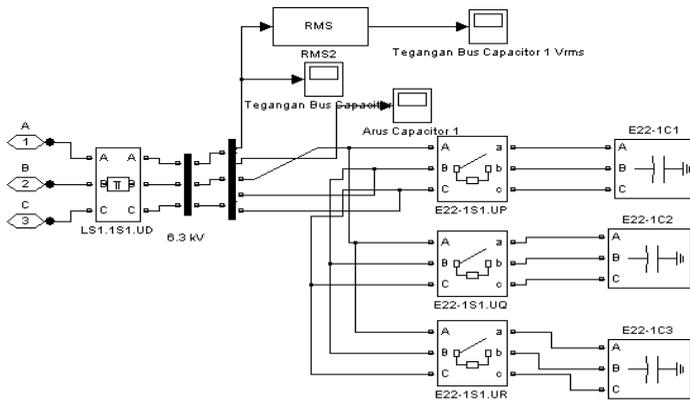
Gambar 3.8. Tampilan *window* beban *lump* pada MATLAB Simulink 7.0

3.3.5 Kapasitor

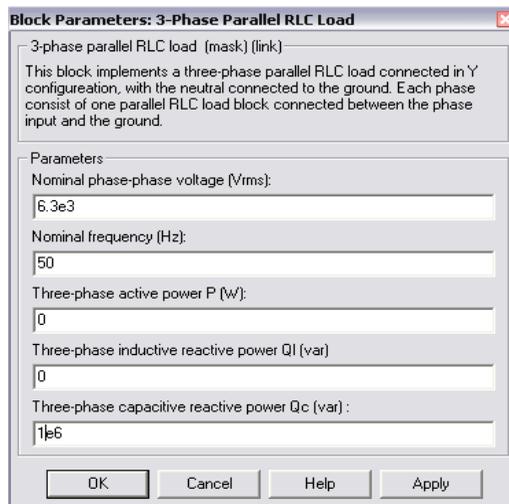
Kapasitor pada sistem terdapat pada bus *capacitor* 1 dan *capacitor* 2, dimana pada masing-masing bus terdiri dari 3 *capacitor bank* dengan kapasitas masing-masing 1 MVar. Pemodelan *capacitor bank* dapat dilihat pada Gambar 3.4. Dan untuk mengisi parameter dari *capacitor bank* dapat dilihat tampilan *window* MATLAB Simulink 7.0 pada Gambar 3.10.

3.3.6 Peralatan *Switching*

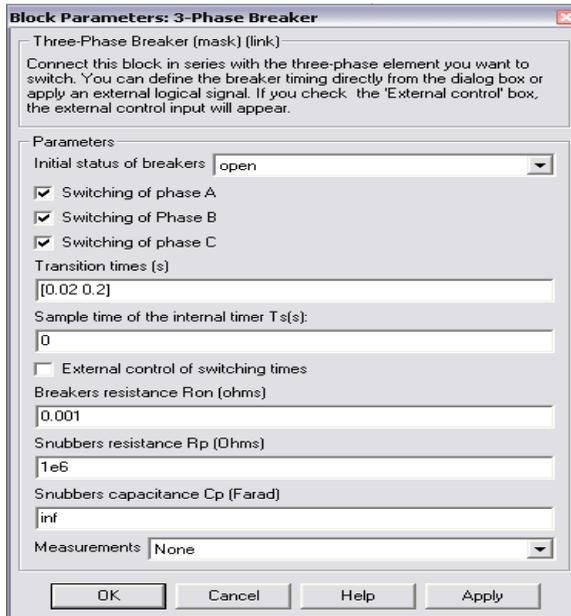
Peralatan *switching* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *breaker* 3 phase yang selanjutnya akan digunakan untuk pengoperasian kapasitor baik secara *single bank* maupun secara *back to back* dengan menyetel waktu *open* dan *close* pada *breaker*.



Gambar 3.9. Pemodelan rangkaian *capacitor bank* dengan menggunakan MATLAB Simulink 7.0



Gambar 3.10. Tampilan *window capacitor bank* pada MATLAB Simulink 7.0



Gambar 3.11. Tampilan *window breaker* tiga fasa pada MATLAB Simulink 7.0

3.4 Pengoperasian *Capacitor Bank*

Pengoperasian *capacitor bank* pada tugas akhir ini dibagi menjadi dua yaitu pengoperasian secara kapasitor tunggal (*single bank*) dan *back to back*.

3.4.1 Kapasitor Tunggal (*Single Bank*)

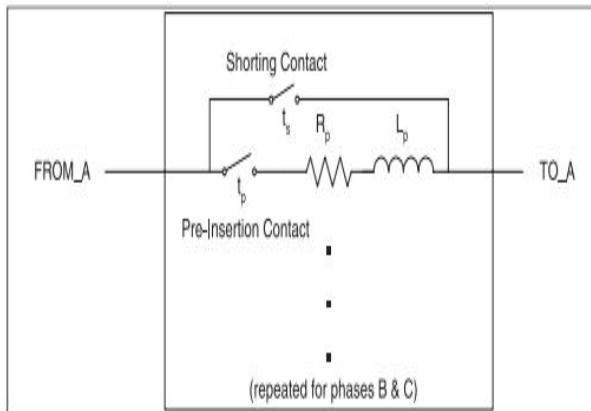
Pengoperasian kapasitor bank secara *single bank* pada tugas akhir ini dilakukan dengan melakukan *switching "on"* pada seluruh kapasitor bank yang terdapat pada bus *capacitor 1* maupun bus *capacitor 2* pada saat $t = 0.02$. Dengan melakukan *switching "on"* pada semua kapasitor pada waktu yang bersamaan, maka semua kapasitor tersebut akan mengambil arus sepenuhnya dari sumber sehingga arus transien yang dihasilkan juga semakin besar dan tentunya tegangan transien yang dihasilkan juga semakin tinggi.

3.4.2 *Back to Back Capacitor Bank*

Pada tugas akhir ini, pengoperasian secara *back to back* dilakukan dengan melakukan *switching capacitor bank* pada masing-masing bus secara bergantian saat *capacitor bank* sebelumnya dalam keadaan *energize*. Pada bus *capacitor* 1 terdapat tiga kapasitor yang dapat dilihat pada Gambar 3.4, yaitu E22-1C1, E22-1C2 dan E22-1C3. Pada pengoperasian secara *back to back*, kapasitor E22-1C1 *diswitch* pada $t = 0.02$ kemudian saat kapasitor E22-1C1 dalam keadaan *energize*, kapasitor kedua yaitu kapasitor E22-1C2 *diswitch* yaitu pada $t = 0.021$. Saat kapasitor E22-1C2 dalam keadaan *energize* kemudian pada $t = 0.024$ giliran kapasitor E22-1C3 yang *diswitch* sehingga terjadi proses *intercharge* dimana hanya kapasitor pertama saja yang mengambil arus dari sumber saat *energize* dan untuk kapasitor E22-1C2 mengambil arus dari E22-1C1 dan pada kapasitor E22-1C3 mengambil arus dari E22-1C2 saat dalam kondisi *energize* sehingga arus dan tegangan transien yang dihasilkan juga semakin kecil. Langkah-langkah yang sama juga diaplikasikan pada kapasitor pada bus *capacitor* 2.

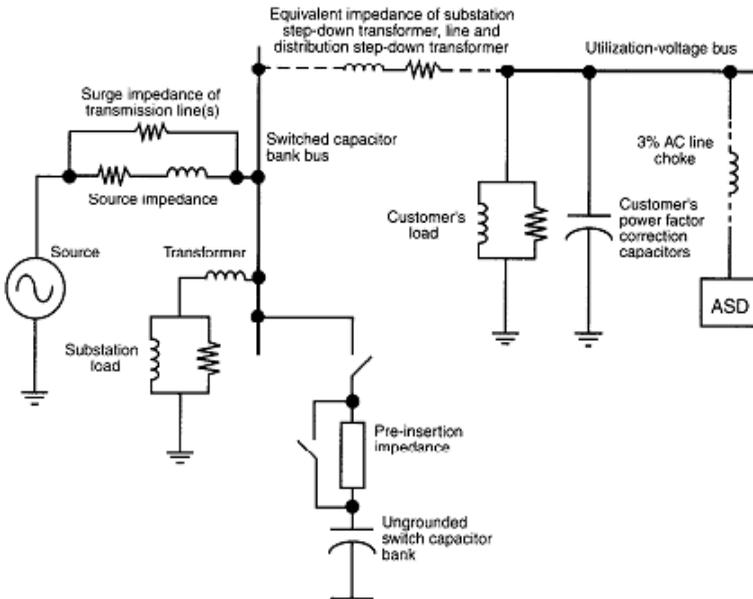
3.5 *Metode Untuk Mengurangi Efek Transien Capacitor Bank Switching*

Metode yang digunakan untuk mengurangi efek transien yang dihasilkan dari *switching capacitor bank* pada tugas akhir ini adalah penyisipan inductor (*pre insertion inductor*).



Gambar 3.12. Rangkaian sederhana *pre insertion inductor* [9]

Metode ini merupakan metode yang sering digunakan dalam suatu sistem kelistrikan. Pada metode *pre insertion inductor*, induktor yang disisipkan diantara kapasitor berguna untuk mengurangi arus transien yang terjadi selama proses *energizing* pada *capacitor bank*. Nilai induktor dan hambatan dalam atau resistor yang digunakan diperoleh dari tabel yang merupakan nilai induktor dan resistor yang pada umumnya dipakai sebagai *pre insertion inductor* dalam suatu sistem kelistrikan. Nilai induktor yang digunakan dalam tugas akhir ini dibagi menjadi dua bagian yaitu tahanan tinggi (*high resistance*) dan tahanan rendah (*low resistance*).



Gambar 3.13. Pemasangan *pre insertion inductor* pada sistem kelistrikan [7]

Pada penggunaan nilai induktor harus diperhatikan juga pengaruhnya pada sistem, karena penggunaan nilai induktor yang terlalu besar akan berpengaruh pada sistem dalam hal penurunan tegangan sistem. Penurunan tegangan ini disebabkan karena dari sistem secara keseluruhan induktor ini akan dianggap sebagai beban sehingga induktor

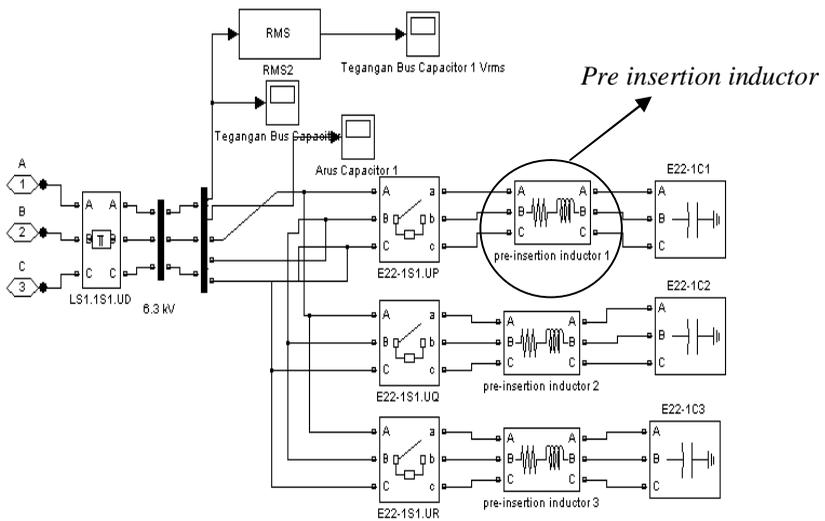
ini juga mengambil arus dari sistem. Oleh karena itu apabila penggunaan *pre insertion inductor (high resistance)* mengakibatkan penurunan tegangan yang terlalu besar maka penggunaan *pre insertion inductor (low resistance)* sangat direkomendasikan. Pemasangan induktor pada metode *pre insertion inductor* adalah secara seri dengan kapasitor bank yang pemodelannya dapat dilihat pada Gambar 3.12.

Tabel 3.6. *Pre insertion inductor (high resistance)* [8]

System Voltage Rating (kV)	Capacitor Bank Size (MVar)	Inductor
35.5	3 to 11	18 mH - 39 ohm
	12 to 22	10.6 mH - 17 ohm
46	4 to 18	18 mH -39 ohm
	19 to 36	10.6 mH - 17 ohm
69	5 to 20	40 mH - 81 Ohm
	21 to 42	18 mH -39 ohm
115	10 to 60	40 mH - 81 Ohm
138	13 to 75	40 mH - 81 Ohm

Tabel 3.7. *Pre insertion inductor (low resistance)* [8]

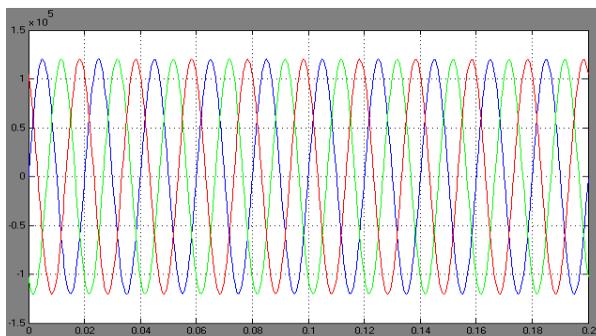
System Voltage Rating (kV)	Capacitor Bank Size (MVar)	Inductor
34.5	3 to33	10 mH - 2.4 ohm
46	4 to 36	10 mH - 2.4 ohm
69	5 to 50	10 mH - 2.4 ohm
	5 to 50	40 mH - 5.5 ohm
115	10 to 65	40 mH - 5.5 ohm
138	13 to 75	40 mH - 5.5 ohm
230	17 to 177	10 mH - 2.4 ohm



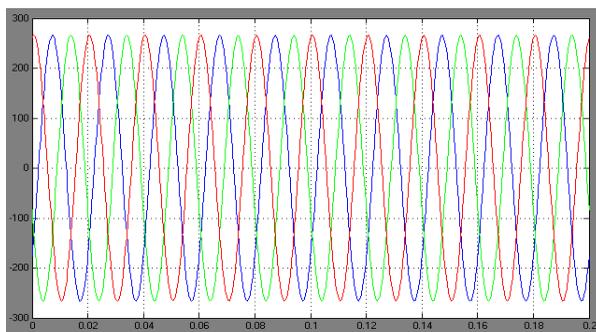
Gambar 3.14. Pemodelan *pre insertion inductor* dalam MATLAB Simulink 7.0

capacitor 2. Nilai tegangan dan arus yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah nilai arus dan tegangan puncak (*line to ground*).

4.1.1 Bus Sumber (150 kV)



(a)

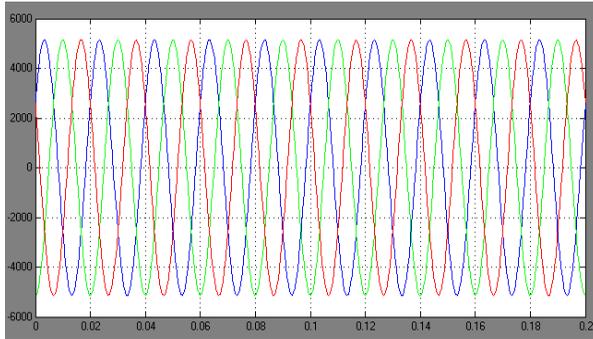


(b)

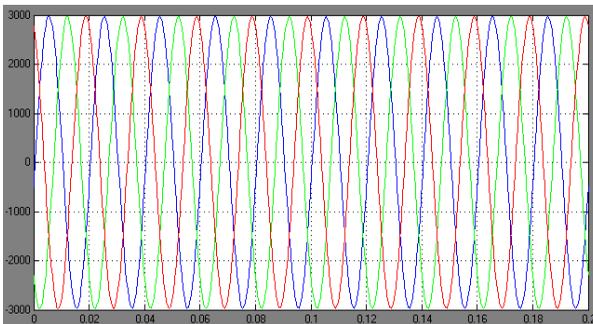
Gambar 4.2. (a) Respon tegangan bus 150 kV sebelum adanya *capacitor bank switching*
(b) Respon arus pada sisi 150 kV sebelum adanya *capacitor bank switching*

Dari hasil simulasi pada kondisi sistem awal yang merupakan kondisi sebelum adanya *capacitor bank switching*, didapatkan nilai tegangan puncak *steady* sebesar 122.5 kV yang dapat dilihat pada Gambar 4.2 (a) dan arus puncak *steady* yang melalui sisi sumber 150 kV sebesar 266 A yang dapat dilihat pada Gambar 4.2 (b).

4.1.2 Bus beban



(a)

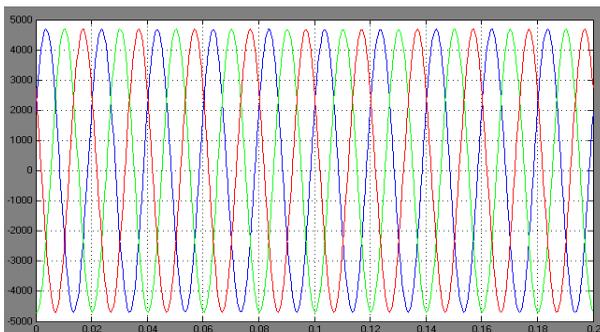


(b)

**Gambar 4.3. (a) Respon tegangan bus MSS 1
(b) Respon arus pada sisi MSS 1**

Dari hasil simulasi pada bus beban MSS 1 pada Gambar 4.3 (a) didapatkan nilai tegangan puncak *steady* sebesar 4,7573 kV atau terjadi penurunan tegangan sebesar 7.5 % dari tegangan nominal dimana nilai persentase tegangan ini merupakan nilai yang masih diijinkan PLN yaitu sebesar - 10%. Arus puncak *steady* yang mengalir menuju bus MSS 1 dapat dilihat karakteristiknya pada Gambar 4.3 (b) yaitu sebesar 2970.5 A.

4.1.3 Bus kapasitor



Gambar 4.4. Respon tegangan bus *Capacitor 1*

Pada kondisi *base case* sistem sebelum adanya *capacitor bank* pada bus *capacitor 1* yang dapat dilihat pada Gambar 4.4, tegangan puncak *steady* mencapai 4,757 kV dengan persentase penurunan tegangan sebesar 7.44 % dimana masih dalam batas persentase nilai tegangan yang diijinkan PLN. Arus puncak *steady* yang mengalir melalui *capacitor 1* pada kondisi sebelum adanya *capacitor bank switching* adalah 0 A karena *breaker* pada *capacitor bank* dalam kondisi *open*.

Hasil simulasi pada keadaan awal sistem sebelum adanya *capacitor bank switching* dapat ditampilkan dalam bentuk Tabel 4.1 dibawah ini. Tabel 4.1 menunjukkan nilai tegangan dalam bentuk persentase penurunan tegangan terhadap nilai tegangan nominal dan nilai arus puncak *steady* yang mengalir pada masing-masing lokasi pengukuran. Dari hasil simulasi ternyata penurunan tegangan pada bus pengukuran ternyata masih dalam batas yang diijinkan PLN yaitu -10 %.

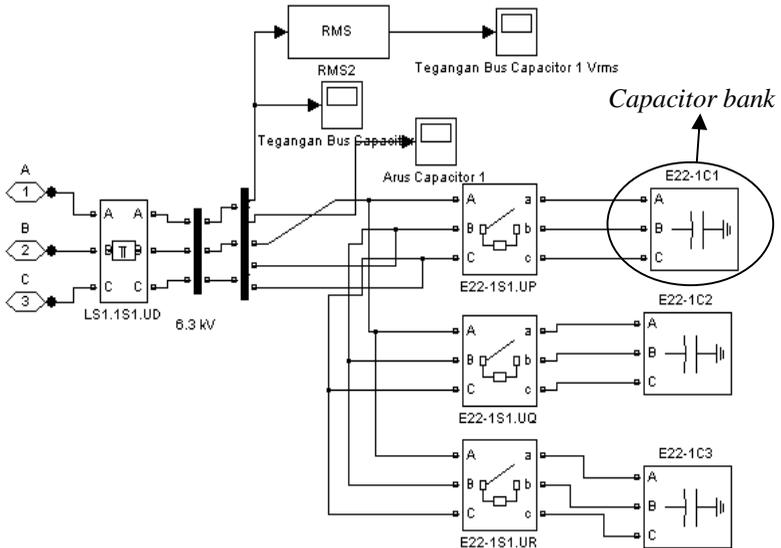
Tabel 4.1.Kondisi sebelum *capacitor bank switching*

Lokasi	Persentase penurunan tegangan <i>steady</i> (%)	Arus <i>steady</i> (A)
Bus 150 kV	0.82	266
Bus MSS 1	7.44	2970.5
Bus MSS 2	8.69	3339.5
Bus Capacitor 1	7.44	0

Lokasi	Persentase penurunan tegangan <i>steady</i> (%)	Arus <i>steady</i> (A)
Bus Capacitor 2	8.71	0

4.2 Simulasi Sistem Pada Kondisi *Capacitor Bank Switching*

Pengoperasian *capacitor bank switching* dalam tugas akhir ini dibagi menjadi dua metode yaitu secara *single bank* dan *back to back*. Rangkaian kapasitor yang digunakan dalam tugas akhir ini bisa dilihat pada Gambar 4.5 yang terdiri dari tiga *capacitor bank* dengan peralatan *switching* yang digunakan adalah *breaker* tiga fasa.



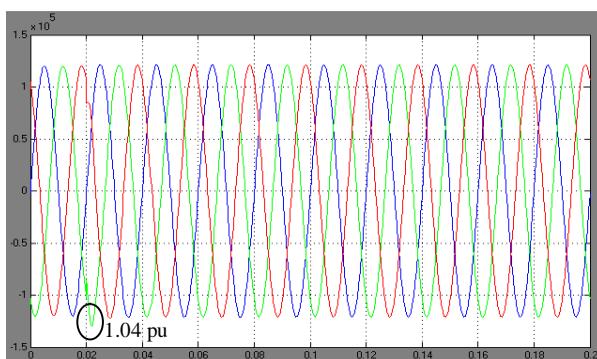
Gambar 4.5. Rangkaian kapasitor dalam MATLAB Simulink 7.0

4.2.1 Pengoperasian *Capacitor Bank* Secara *Single Bank* (Kapasitor Tunggal)

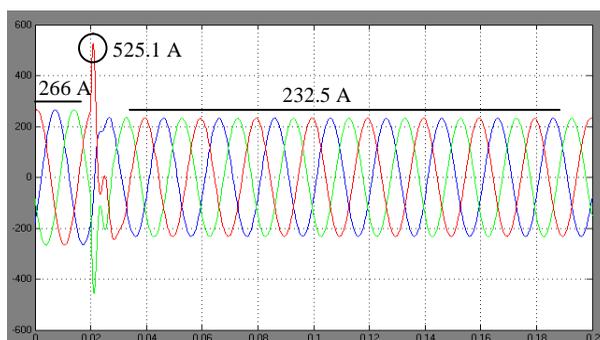
Pengoperasian kapasitor secara *single bank* pada tugas akhir ini adalah pengoperasian yang dilakukan dengan *switching* pada *capacitor*

bank pada waktu yang bersamaan. Pada tugas akhir ini, *capacitor bank* pada bus *capacitor* 1 dan *capacitor* 2 dimana pada masing-masing bus terdapat tiga *capacitor bank* dilakukan *switching* pada detik ke 0.02.

4.2.1.1 Bus Sumber (150 kV)



(a)



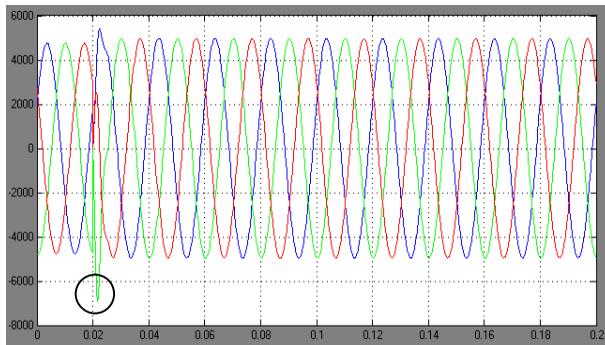
(b)

Gambar 4.6. (a) Respon tegangan bus sumber 150 kV
(b) Respon arus pada sisi sumber 150 kV

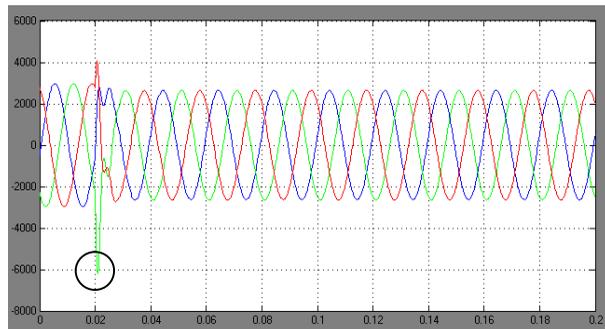
Dari hasil simulasi pada Gambar 4.6 (a) dan (b) , bahwa sesaat setelah *capacitor bank* di *switch* pada $t = 0.02$ terjadi kenaikan sesaat pada tegangan dan arus. Pada Gambar 4.6 (a) dapat dilihat bahwa kenaikan tegangan puncak transien yang terjadi pada bus sumber 150 kV sangat kecil, bisa dikatakan bahwa *capacitor bank switching* tidak terlalu

berpengaruh pada bus sumber 150 kV dan besar tegangan puncak transien yang terjadi sebesar 1.04 pu dari tegangan nominal. Untuk arus pada sisi sumber 150 kV yang dapat dilihat pada Gambar 4.6 (b), terjadi kenaikan arus puncak transien sebesar 525.1 A sebelum mencapai keadaan arus puncak *steady* sebesar 232.5 A. Pada Gambar 4.6 (b) juga dapat dilihat bahwa terjadi penurunan arus puncak *steady* sebelum dan sesudah *switching* yang menandakan bahwa sistem telah terkompensasi dengan masuknya *capacitor bank* ke sistem.

4.2.1.2 Bus Beban



(a)

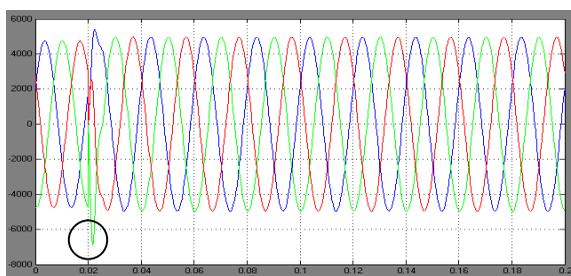


(b)

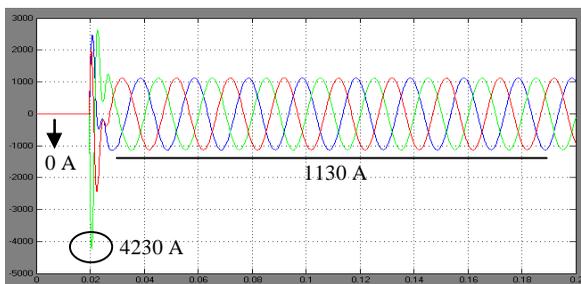
Gambar 4.7. (a) Respon tegangan bus MSS 1
(b) Respon arus pada sisi MSS 1

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.7 (a), bahwa sesaat setelah *capacitor bank switching* pada detik ke 0.02 muncul adanya kenaikan tegangan puncak transien (*transient overvoltage*) yang terjadi pada bus beban MSS 1. Pada bus MSS 1 terjadi kenaikan tegangan sesaat sebesar 6.8967 kV atau 1.34 pu dari tegangan nominal sebelum mencapai keadaan *steady* pada nilai level tegangan 4.970 kV, dimana pada level tegangan *steady* ini terjadi peningkatan jika dibandingkan dengan sebelum adanya *capacitor bank* sehingga presentase penurunan tegangan terhadap tegangan nominal menurun menjadi 3.3 % dimana masih dalam batas yang diijinkan. Pada Gambar 4.7 (b) untuk arus puncak transien yang dihasilkan pada sisi beban MSS 1 adalah sebesar 6194.8 A sebelum mencapai keadaan *steady* pada 2642 A, dimana telah terjadi penurunan arus puncak *steady* jika dibandingkan dengan sebelum adanya *capacitor bank*.

4.2.1.3 Bus kapasitor



(a)



(b)

Gambar 4.8. (a) Respon tegangan bus *Capacitor* 1
(b) Respon arus pada sisi *Capacitor* 1

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.8 (a) dapat dilihat bahwa karakteristik tegangan pada bus *capacitor* 1 sesaat setelah *switching* pada saat $t = 0.02$ mengalami kenaikan tegangan puncak transien sebesar 6.8967 kV atau 1.34 pu dari tegangan nominal sebelum mencapai tegangan puncak *steady* sebesar 4.9695 V dimana terjadi peningkatan tegangan puncak *steady* pada saat setelah transien jika dibandingkan dengan sebelum adanya *capacitor bank switching* pada nilai persentase 3.3 % sehingga presentase tegangan *steady* ini masih berada dalam batas toleransi yang diijinkan. Dari Gambar 4.8 (b), dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan arus puncak transien yang mengalir pada bus *capacitor* 1. Sebelum *switching* arus yang mengalir adalah nol karena *breaker* pada *capacitor bank* masih dalam keadaan *open*, sesaat setelah *switching* pada $t = 0.02$ terjadi kenaikan sesaat arus puncak transien yang mencapai 4230 A sebelum mencapai arus *steady* sebesar 1130 A.

Arus dan tegangan puncak transien yang dihasilkan pada pengoperasian secara *single bank* dapat ditampilkan dalam sebuah Tabel yang dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Table 4.2. Kenaikan tegangan transien pada pengoperasian *single bank*

Lokasi	Kenaikan tegangan puncak transien (pu)	Arus puncak transien (A)
Bus 150 kV	1.04	525.1
Bus MSS 1	1.34	6194.8
Bus MSS 2	1.35	7138.4
Bus Capacitor 1	1.34	4230
Bus Capacitor 2	1.35	4907

Dan untuk perbandingan besarnya persentase penurunan tegangan *steady* sebelum dan setelah adanya *capacitor bank switching* dapat dilihat pada Tabel 4.3.

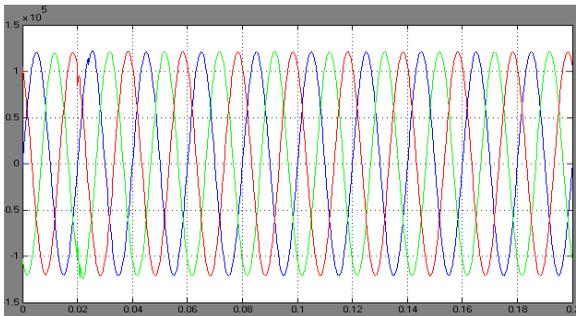
Table 4.3. Persentase penurunan tegangan *steady*

Lokasi	Persentase penurunan tegangan <i>steady</i> (%)	
	Sebelum <i>switching</i>	Setelah <i>switching</i>
Bus 150 kV	0.82	0.82
Bus MSS 1	7.44	3.30
Bus MSS 2	8.69	3.57
Bus Capacitor 1	7.44	3.31
Bus Capacitor 2	8.71	3.59

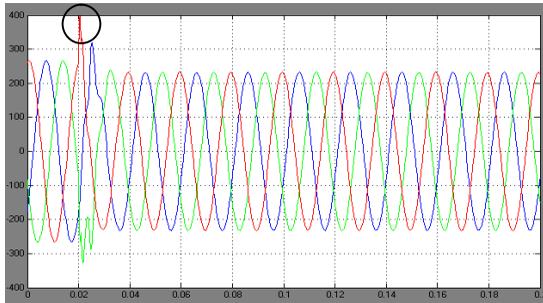
4.2.2 Pengoperasian *Capacitor Bank Secara Back to Back*

Prinsip dari pengoperasian kapasitor secara *back to back* pada tugas akhir ini adalah melakukan *switching* untuk beberapa *capacitor bank* pada bus yang sama secara bergantian. Dalam tugas akhir ini *back to back* dilakukan pada bus *Capacitor 1* dan bus *Capacitor 2*, dimana pada masing-masing bus terdiri dari tiga kapasitor bank. Pengoperasian *back to back* dilakukan dengan *switching* pada kapasitor bank pertama pada masing-masing bus *capacitor* pada $t = 0.02$. Selanjutnya pada saat *capacitor bank* yang pertama dalam keadaan *energize*, *capacitor bank* yang kedua dimasukkan pada $t = 0.021$, dan kemudian melakukan *switching* pada *capacitor bank* yang ketiga pada saat *capacitor bank* yang kedua dalam keadaan *energize* yaitu pada $t = 0.024$. Langkah yang sama dilakukan juga pada kapasitor di bus *capacitor 2*.

4.2.2.1 Bus Sumber 150 kV



(a)

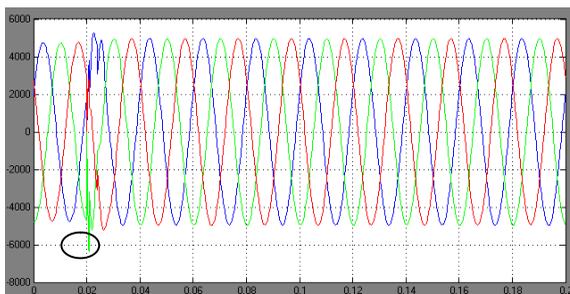


(b)

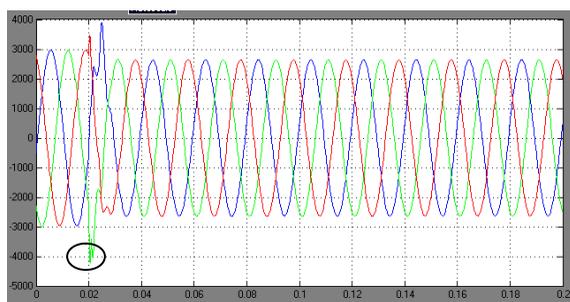
Gambar 4.9. (a) Respon tegangan bus sumber 150 kV
 (b) Respon arus pada sisi sumber 150 kV

Pengoperasian *capacitor bank* dengan sistem *back to back* tidak berpengaruh pada tegangan pada bus 150 kV. Dari Gambar 4.9 (a), tegangan puncak transien yang dihasilkan hanya mencapai 1.01 pu dari tegangan nominal dan dapat dikatakan bahwa pengoperasian *capacitor bank* baik secara *single bank* maupun *back to back* cenderung tidak berpengaruh pada sisi sumber 150 kV. Ini dikarenakan redaman yang dihasilkan dari induktansi sistem dari saluran atau kabel dan trafo, sehingga pada bus sumber 150 kV hanya sedikit dipengaruhi oleh *transient* yang disebabkan oleh *capacitor bank switching*. Akan tetapi pada kenaikan arus puncak transien yang dihasilkan dengan pengoperasian secara *back to back* menjadi lebih kecil jika dibandingkan dengan pengoperasian dengan *single bank*. Dari Gambar 4.9 (b), arus puncak yang dihasilkan yaitu sebesar 397.83 A. Ini dikarenakan adanya proses *intercharge* pada pengoperasian secara *back to back*, dimana tidak semua proses *energize* pada masing-masing kapasitor mengambil arus dari sistem, hanya kapasitor yang pertama kali mengalami *switching* saja yang mengambil arus dari sumber sistem.

4.2.2.2 Bus Beban



(a)

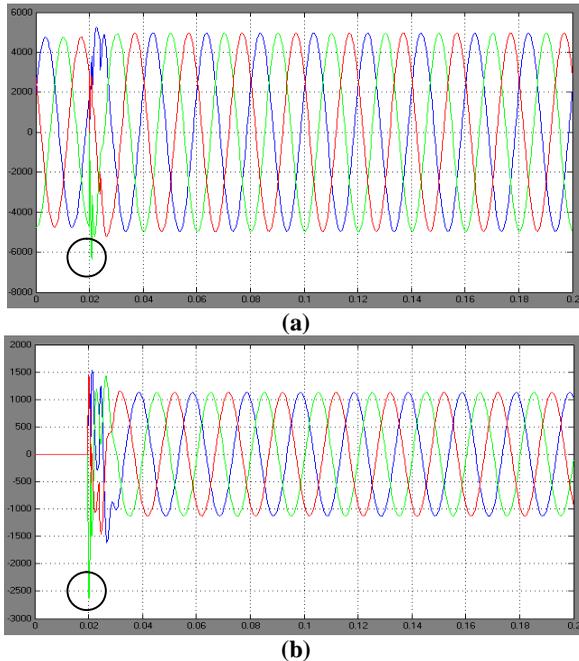


(b)

Gambar 4.10. (a) Respon tegangan bus beban MSS 1
(b) Respon arus pada sisi MSS 1

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.10 (a) dapat dilihat bahwa telah terjadi penurunan tegangan puncak transien yang dihasilkan dari pengoperasian dengan *back to back* jika dibandingkan dengan pengoperasian dengan *single bank* pada bus MSS 1. Pada bus MSS 1 tegangan puncak transien yang dihasilkan sesaat setelah *switching* pada $t = 0.02$ adalah 6.3623 kV atau 1.24 pu dari tegangan nominal. Untuk arus puncak transien yang dihasilkan dari *capacitor bank switching* dengan sistem *back to back* juga mengalami penurunan jika dibandingkan dengan pengoperasian secara kapasitor tunggal. Pada Gambar 4.10 (b) arus puncak transien yang ditimbulkan sesaat setelah *switching* pada $t = 0.02$ yang terjadi pada bus MSS 1 adalah sebesar 4232 A.

4.2.2.3 Bus kapasitor



Gambar 4.11. (a) Respon tegangan bus *Capacitor* 1
(b) Respon arus pada sisi *Capacitor* 1

Pada Gambar 4.11 (a) dapat diperoleh analisa bahwa terjadi penurunan tegangan puncak transien pada bus *capacitor* 1 sesaat setelah *switching* pada $t = 0.02$ ketika dioperasikan dengan sistem *back to back* jika dibandingkan dengan pengoperasian secara *single bank*. Pada bus MSS 1 dihasilkan tegangan puncak transien sebesar 6.3623 V atau 1.25 pu dari tegangan nominal. Penurunan juga terjadi pada arus puncak transien yang dihasilkan dari *switching* kapasitor bank yang dioperasikan dengan *back to back* jika dibandingkan dengan pengoperasian dengan *single capacitor*. Dari hasil simulasi pada Gambar 4.11 (b), arus puncak transien yang dihasilkan pada bus *capacitor* 1 sebesar 2628 A.

Hasil simulasi mengenai perbandingan tegangan puncak transien yang dihasilkan pada pengoperasian *capacitor bank* secara

single bank dan *back to back* dapat dilihat pada Tabel 4.4. Dari Tabel 4.4 dapat diambil suatu analisa bahwa pengoperasian secara *back to back* menghasilkan tegangan puncak transien yang lebih kecil daripada pengoperasian secara *single bank*. Ini dikarenakan adanya proses *intercharge* pada pengoperasian secara *back to back*

Table 4.4. Perbandingan tegangan puncak transien pada pengoperasian *back to back* dan *single bank*

Lokasi	Kenaikan tegangan puncak transien (pu)	
	<i>Single bank</i>	<i>Back to back</i>
Bus 150 kV	1.04	1.01
Bus MSS 1	1.34	1.24
Bus MSS 2	1.35	1.25
Bus Capacitor 1	1.34	1.25
Bus Capacitor 2	1.35	1.25

Dan pada Tabel 4.5 ditampilkan suatu perbandingan mengenai arus puncak transien yang dihasilkan dari pengoperasian secara *single bank* dan *back to back*.

Table 4.5. Perbandingan arus puncak transien pada pengoperasian secara *back to back* dan *single bank*

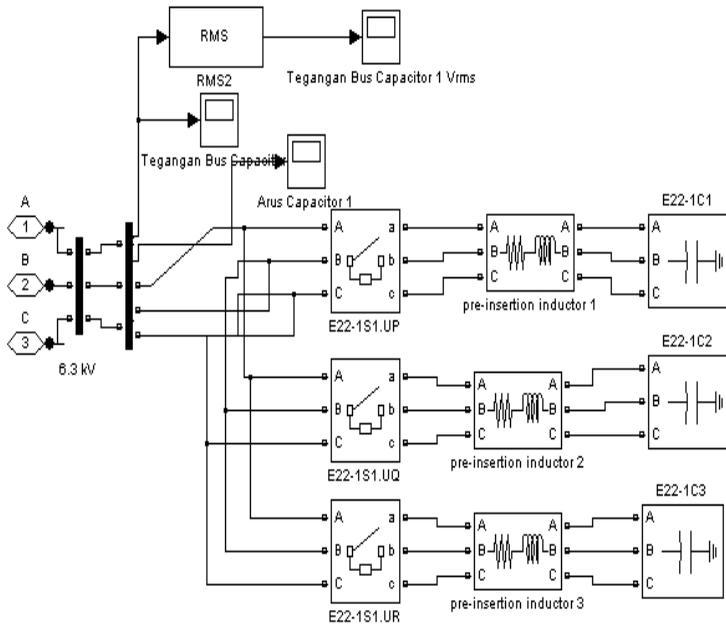
Lokasi	Arus puncak transien (A)	
	<i>Single bank</i>	<i>Back to back</i>
Bus 150 kV	525.1	397.83
Bus MSS 1	6194.8	4232
Bus MSS 2	7138.4	4804.5
Bus Capacitor 1	4230	2628
Bus Capacitor 2	4907	2953.2

4.3 *Pre Insertion Inductor*

4.3.1 *Pre Insertion Inductor* Pada Pengoperasian Secara *Single Bank*

Metode yang digunakan untuk mengurangi efek transien yang dihasilkan dari *capacitor bank switching* salah satunya yang sering

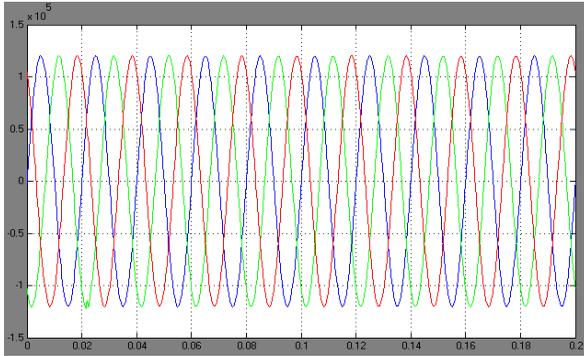
digunakan adalah dengan menyisipkan induktor (*pre insertion inductor*) yang pemodelannya dapat dilihat pada Gambar 4.12 dibawah ini:



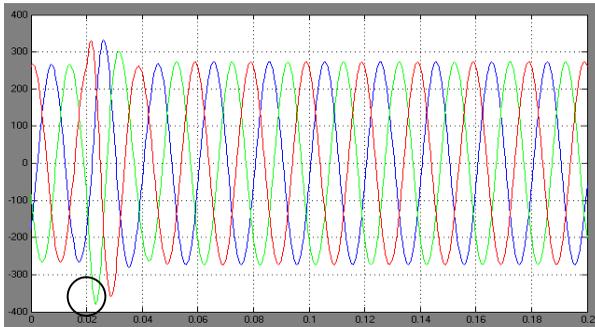
Gambar 4.12. *Pre- insertion inductor* pada kapasitor

Pada tugas akhir ini, metode yang digunakan untuk mereduksi transien yang dihasilkan dari *switching* kapasitor bank adalah dengan sistem *pre-insertion inductor*, dimana pada prinsipnya adalah menyisipkan nilai induktansi diantara *capacitor bank*. Induktansi ini akan membatasi arus transien selama proses *energize*. Pada simulasi tugas akhir ini akan digunakan dua nilai induktansi yaitu untuk *pre insertion inductor (low resistance)* 10 mH dengan nilai resistansinya sebesar 2.4 ohm dan untuk *pre insertion inductor (high resistance)* dengan nilai induktansi 18 mH dan 39 ohm untuk nilai resistansinya.

4.3.1.1 Bus sumber (150 kV)



(a)



(b)

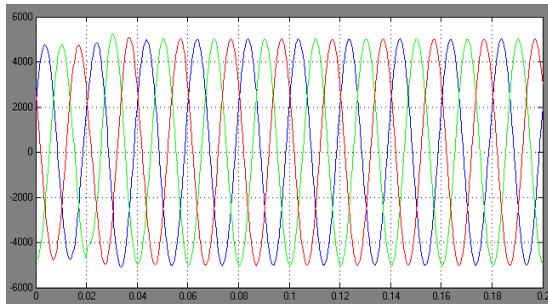
Gambar 4.13. (a) Respon tegangan bus 150 kV

(b) Respon arus pada sisi 150 kV

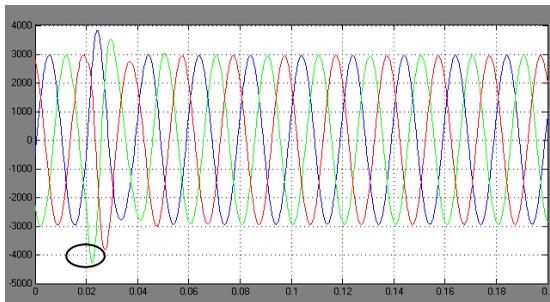
Dari hasil simulasi pada bus 150 kV pada Gambar 4.13 (a) dan (b), bahwa penyisipan induktor diantara kapasitor dalam hal ini *low resistance pre insertion inductor* sebagai metode untuk mengurangi transien sangat efektif untuk mengurangi arus dan tegangan transien pada bus 150 kV yang dihasilkan oleh *capacitor bank switching*. Pada Gambar 4.13 (b) arus transien yang dihasilkan berkurang menjadi

379.3 A dibandingkan sebelum adanya *pre insertion inductor*, sebelum mencapai keadaan *steady* pada 273.6 A.

4.3.1.2 Bus beban



(a)



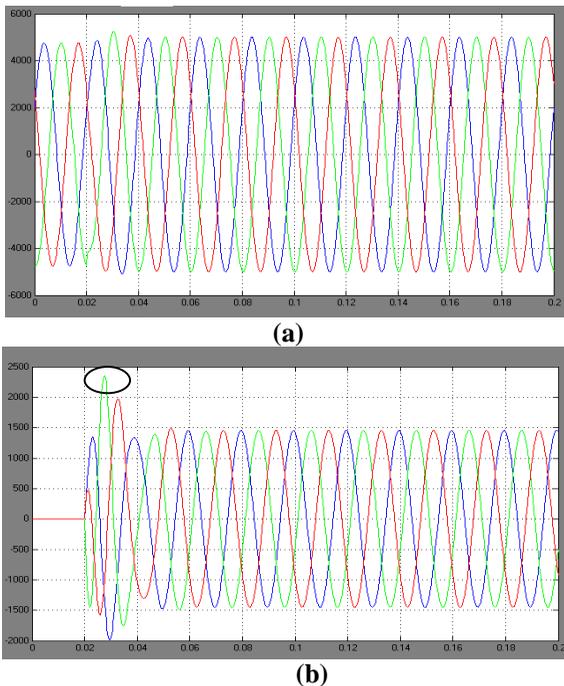
(b)

Gambar 4.14. (a) Respon tegangan bus MSS 1
(b) Respon arus pada sisi MSS 1

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.14 (a) dapat dilihat bahwa dengan menyisipkan induktor diantara kapasitor dalam hal ini *low resistance pre insertion inductor* ternyata sangat efektif mengurangi tegangan transien yang dihasilkan dari *capacitor bank switching* pada bus MSS 1. Pada bus MSS1 tegangan puncak transien yang dihasilkan setelah adanya *pre insertion inductor* hanya sebesar 1.02 pu dari tegangan nominal. Tegangan puncak *steady* setelah *switching* yang mengalir menuju bus MSS 1 mengalami penurunan pada level tegangan 4.948 kV atau mengalami peningkatan presentase penurunan tegangan sebesar 3.79 %

jika dibandingkan sebelum adanya *pre insertion inductor*. Penurunan juga terjadi pada arus puncak transien yang dihasilkan pada sisi beban MSS 1 setelah adanya *pre insertion inductor*. Dari hasil simulasi pada Gambar 4.14 (b) arus puncak transien yang dihasilkan adalah 4220 A atau terjadi penurunan jika dibandingkan sebelum adanya *pre insertion inductor*. Arus puncak *steady* yang dihasilkan setelah *switching* dengan adanya *pre insertion inductor* mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan sebelum *pre insertion inductor*, ini dikarenakan bahwa sesaat setelah *switching*, *pre insertion inductor* akan membatasi arus transien dan pada saat mencapai *steady* maka induktor ini akan bertindak sebagai beban yang menyerap arus . Pada sisi beban MSS 1 arus *steady* yang dihasilkan setelah *switching* pada $t = 0.02$ adalah 2955 A .

4.3.1.3 Bus Kapasitor



Gambar 4.15. (a) Respon tegangan bus *Capacitor* 1
 (b) Respon arus pada sisi *Capacitor* 1

Hasil simulasi pada Gambar 4.15 (a) menunjukkan bahwa terjadi penurunan tegangan puncak transien dihasilkan oleh *switching* kapasitor setelah adanya *low resistance pre insertion inductor* pada $t = 0.02$ yang hanya mencapai 1.02 pu dari tegangan nominal pada bus *capacitor* 1. Dari Gambar 4.15 (b) menunjukkan bahwa penurunan yang signifikan terjadi pada arus puncak transien dan arus *steady* yang mengalir pada sisi *capacitor bank*. Arus puncak transien yang terjadi pada *capacitor* 1 sebesar 2350 A. Arus *steady* yang mengalir pada sisi *capacitor* 1 setelah *switching* sebesar 1454.6 A.

Hasil simulasi besarnya arus dan tegangan transien yang dihasilkan setelah pemasangan *pre insertion inductor* pada pengoperasian *capacitor bank* secara *single bank* dapat di lihat pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7.

Tabel 4.6. Tegangan transien yang dihasilkan setelah pemasangan *pre insertion inductor*

Lokasi	Tegangan transien	
	<i>Low resistance</i> 10 mH - 2.4 ohm	<i>High resistance</i> 18 mH - 39 ohm
Bus 150 kV	1.00	1.00
Bus MSS 1	1.02	1.00
Bus MSS 2	1.00	1.00
Bus Capacitor 1	1.02	1.00
Bus Capacitor 2	1.00	1.00

Tabel 4.7. Arus transien yang dihasilkan setelah pemasangan *pre insertion inductor*

Lokasi	Arus transien	
	<i>Low resistance</i> 10 mH - 2.4 ohm	<i>High resistance</i> 18 mH - 39 ohm
Bus 150 kV	379.3	298.7
Bus MSS 1	4220	3270
Bus MSS 2	4589	3700
Bus Capacitor 1	2350	410.72
Bus Capacitor 2	2745.5	400

4.3.2 *Pre Insertion Inductor Pada Pengoperasian Secara Back to Back*

Hasil simulasi besarnya arus dan tegangan transien yang dihasilkan setelah pemasangan *pre insertion inductor* pada pengoperasian *capacitor bank* secara *back to back* dapat di lihat pada Tabel 4.8 dan Tabel 4.9.

Tabel 4.8. Tegangan transien yang dihasilkan setelah pemasangan *pre insertion inductor*

Lokasi	Tegangan transien	
	<i>Low resistance</i> 10 mH - 2.4 ohm	<i>High resistance</i> 18 mH - 39 ohm
Bus 150 kV	1.00	1.00
Bus MSS 1	1.00	1.00
Bus MSS 2	1.00	1.00
Bus Capacitor 1	1.00	1.00
Bus Capacitor 2	1.00	1.00

Tabel 4.9. Arus transien yang dihasilkan setelah pemasangan *pre insertion inductor*

Lokasi	Arus transien	
	<i>Low resistance</i> 10 mH - 2.4 ohm	<i>High resistance</i> 18 mH - 39 ohm
Bus 150 kV	345.94	289
Bus MSS 1	3825	3249
Bus MSS 2	4500	3620
Bus Capacitor 1	2000	380.8
Bus Capacitor 2	2604.3	382.8

Pada Tabel 4.10 dibawah ini ditampilkan penurunan tegangan *steady* dengan menggunakan ukuran induktor dan resistor pada *pre insertion inductor* (*low resistance*) dan *pre insertion inductor* (*high resistance*).

Tabel 4.10. Perbandingan penggunaan *pre insertion inductor* terhadap penurunan tegangan *steady*

Lokasi	persentase penurunan tegangan <i>steady</i> (%)	
	Sebelum <i>pre-insertion inductor</i> (10 mH - 2.4 ohm)	setelah <i>pre-insertion inductor</i> (18 mH - 39 ohm)
Bus 150 kV	0.82	0.82
Bus MSS 1	3.3	3.79
Bus MSS 2	3.57	3.88
Bus Capacitor 1	3.31	3.75
Bus Capacitor 2	3.59	3.85

Tabel 4.11 menunjukkan hasil simulasi tegangan puncak transien yang dihasilkan pada pengoperasian *capacitor bank* dan setelah pemasangan *pre insertion inductor* serta pada Tabel 4.12 menampilkan arus puncak transien dari pengoperasian *capacitor bank* dan setelah pemasangan *pre insertion inductor*.

Tabel 4.11. Hasil simulasi tegangan puncak transien

Lokasi	Tegangan puncak transien (pu)		
	<i>Single bank</i>	<i>Back to back</i>	<i>Pre-insertion inductor</i> (10 mH - 2.4 ohm)
Bus 150 kV	1.01	1.01	1
Bus MSS 1	1.34	1.24	1.02
Bus MSS 2	1.35	1.25	1.00
Bus Capacitor 1	1.34	1.25	1.02
Bus Capacitor 2	1.35	1.25	1.00

Table 4.12. Hasil simulasi arus puncak transien

Lokasi	Arus puncak transien (A)		
	<i>Single bank</i>	<i>Back to back</i>	<i>Pre-insertion inductor</i> 10 mH - 2.4 ohm
Bus 150 kV	525.1	397.83	379.3
Bus MSS 1	6194.8	4232	4220
Bus MSS 2	7138.4	4804.5	4589
Bus Capacitor 1	4230	2628	2350
Bus Capacitor 2	4907	2953.2	2745.5

===== **Halaman Ini Sengaja Dikosongkan** =====

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Tegangan transien yang dihasilkan karena *capacitor bank switching* pada sistem tidak berpengaruh pada sisi sumber 150 kV karena tegangan transien yang dihasilkan hanya mencapai 1.04 pu.
2. Pengoperasian *capacitor bank* secara *back to back* menghasilkan arus dan tegangan transien yang lebih kecil jika dibandingkan dengan pengoperasian secara *single bank*.
3. Pengoperasian *back to back* hanya menghasilkan tegangan transien maksimum 1.25 pu pada sistem sedangkan pengoperasian *single bank* menghasilkan tegangan transien maksimum 1.35 pu.
4. Penggunaan *pre insertion inductor* sangat efektif untuk mengurangi efek transien yang dihasilkan dari *capacitor bank switching* sehingga mengurangi tegangan transien sampai 1 pu.
5. Penggunaan *high resistance pre insertion inductor* lebih optimal untuk mengurangi arus transien yang dihasilkan *capacitor bank switching* dibandingkan dengan *low resistance pre insertion inductor* tetapi harus diperhatikan penurunan tegangan *steady* yang dihasilkan setelah *switching*.

5.2 Saran

Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan lebih transien yang dihasilkan pada sistem PT HOLCIM INDONESIA, TBK PLANT CC#2 CILACAP mencapai 1.25 pu pada pengoperasian secara *back to back* dan 1.35 pu pada pengoperasian secara *single bank*. Dan juga dapat dilihat bahwa penggunaan *pre insertion inductor* sangat efektif untuk mengurangi efek transien yang dihasilkan oleh *capacitor bank switching*.

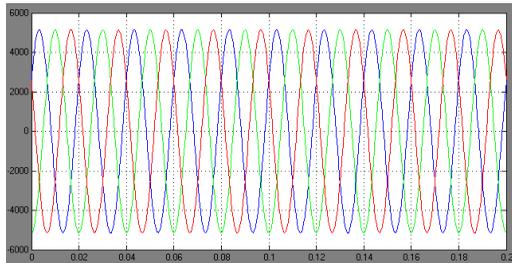
Sangat diharapkan ada penelitian lebih lanjut mengenai metode untuk mereduksi transien yang dihasilkan oleh *capacitor bank switching* dengan memperhatikan hasil simulasi dengan menggunakan *pre insertion inductor* yang masih mempunyai kelemahan dari segi nilai induktansi dan resistansinya, karena nilai ini berpengaruh terhadap tegangan *steady* sistem setelah *switching* sehingga nantinya diperoleh metode yang lebih baik dari segi teknis maupun biaya. Untuk

mengetahui pengaruh transien pada sistem maka diharapkan adanya data spesifikasi detail peralatan dan seting pengaman pada sistem.

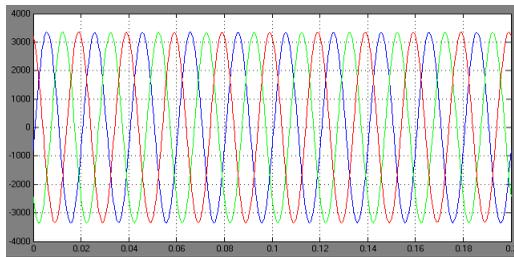
LAMPIRAN

I. Simulasi Awal Sistem Sebelum *Capacitor Bank Switching*

Bus MSS 2

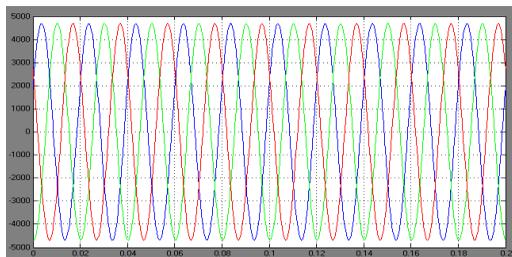


(a) Respon tegangan bus MSS 2



(b) Respon arus pada sisi bus MSS 2

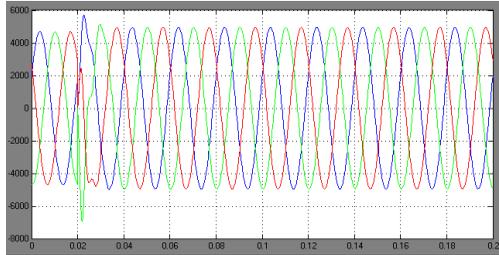
Bus Capacitor 2



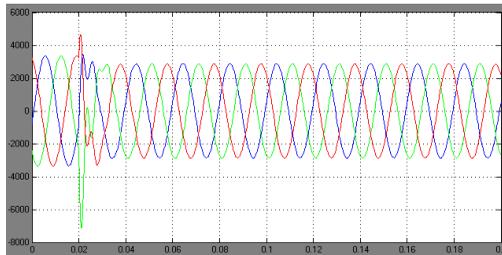
(a) Respon tegangan bus *Capacitor 2*

II. Pengoperasian *Capacitor Bank Secara Single Bank* ($t = 0.02$)

Bus MSS 2

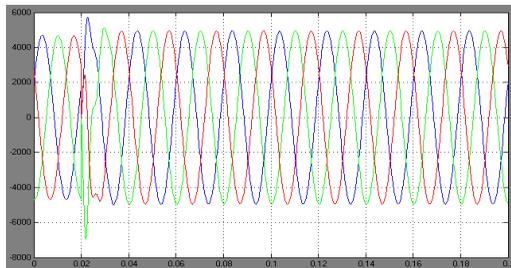


(a) Respon tegangan bus MSS 2

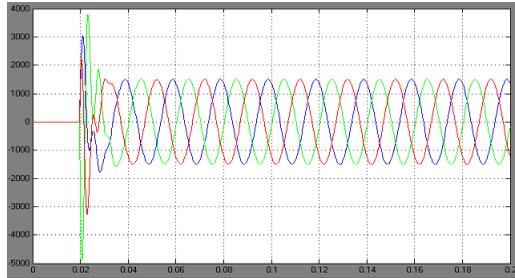


(b) Respon arus pada sisi beban MSS 2

Bus Capacitor 2



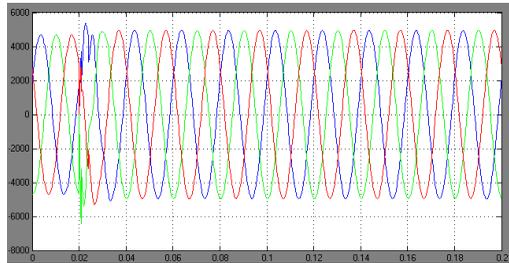
(a) Respon tegangan bus *Capacitor 2*



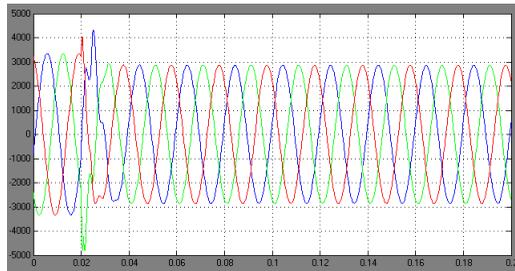
(b) Respon arus pada sisi *Capacitor 2*

III. Pengoperasian *Capacitor Bank Secara Back to Back* ($t_1 = 0.02$, $t_2 = 0.021$, $t_3 = 0.024$)

Bus MSS 2

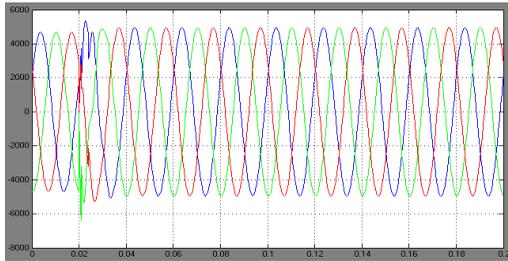


(a) Respon tegangan bus MSS 2

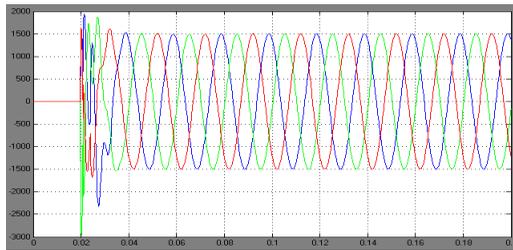


(b) Respon arus pada sisi beban MSS 2

Bus Capacitor 2



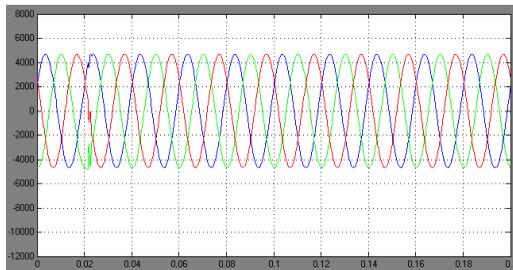
(a) Respon tegangan pada bus *Capacitor 2*



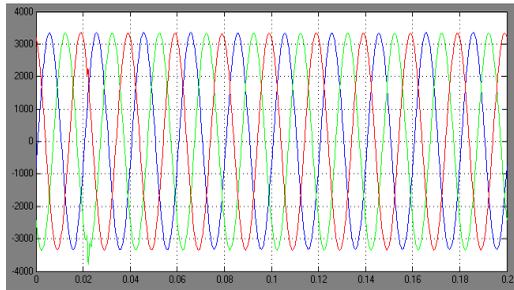
(b) Respon arus pada sisi *Capacitor 2*

IV. Pre Insertion Inductor Pada Pengoperasian Secara Single Bank (10 mH - 2.4 ohm)

Bus MSS 2

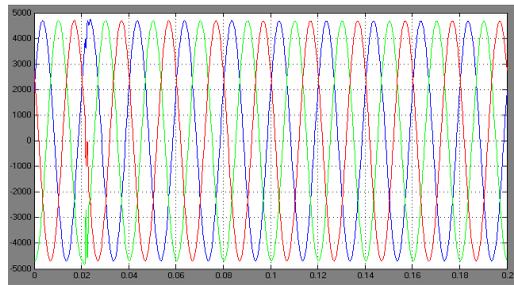


(a) Respon tegangan pada bus *MSS 2*

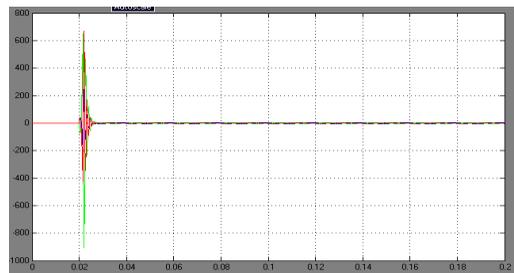


(b) Respon arus pada sisi MSS 2

Bus Capacitor 2



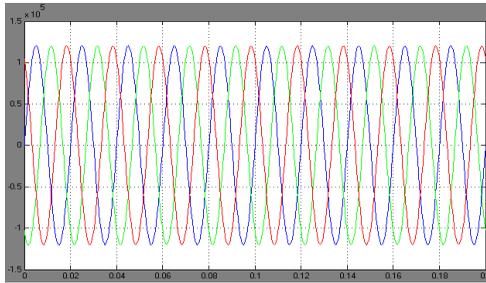
(a) Respon tegangan pada bus *Capacitor 2*



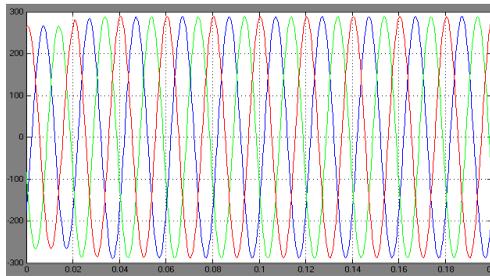
(b) Respon arus pada sisi *Capacitor 2*

V. *Pre Insertion Inductor* Pada Pengoperasian Secara *Single Bank* (18 mH - 39 ohm)

Bus 150 kV

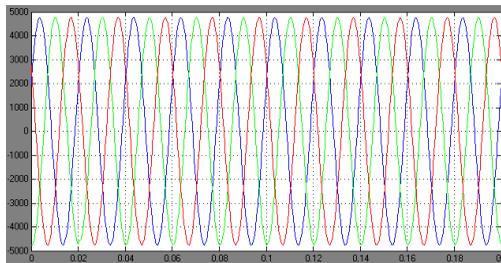


(a) Respon tegangan bus 150 kV

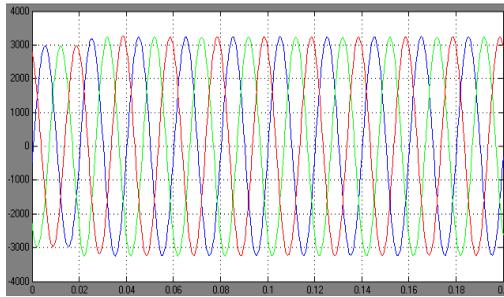


(b) Respon arus pada sisi sumber 150 kV

Bus MSS 1

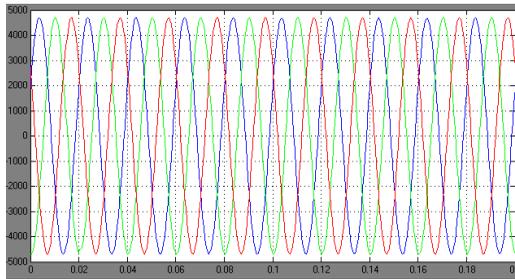


(a) Respon tegangan bus MSS 1

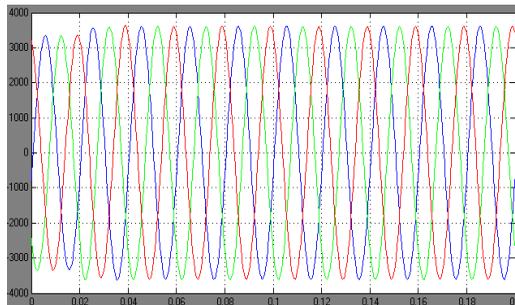


(b) Respon arus pada sisi MSS 1

Bus MSS 2

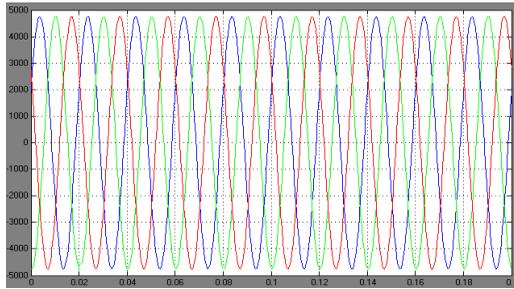


(a) Respon tegangan bus *Capacitor 2*

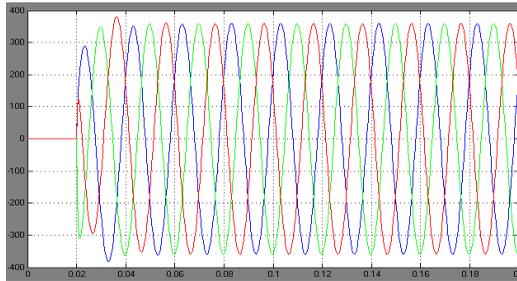


(a) Respon arus pada sisi MSS 2

Bus Capacitor 1

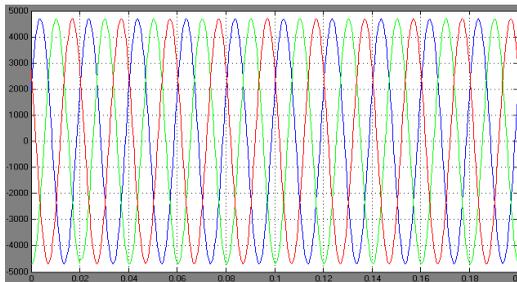


(a) Respon tegangan bus *Capacitor 1*

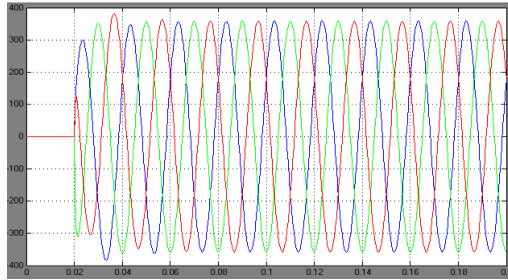


(b) Respon arus pada sisi *Capacitor 1*

Bus Capacitor 2



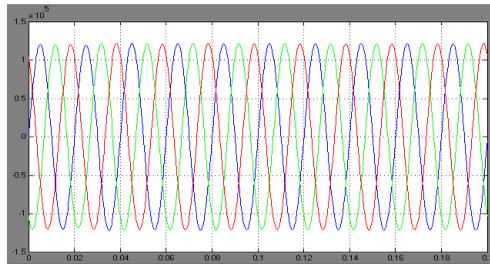
(a) Respon tegangan bus *Capacitor 2*



(b) Respon arus pada sisi *Capacitor 2*

VI. *Pre Insertion Inductor Pada Pengoperasian Secara Back To Back (10 mH - 2.4 ohm)*

Bus 150 kV

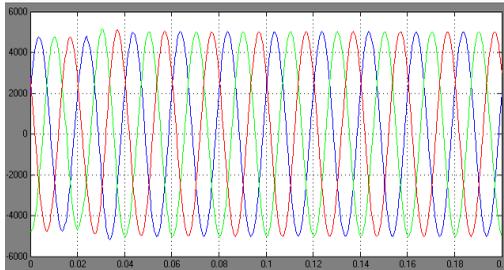


(a) Respon tegangan bus 150 kV

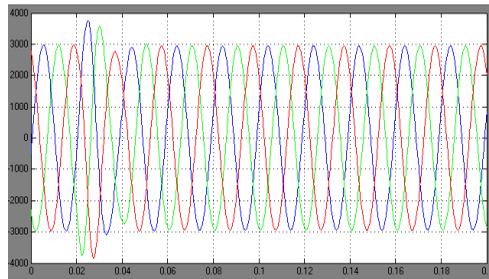


(b) Respon arus pada sisi 150 kV

Bus MSS 1

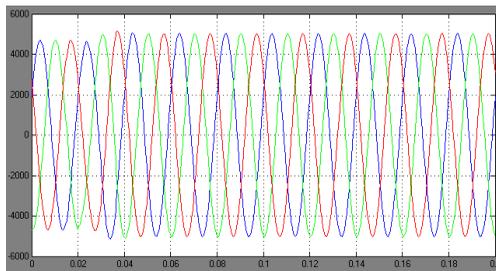


(a) Respon tegangan bus MSS 1

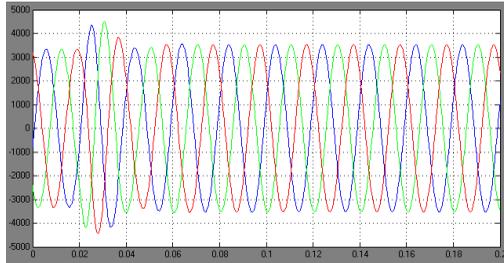


(b) Respon arus pada sisi MSS 1

Bus MSS 2

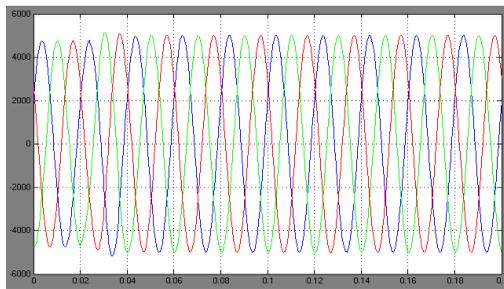


(a) Respon tegangan bus MSS 2



(b) Respon arus pada sisi MSS 2

Bus Capacitor 1

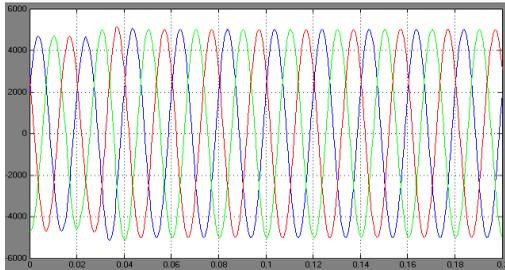


(a) Respon tegangan bus *Capacitor 1*

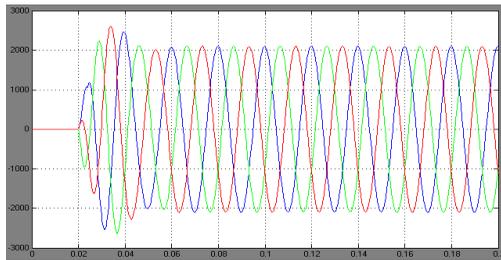


(b) Respon arus pada sisi *Capacitor 1*

Bus Capacitor 2



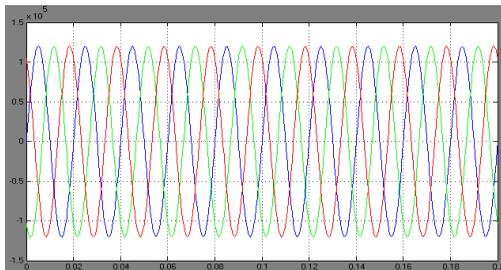
(a) Respon tegangan bus *Capacitor 2*



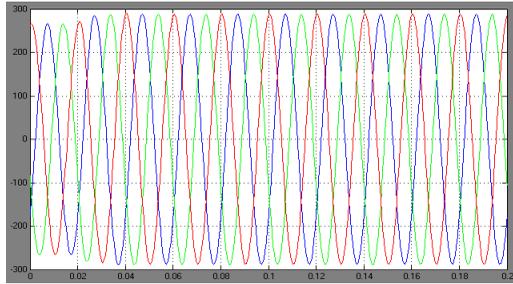
(b) Respon arus pada sisi *Capacitor 2*

VII. *Pre Insertion Inductor Pada Pengoperasian Secara Back to Back (18 mH - 39 ohm)*

Bus 150 kV

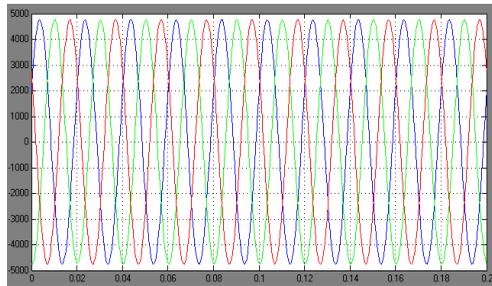


(a) Respon tegangan bus 150 kV

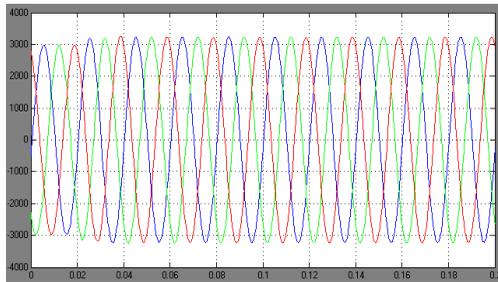


(b) Respon arus pada sisi sumber 150 kV

Bus MSS 1

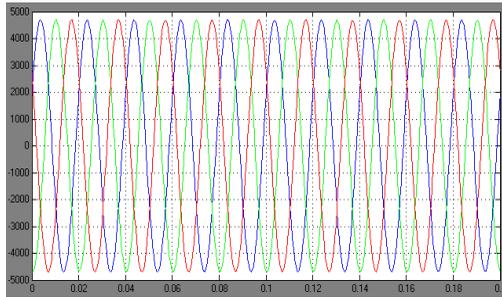


(a) Respon tegangan bus MSS 1

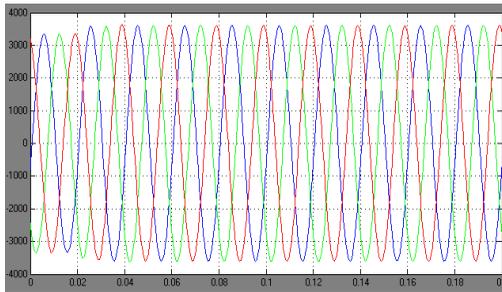


(b) Respon arus pada sisi MSS 1

Bus MSS 2

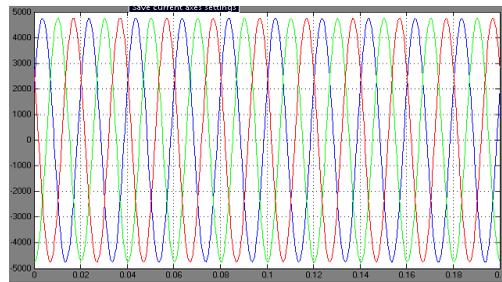


(a) Respon tegangan bus MSS 2

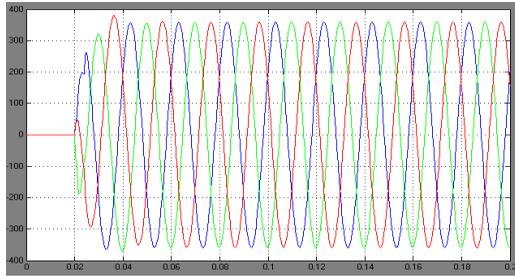


(b) Respon arus pada sisi MSS 2

Bus Capacitor 1

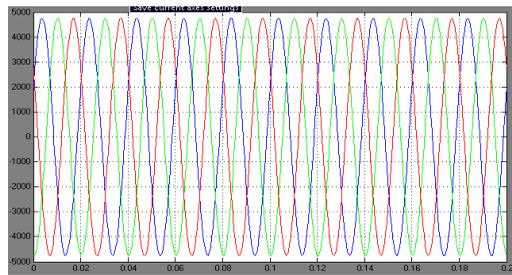


(a) Respon tegangan bus *Capacitor 1*

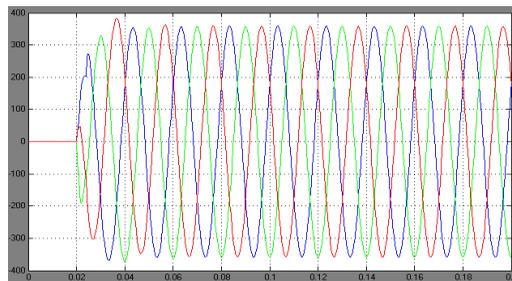


(b) Respon arus pada sisi *Capacitor 1*

Bus Capacitor 2

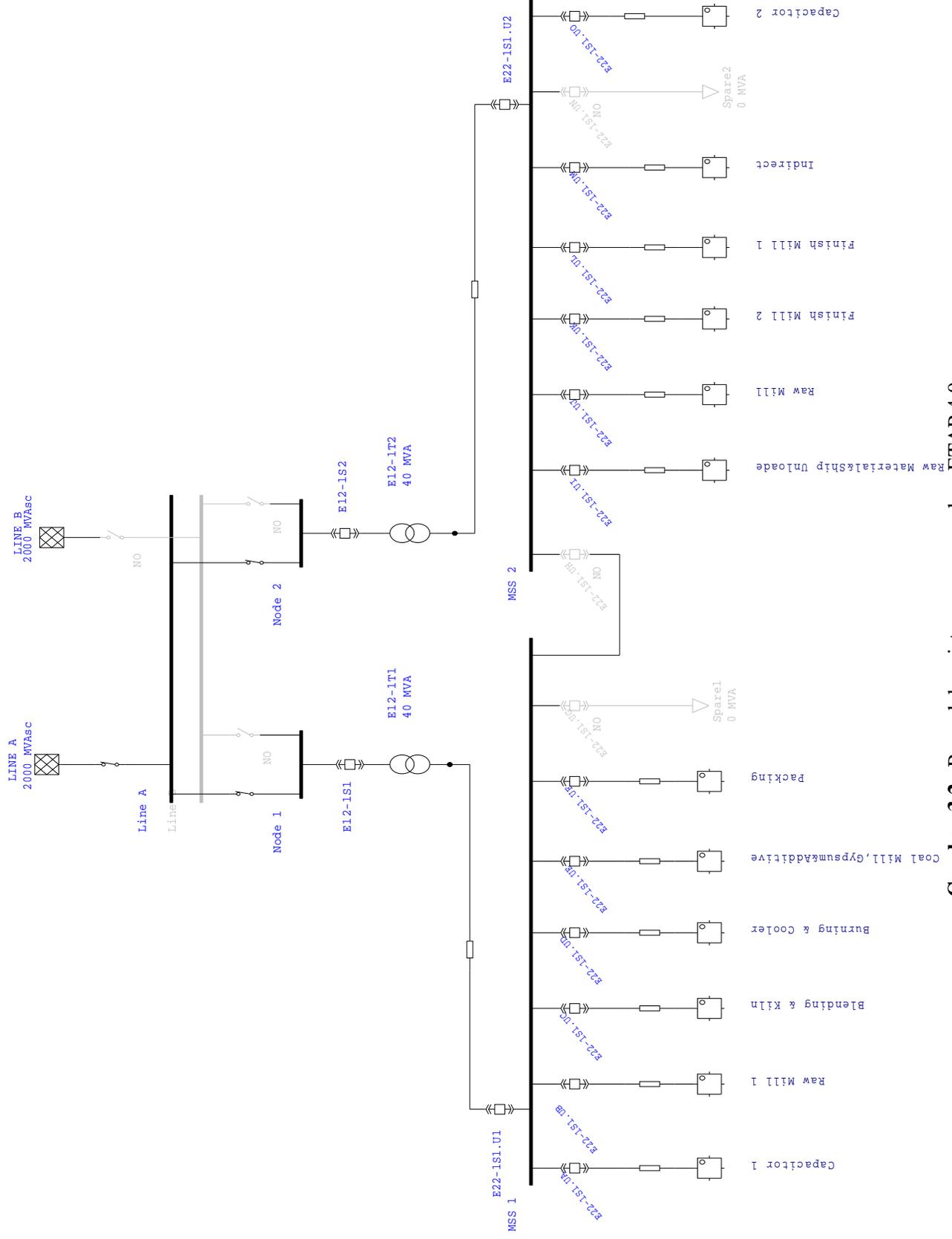


(a) Respon tegangan bus *Capacitor 2*

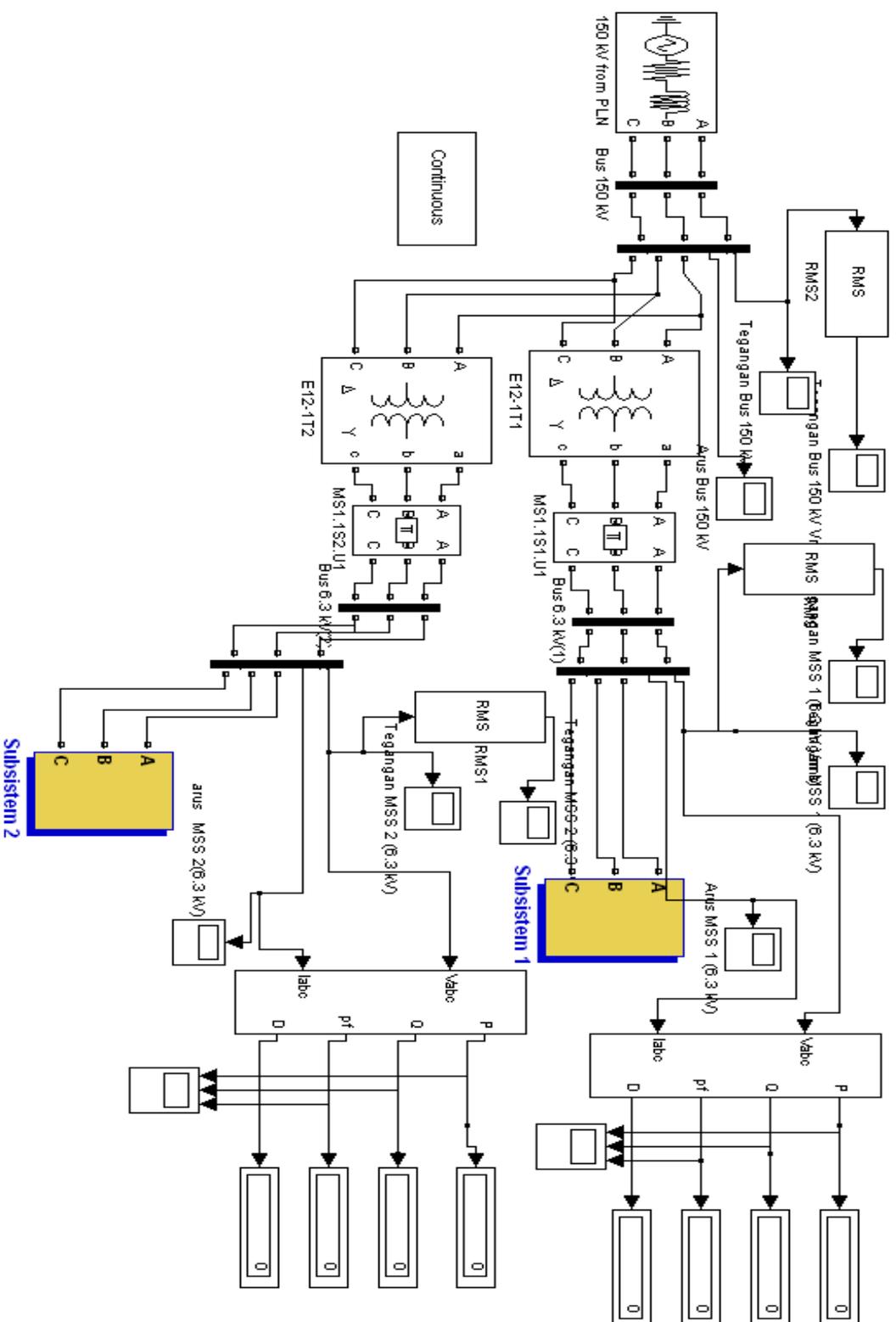


(b) Respon arus pada sisi *Capacitor 2*

===== **Halaman Ini Sengaja Dikosongkan** =====



Gambar 3.2. Pemodelan sistem menggunakan ETAP 4.0



Gambar 3.3. Pemodelan sistem menggunakan MATLAB Simulink 7.0