

**KAJIAN PENGGUNAAN SWITCHING CONTROLLER
PADA KAPASITOR TEGANGAN TINGGI**

*A STUDY ON THE USE OF SWITCHING CONTROLLER IN
HIGH VOLTAGE CAPACITOR BANK*

**SARMA THAHA
P2700211015**



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2014**

**KAJIAN PENGGUNAAN SWITCHING CONTROLLER
PADA KAPASITOR TEGANGAN TINGGI**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi

Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh:

**SARMA THAHA
P2700211015**

Kepada

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2014**

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Sarma Thaha

Nomor Mahasiswa : P2700211015

Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 28 Januari 2014

Yang menyatakan

Sarma Thaha

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah....

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan, Allah SWT. Atas segala nikmat dan petunjuk yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul "*Kajian Penggunaan SWITCHING CONTROLLER Pada Kapasitor Tegangan Tinggi*".

Tesis ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa dalam proses perkuliahan dan penyusunan tesis ini tidak terlepas dari bantuan baik materil, moral dan spiritual dari berbagai pihak. Olehnya itu, penulis ingin menghaturkan terima kasih yang sedalam – dalamnya kepada :

1. Teristimewa kedua orang tua, ketiga kakak penulis serta para keluarga yang tak henti – hentinya mendoakan dan mendukung penulis dalam segala hal.
2. Prof. Dr. Ir. H. Nadjamuddin Harun, MS selaku pembimbing I yang banyak memberikan masukan dan motivasi kepada penulis.
3. Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, MT selaku ketua Program Studi Teknik Elektro Program Pascasarjana Unhas dan sekaligus sebagai pembimbing II yang telah banyak memberikan masukan.

4. Seluruh dosen pengajar program studi Teknik Elektro Program Pasca Sarjana Universitas Hasanuddin yang telah membagi ilmunya yang berguna bagi penulis.
5. Seluruh staf administrasi program studi Teknik Elaktro Program Pasca Sarjana Universitas Hasanuddin, khususnya Bu Cia, yang tak mengenal lelah mendorong dan menghubungi penulis untuk menyelesaikan tesis ini.
6. Bapak Sonny Tanyadji, selaku pimpinan tempat saya bekerja - Sen Engineering Co – yang telah memberikan kebebasan waktu kerja selama kuliah berlangsung, masukan, dan semua dukungan yang telah diberikan sampai dengan penyelesaian tesis ini
7. Seluruh staf Sen Engineering tanpa terkecuali, terima kasih atas pengertiannya karena selama kuliah dan penulisan tesis ini tidak dapat membantu banyak dalam pekerjaan yang sedang berlangsung.
8. Seluruh staf engineering APP Bali, terima kasih atas data dan informasinya.
9. Sahabat-sahabat terbaikku (Tity dan Innah) terima kasih banyak untuk software ATP-nya, waktu, motivasinya yang tiada henti dan telah bersedia menjadi pendengar yang baik.
10. Seluruh teman seangkatan di Program Pascasarjana Teknik Elektro, khususnya Program Studi Teknik Energi, atas kebersamaannya melalui perkuliahan dari awal sampai dengan saat ini. Terima kasih

untuk selalu menjaga komunikasi dan dorongannya untuk menyelesaikan tesis ini.

11. Dan semua pihak yang mungkin penulis tidak menyadari bahwa mereka memberika bantuan secara tidak langsung dalam penulisan tesis ini.

Penulis sadar bahwa tulisan ini masih belum sempurna. Oleh karenanya kritikan dan masukan yang membangun dibutuhkan agar selanjutnya bisa lebih baik. Pada akhirnya, semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi semuanya.

Makassar, 28 Januari 2014

Penulis

Sarma Thaha

ABSTRAK

SARMA THAHA. Kajian Penggunaan *SWITCHING CONTROLLER* Pada Kapasitor Tegangan Tinggi (Dibimbing oleh **Nadjamuddin Harun** dan **Salama Manjang**)

Tujuan penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh tegangan transient dan arus transient pada high voltage capacitor bank switching dengan dan tanpa penggunaan switching controller. Pengaruhnya dikhususkan pada peralatan switching, dalam hal ini pemutus tenaga (PMT).

Data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari data primer dan data sekunder. Data primer berupa data single line diagram (sld) GI Sanur, capacitor bank, beban, spesifikasi PMT dll. Sedangkan data sekunder diperoleh melalui kajian pustaka berupa pengumpulan materi, artikel, jurnal, buku, dan laporan kerja, yang berkaitan dengan penelitian ini. Pengolahan data tersebut dilakukan dengan menggunakan bantuan Alternative Transient Program (ATP). Simulasi dibuat dalam dua kondisi. Pertama melakukan penutupan ketiga fase dari PMT secara serempak tanpa penggunaan switching controller. Kondisi kedua dilakukan secara tidak serempak melalui switching controller.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penutupan secara serempak akan menghasilkan tegangan transient dan arus transient yang tinggi, ketika penutupan kontak PMT mendekati atau tepat berada di puncak gelombang tegangan. Sedangkan switching yang dilakukan dengan controller menghasilkan transient yang tidak begitu besar di ketiga fasenya, Namun transient tertinggi yang tercapai masih berada di bawah ketahanan dari PMT.

Kata Kunci: *Switching Controller, capacitor bank, transient, PMT, ATP*

ABSTRACT

SARMA THAHA. A study of HV Capacitor SWITCHING CONTROLLER usage. (Supervised by **Nadjamuddin Harun** dan **Salama Manjang**)

The purpose of this research is to see the influence of the transient voltage and transient current during capacitor switching, with or without switching controller. In this case the research is specifically addressed to the Circuit Breaker as a switching equipment for this purpose.

The research data is base on primary and secondary data. The primary data consist of, Sanur Substation Single Line Diagram, Capacitor bank technical specification, load, CB technical specification, etc. The secondary data are obtained from literatures review of articles, journals, books, working reports and all materials which related to this research. The data processing is using Alternative Transient Program (ATP). The simulation was done in two conditions. The first condition is the 3 phase capacitors are energized simultaneously without switching controller. The second condition is the 3 phase capacitors are energized sequentially with switching controller

The simulation result shown that by 3 phase switching at the peak voltage waveform, the transient voltage and transient current will be very high. Whereas by using switching controller, those transient parameters are not so big. However these transient voltage and current which occur during switching without switching controller is lower than the CB withstand capacity.

Key words : switching controller, capacitor bank, transient, PMT, ATP.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGAJUAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN PENELITIAN	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
 BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang Masalah	1
B. Rumusan Masalah	2
C. Tujuan Penelitian	2
D. Manfaat penelitian	3
E. Cakupan Masalah	3
F. Roadmap Penelitian	4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

A.	Sejarah <i>Capacitor Bank</i>	6
B.	<i>Capacitor Bank</i>	6
C.	HV <i>Capacitor Bank</i>	9
	1. <i>Current Limiting Reactor</i>	11
	2. <i>Gas Circuit Breaker</i>	12
D.	Pengaruh Pemasangan <i>Capacitor Bank</i> pada sistem	18
E.	Tegangan <i>Transient</i>	19
F.	Harmonisa	21
G.	Metode-metode Pengontrolan <i>Capacitor Switching</i>	22
H.	<i>Switching Controller</i>	24
I.	<i>Alternative Transient Program Draw (ATPDraw)</i>	27
	1. Gambaran Singkat ATPDraw	28
	2. Komponen-komponen yang tersedia dalam ATPDraw	29
	3. Membangun Rangkaian	31

BAB III METODE PENELITIAN

A.	Rancangan Penelitian	32
B.	Waktu dan Lokasi Penelitian	32
C.	Metode Penelitian	33
D.	Metode Pengumpulan data	34
E.	Instrumen Penelitian	34

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A.	Membangun Model Simulasi	35
B.	Respon <i>Transient</i> pada <i>Capacitor Bank Switching</i>	42
	1. Respon <i>Transient</i> pada <i>Capacitor Bank Switching</i> dengan waktu penutupan PMT Serempak	42
	2. Respon <i>Transient</i> pada <i>Capacitor Bank Switching</i> dengan waktu penutupan PMT Tidak Serempak	56
C.	Pembahasan	65

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

A.	Simpulan	67
B.	Saran	67

DAFTAR PUSTAKA	68
----------------------	----

LAMPIRAN	70
----------------	----

DAFTAR GAMBAR

		Halaman
Gambar 2.1	Gambar unit Capaicitor dan Capacitor Bank	7
Gambar 2.2	<i>Capacitor bank “Wye Ungrounded”</i>	8
Gambar 2.3	Block Diagram <i>Capacitor Bay</i>	10
Gambar 2.4	<i>Potongan Samping Capacitor Bay</i>	10
Gambar 2.5	<i>150 kV Current Limiting Reactor</i>	11
Gambar 2.6	<i>Dead Tank dan Live Tank CB</i>	14
Gambar 2.7	Rangkaian Ekuivalen dua Capacitor bank pafa satu bus	17
Gambar 2.8	Switching Transient	20
Gambar 2.9	Capacitor Switching dengan <i>pre-insertion resistor</i>	23
Gambar 2.10	Diagram Prinsip Pemasangan Switching Controller	24
Gambar 2.11	Skema Operasi Capacitor Switching Controller	25
Gambar 2.12	Switchsynch™ Controller F236 (Ex ABB) yang terpasang di GI Sanur	25
Gambar 2.13	Prinsip dasar pengontrolan <i>energizing</i> suatu <i>capacitor bank</i> dengan menggunakan <i>single pole operated</i>	26
Gambar 2.14	Prinsip dasar pengontrolan <i>de-energizing</i> suatu <i>capacitor bank</i> dengan menggunakan <i>single pole</i>	27
Gambar 2.15	Komponen-komponen ATP Draw	30
Gambar 4.1	SLD GI Sanur	36
Gambar 4.2	Model dan tampilan data sumber 3 fase (Ac3ph)..	36

Gambar 4.3	Model dan tampilan data impedansi sumber 3 fase (RLC3)	37
Gambar 4.4	Model dan tampilan data mewakili beban 20 kV(RLC3)	39
Gambar 4.5	Model dan tampilan data mewakili transformator 150/20 kV	39
Gambar 4.6	Model dan tampilan data induktor satu fase mewakili reactor	40
Gambar 4.7	SLD 150 kV Capacitor Bank 25 MVAR - GI Sanur	41
Gambar 4.8	Model ATP untuk Voltmeter dan Amperemeter	41
Gambar 4.9	Model ATP untuk Sistem GI Sanur	42
Gambar 4.10	Gelombang Tegangan Fase R	43
Gambar 4.11	Tegangan Transient fase R dengan $T_c = 0.0400$ s	44
Gambar 4.12	Arus Transient fase R dengan $T_c = 0.0400$ s	45
Gambar 4.13	Tegangan Transient fase S dengan $T_c = 0.0400$ s	46
Gambar 4.14	Arus Transient fase S dengan $T_c = 0.0400$ s	47
Gambar 4.15	Tegangan Transient fase T dengan $T_c = 0.0400$ s	48
Gambar 4.16	Arus Transient fase T dengan $T_c = 0.0400$ s	49
Gambar 4.17	Tegangan Transient fase R dengan $T_c = 0.0249$ s	50
Gambar 4.18	Arus Transient fase R dengan $T_c = 0.0249$ s	51
Gambar 4.19	Tegangan Transient fase S dengan $T_c = 0.0249$ s	52
Gambar 4.20	Arus Transient fase S dengan $T_c = 0.0249$ s	53
Gambar 4.21	Tegangan Transient fase T dengan $T_c = 0.0249$ s	54
Gambar 4.22	Arus Transient fase T dengan $T_c = 0.0249$ s	55

Gambar 4.23	Rangkaian pengetesan kaktu kerja <i>switching controller</i>	57
Gambar 4.24	Hasil pengetesan waktu penutupan Controller F236 – Ex ABB	58
Gambar 4.25	Tegangan Transient fase R dengan $T_c = 0.1639$ s	59
Gambar 4.26	Arus Transient fase R dengan $T_c = 0.1639$ s	60
Gambar 4.27	Tegangan Transient fase S dengan $T_c = 0.1687$ s	61
Gambar 4.28	Arus Transient fase S dengan $T_c = 0.1687$ s	62
Gambar 4.29	Tegangan Transient fase T dengan $T_c = 0.1639$ s	63
Gambar 4.30	Arus Transient fase T dengan $T_c = 0.1630$ s	64

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 CB Voltage Rating berdasarkan ANSI dan IEC	12
Tabel 2.2 Data Name Plate PMT 150 kV Capacitor bay II – GI Sanur.....	18
Tabel 4.1 Kapasitas dan Beabn Transformator Terpasang di Gi Sanur ..	37
Tabel 4.2 Nilai R dan L Beban	38
Tabel 4.3 Hasil Simulasi Penutupan PMT Serempak	56
Tabel 4.4 Hasil Simulasi Penutupan PMT Tak Serempak	64

DAFTAR LAMPIRAN

Single Line Diagram GI Sanur

BAB I

PENDAHULUAN

A. LATAR BELAKANG MASALAH

Seiring dengan perkembangan sistem tenaga listrik, khususnya di Indonesia, maka sistem juga menjadi kompleks dan memunculkan beberapa permasalahan yang harus diatasi yakni penurunan tegangan sistem di luar batas yang diizinkan. Salah satu cara yang dilakukan untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan pemasangan *capacitor bank*.

Namun penambahan *capacitor bank* juga menimbulkan masalah baru pada saat *capacitor switching*, yakni *transient overcurrent* dan *transient overvoltage* yang boleh jadi merusak peralatan sistem. Oleh karenanya dikembangkan berbagai teknologi untuk mengatasi hal ini. Ada beberapa cara yang digunakan untuk meredam *transient* tersebut, antara lain pemasangan *induktor (reactor)*, pemasangan *pre insertion*, *switching controller*, dll.

Di Indonesia, dalam hal ini sistem kelistrikan PLN, ada pola *capacitor switching* yang berbeda antara wilayah PLN. Pada PLN Wilayah Jawa Bali dan Sumatera digunakan *Switching Controller* meskipun telah dilengkapi dengan *reactor*, sebagai *limiting current transient*, dikenal juga dengan istilah *Point on Wave Controller*,

sementara wilayah lain tidak menggunakan switching controller tetapi hanya melengkapi capacitor bank dengan reactor.

Karena latar belakang tersebut, penulis tertarik untuk meneliti tentang perlu tidaknya penambahan *switching controller* pada *capacitor bank* yang telah dilengkapi dengan *reactor* pada *bay-nya*.

B. RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

Melakukan pengukuran besar tegangan transient dan arus transient yang terjadi pada *hv capacitor bank switching* yang dilengkapi *reactor* dengan tanpa *switching controller* dan kondisi lainnya adalah dengan menggunakan *switching controller*.

C. TUJUAN PENELITIAN

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan penelitian ini adalah:

Mengukur hasil *hv capacitor bank switching* untuk kondisi tanpa switching controller dan dengan switching controller dan membandingkan hasil keduanya untuk menentukan perlu tidaknya penggunaan *switching controller* pada *hv capacitor bank switching* yang telah dilengkapi *reactor*.

D. MANFAAT PENELITIAN

Jika pengaruh *transient* dari *hv capacitor switching* tanpa menggunakan *switching controller* masih di bawah ketahanan peralatan maka PLN tidak perlu memasang *controller* tersebut. Hasilnya PLN dapat menghemat biaya investasi untuk *switching controller* pada setiap pemasangan *bay capacitor* yang harganya mencapai sekitar se per tiga (1/3) harga CB.

E. CAKUPAN MASALAH

HV capacitor bank adalah sekelompok *hv capacitor unit* yang dirangkai secara seri dan parallel untuk mencapai tegangan nominal dan kVAR tertentu. HV capacitor bank yang akan dimasukkan ke sistem (*switching*) akan menimbulkan transient tegangan dan transient arus, akibat adanya perbedaan tegangan antara sistem dan pada terminal capacitor bank. Transient adalah perubahan suatu besaran (tegangan atau arus) secara tiba-tiba yang dapat terjadi pada kondisi switching ataupun ketika terjadi gangguan pada sistem.

Dalam penelitian ini, pengukuran *transient* hanya pada kondisi *energizing hv capacitor bank*. *Energizing* tersebut dilakukan pada *capacitor bank* yang diserikan dengan reaktor dengan dua kondisi yaitu dengan atau tanpa *switching controller*. Reaktor adalah suatu induktor dengan nilai tertentu yang dipasang seri dengan hv capacitor untuk mengurangi efek *transient* pada saat *switching*. Demikian pula

switching controller, merupakan alat control untuk mengatur penutupan kontak-kontak PMT agar tidak menutup tepat di puncak gelombang tegangan di semua fase-nya, sehingga transient yang terjadi dapat dibatasi.

F. ROADMAP PENELITIAN

Pada dasarnya telah banyak yang menuliskan tentang pengaruh *Capacitor switching* dari berbagai sudut pandangan. Seperti menganalisa tentang metode-metode *switching* untuk mengurangi *transient voltage* dan *transient current*, menganalisa efek *transient* yang dihasilkan dari proses *switching* terhadap peralatan *switching* itu sendiri, dan lainnya. Dalam analisisnya, ada yang menggunakan alat bantu *software MATLAB SIMULINK* dan tidak sedikit juga yang menggunakan *EMTP – ATPDraw*.

Berikut secara ringkas, penelitian-penelitian terdahulu menyangkut *capacitor switching*:

1. *The Impact of Switching Capacitor Banks with Very High Inrush Current on Switchgear (KEMA TIC and Schneider Electric, Study Committee A3, Preferential Subject 2 – 2012)*⁽¹⁾. Suatu tulisan tentang *switching single capacitor bank* dan kondisi *back to back switching – switching capacitor bank* dimana pada bus yang sama telah ada *capacitor bank* yang sedang beroperasi – dan bagaimana pengaruhnya terhadap peralatan *switching* (PMT).

2. *Capacitor Banks Switching Transient in Power System* (Shehab Abdulwadood Ali, 2011) ⁽²⁾. Studi tentang *transient* pada *capacitor bank switching* dan efeknya terhadap peralatan sistem distribusi. Simulasinya menggunakan program *Alternative Transient Program (ATP)*.
3. *Capacitor Switching Transient Modeling and Analysis on An Electrical Utility Distribution System Using Simulink Software* (Durga Bhavani Mupparty, 2011) ⁽³⁾. Menganalisa gelombang arus dan tegangan pada saat *switching capacitor* dengan dan tanpa *switching controller*. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan *MATLAB SIMULINK*.
4. *Control of Shunt Capacitors and Shunt Reactors Energization Transients* (C. D. Tsirekis and N. D Hatziangyriou; *International Conference on Power System Transient – 2003*)⁽⁴⁾. Penelitian ini memperlihatkan bagaimana penggunaan *controlled switching* pada *energizing reactor* dan *capacitor*.

BAB II

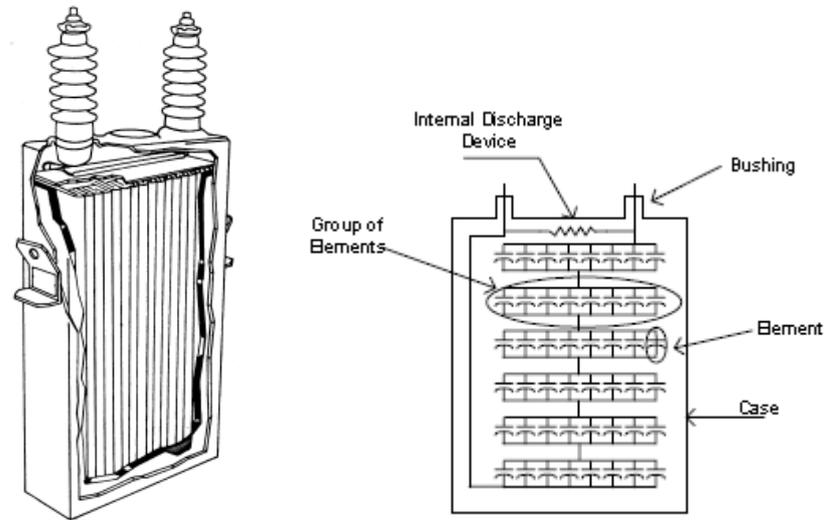
TINJAUAN PUSTAKA

A. Sejarah Capacitor Bank

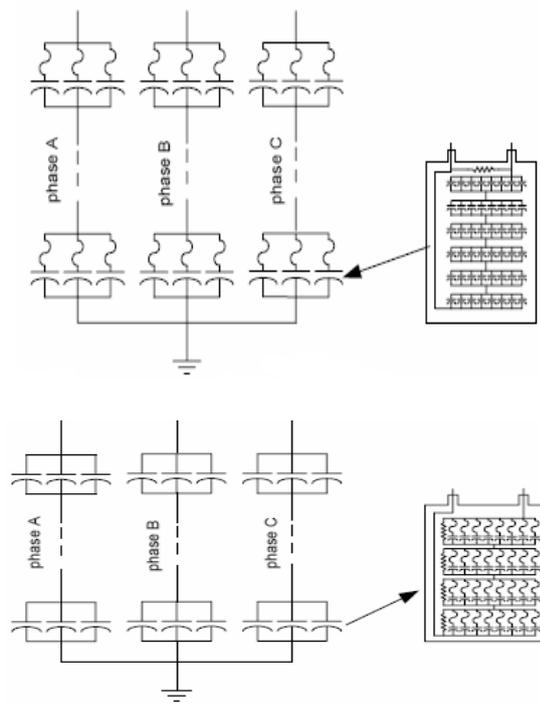
Penggunaan pertama kali, pada sekitar tahun 1914 , *capacitor bank* bertujuan untuk memperbaiki *power factor*. Selanjutnya hal ini bertahan selama 22 tahun oleh karena faktor harga yang mahal, ukuran dan berat yang besar. Sebelum tahun 1937, aplikasi *capacitor bank* masih di dalam ruangan (*indoor*) sampai dengan ditemukannya unit kapasitor untuk aplikasi luar ruangan. Dan mulai tahun 1939 sampai dengan saat ini, aplikasi kapasitor pada sistem tenaga listrik semakin berkembang seiring dengan harga yang lebih murah serta ukuran dan berat yang juga berkurang⁽⁵⁾.

B. Capacitor Bank

Capacitor bank adalah sekelompok unit kapasitor dengan *rating* tegangan dan *rating* kVAR tertentu yang diserikan dan atau diparalelkan untuk mencapai tegangan sistem dimana mereka akan dipasang serta mendapatkan jumlah kVAR sesuai kebutuhan. Gambar 2.2 memperlihatkan *capacitor bank diagram*.



(a)



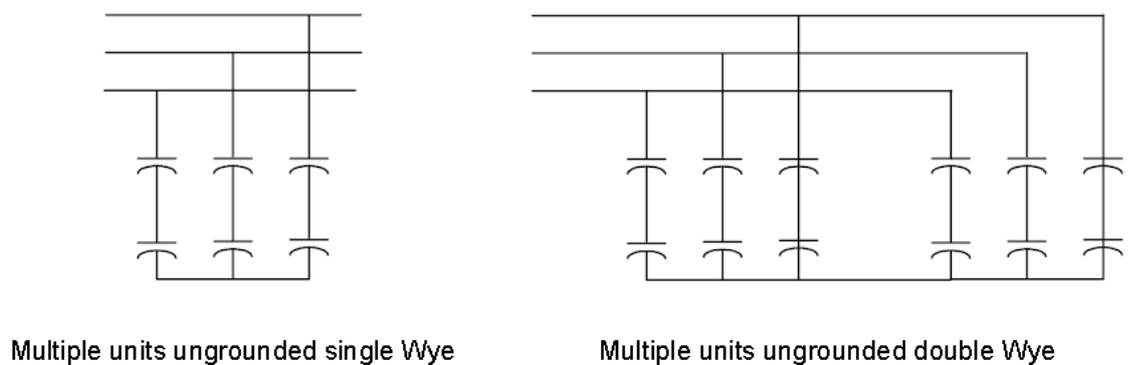
(b)

Gambar 2.1

(a) Suatu unit *Capasitor*(b) *Externally Fused* dan *Internally Fused Capacitor Bank*

Capacitor Bank kapasitas besar dapat dihubungkan bintang (Y) tidak ditanahkan (*wye ungrounded*), Y ditanahkan (*wye grounded*) atau pun delta Δ . Namun *wye ungrounded* lebih baik dibanding dua koneksi lainnya jika dilihat dari sudut proteksi⁶. Selain itu *Wye ungrounded* tidak dapat menimbulkan arus urutan nol karena tidak ada jalur ke tanah. Gambar 2.2 menunjukkan diagram suatu *capacitor bank* yang dihubungkan *wye ungrounded*.

Proteksi pada *capacitor bank* bertujuan untuk memisahkan *capacitor bank* dari sistem jika ada sebuah atau beberapa unit kapasitor mengalami kegagalan sehingga menyebabkan ketidakseimbangan kVAR pada ketiga fasa *Capacitor bank*.



Gambar 2.2. Diagram *Capacitor bank* “*Wye Ungrounded*”

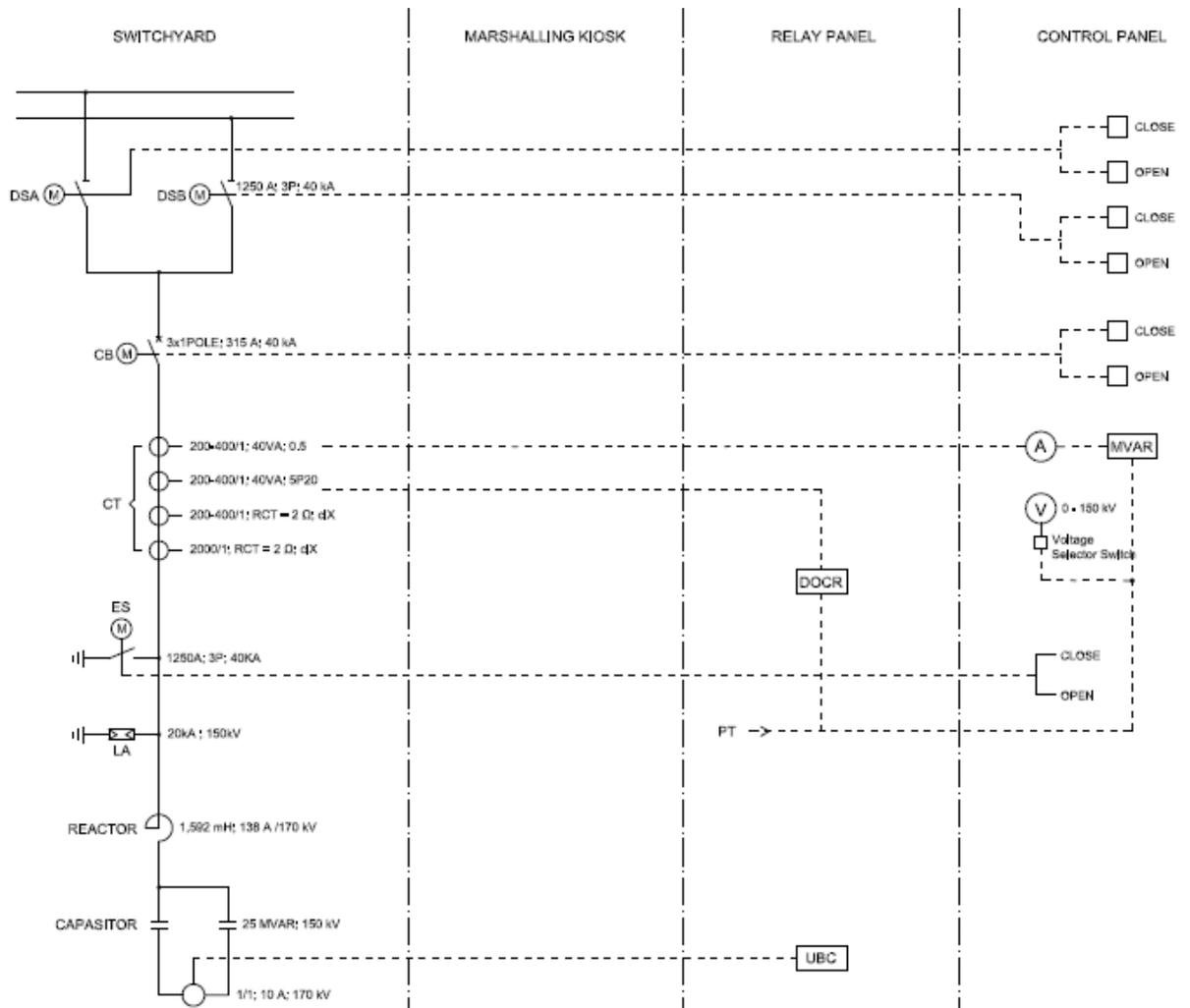
Shunt capacitor telah terpasang di sejumlah gardu induk dan di penyulang-penyulang (*feeders*) distribusi dengan kapasitas bank bervariasi. Suatu *capacitor bank* dapat di-*switch* sekaligus ke dalam sistem dan adapula dilakukan secara bertahap sesuai kebutuhan sistem.

C. HV Capacitor Bay

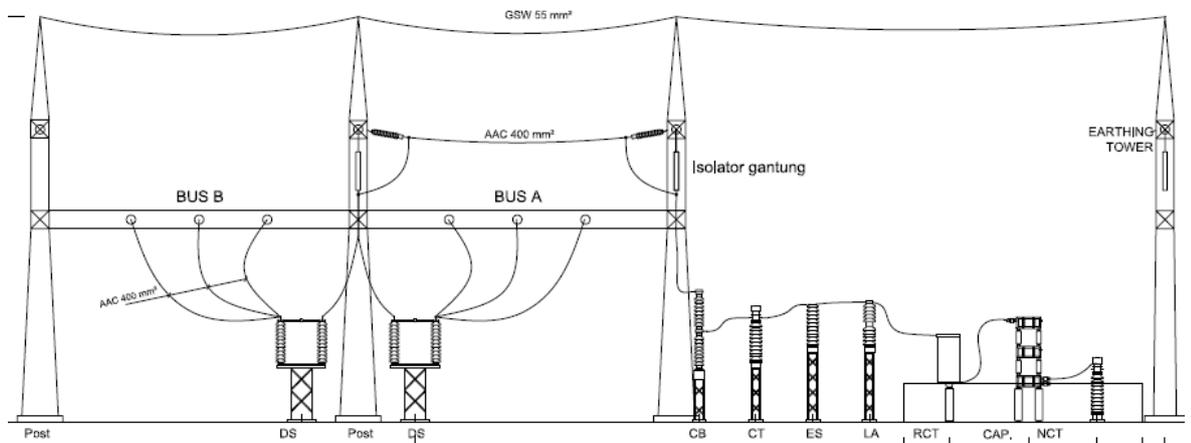
Suatu *HV Capacitor bay* adalah seperangkat peralatan di gardu induk untuk switching dan proteksi sejumlah capacitor unit (*capacitor bank*).

Pada umumnya terdiri dari:

- *Capacitor Bank*, sejumlah unit kapasitor untuk menyuplai VAR ke sistem yang bertujuan seperti pembahasan sebelumnya.
- *Current Limiting Reactor*, adalah *reactor* yang bertujuan untuk membatasi *transient current* pada saat *switching*.
- *Surge Protection Device*, untuk melindungi peralatan di *capacitor bay* dari segala bentuk *overvoltage*, baik itu *switching overvoltage* maupun *lightning overvoltage*.
- *Earthing Switch*, untuk *discharge current* pada saat *capacitor* dilepas dari sistem, meskipun kenyataannya saat ini setiap unit kapasitor telah memiliki *internal discharging*.
- *Current Transformer* adalah *instrument transformer* yang memberikan parameter arus baik bagi peralatan proteksi maupun pengukuran.
- *Circuit Breaker (CB)* adalah peralatan *switching* atau dikenal sebagai pemutus tenaga (PMT) yang dapat difungsikan baik berbeban maupun tidak berbeban.
- *Disconnecting Switch* atau disebut juga sebagai pemisah (PMT) untuk memisahkan rangkaian dalam keadaan tidak berbeban.



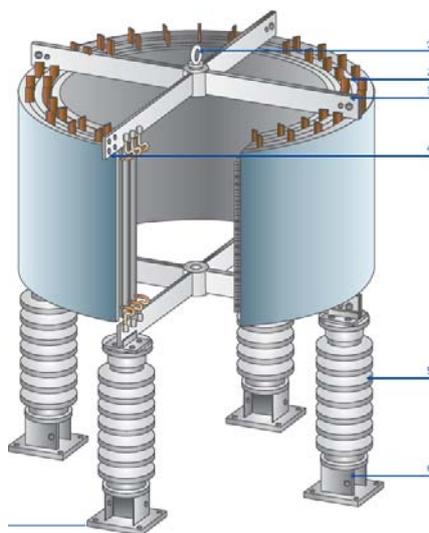
Gambar 2.3. Blok Diagram Capacitor Bay



Gambar 2.4. Potongan samping Capacitor Bay

1. *Current Limiting Reactor*

Induktor dan kapasitor biasa digunakan di gardu-gardu induk maupun saluran transmisi. Salah satu contoh penggunaan induktor adalah *current limiting reactor*. Reaktor jenis ini dihubungkan seri dengan saluran transmisi atau *feeder*. Hal ini bertujuan untuk membatasi arus pada saat sistem mengalami gangguan ⁽⁷⁾ ⁽⁸⁾.



1. Lifting Lug
2. Spacers (cooling ducts)
3. Crossarms
4. Terminal
5. Insulator
6. Extension brackets

Gambar 2.5 150 kV Current Limiting Reactor
(GI Nusa Dua)

Pada penggunaan *current limiting reactor* di *capacitor bank*, reaktor diserikan dengan *capacitor bank*, dimaksudkan untuk membatasi *inrush current* pada saat *switching*. Reaktor dapat dipasang pada sistem sampai dengan 765 kV ⁽⁷⁾.

2. Gas Circuit Breaker

Circuit breaker (CB) atau pemutus tenaga (PMT) adalah peralatan mekanis yang memiliki kemampuan untuk menghantarkan atau memutuskan aliran arus baik dalam kondisi normal ataupun kondisi tidak normal. PMT dapat diklasifikasikan berdasarkan tegangan kerja, beban switching (*switching duty*), lokasi pemasangan dan media pemutusannya (*interruption medium*).

II.1 Klasifikasi PMT

Berdasarkan tegangan kerja, maka pada *industry standard*, PMT dibagi menjadi di bawah 72.5 kV dan di atas 121 kV⁽⁶⁾. Untuk klasifikasi berdasarkan bebannya, maka terdapat PMT untuk beban resistif, induktif dan kapasitif. Sedangkan berdasarkan lokasi pemasangannya dibagi menjadi PMT untuk pemasangan dalam ruangan (*indoor CB*) dan di luar ruangan (*outdoor CB*). *Outdoor CB* dibagi lagi menjadi *dead tank CB* dan *live tank CB*.

Tabel 2.1
CB Voltage Rating berdasarkan ANSI dan IEC

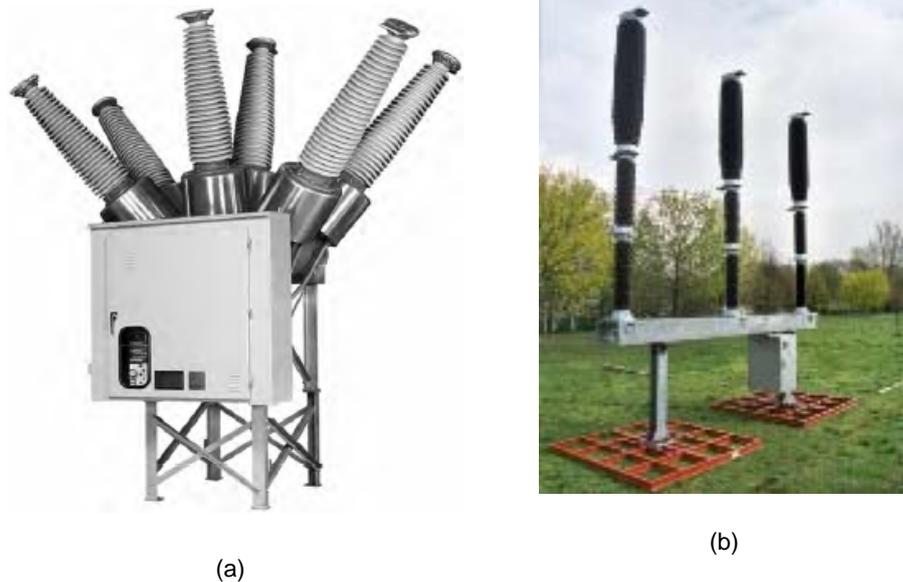
Di bawah 72.5 kV										
ANSI	4.76	8.25	15.0	15.5	25.8	38.0	48.3	72.5		
IEC	3.6	7.2	12.0	17.5	24.0	36.0	52.0	72.5		
Di Atas 72.5 kV										
ANSI	-	121	145	169	242	-	362	-	550	800
IEC	100	123	145	170	245	300	362	420	525	800

Dead tank CB pada umumnya terpasang pada sistem di Amerika Serikat ⁽⁶⁾, dengan *standard ANSI (American National Standard Institute)* yang menyatakan keuntungan *dead tank* dibandingkan *live tank* adalah:

- Memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap cuaca
- Lebih aman karena dirakit dipabrik
- Input dan output bushing yang terpisah memudahkan pemasangan CT untuk pengukuran.

Sedangkan *Live Tank CB* pada umumnya digunakan oleh Negara-negara yang mengacu pada *standard IEC (International Electrotechnical Commission)* ⁽⁶⁾, dengan pertimbangan bahwa:

- Lebih murah dan ukuran CB lebih kecil
- Tidak membutuhkan tempat yang luas dan lebih mudah pemasangannya.
- Membutuhkan media isolasi yang lebih sedikit dibandingkan *dead tank CB*.



Gambar 2.6
 (a) *Dead Tank CB*
 (b). *Live Tank CB*

Bila dilihat dari media pemutusnya (*interrupting medium*), maka terdapat *air CB* (ACB) , *Oil CB*, *Vacuum CB* (VCB) dan *SF6 CB/ Gas CB* (GCB).

SF6 CB cukup banyak populasi di Indonesia (khususnya PLN), hal ini dikarenakan:

- Gas SF6 tergolong stabil
- Tidak berbau dan tidak beracun
- Tidak mudah terbakar
- Memiliki kekuatan dielectric (*dielectric strength*) yang tinggi

II.2 Rating PMT (*Circuit Breaker Rating*)

PMT memiliki kemampuan untuk menghantarkan arus sesuai dengan rating-nya (*nominal*) pada tegangan kerjanya. Dan pada saat terjadi

hubung singkat, PMT harus mampu membuka untuk mengisolasi gangguan hubung singkat tersebut. Jadi PMT memiliki kemampuan dilalui arus hubung singkat selama selang waktu tertentu (singkat) sebelum gangguan dilepas. Beberapa parameter yang dimiliki oleh PMT, antara lain:

a. Rating Tegangan (*Rated Voltage*)

Tegangan nominal PMT dinyatakan dalam tegangan tiga fase dan tegangan fase-fase (*line to line voltage*). Selain itu dicantumkan tegangan maksimal yang tidak boleh dilampaui. Tegangan nominal tersebut untuk pengoperasian CB dengan ketinggian sampai dengan 1000 m di atas permukaan laut (dpl) ⁽⁶⁾. Di atas nilai tersebut maka tegangan nominal PMT akan menurun.

b. Rating Arus (*Rated Current*)

Arus nominal dari PMT dinyatakan dalam nilai rms, yang menunjukkan kemampuan PMT untuk menghantarkan arus tersebut secara terus menerus pada nominal arus dan frekuensinya (50 Hz atau 60 Hz).

c. Rating Arus hubung Singkat (*Rated Short Circuit Current*)

Rating ini menunjukkan nilai arus hubung singkat (rms) yang dapat ditahan oleh PMT.

d. Waktu Pemutusan (*Rated Interrupting Time*)

Merupakan waktu maksimum yang diizinkan dimulai dari *energize*-nya rangkaian *trip* pada tegangan kontrolnya sampai dengan membukanya pole PMT untuk memutuskan arus hubung singkat.

II.3 PMT untuk *Capacitor Switching*

Switching peralatan ataupun beban beban reaktif, seperti *capacitor banks* dan *shunt reactor*, dapat menghasilkan *transient overvoltages* yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi dan kecenderungan gangguan pada sistem.

PMT untuk *capacitor switching* membutuhkan tambahan kemampuan ketahanan dibandingkan PMT normal. Berikut beberapa hal yang menjadi pertimbangannya⁽⁶⁾:

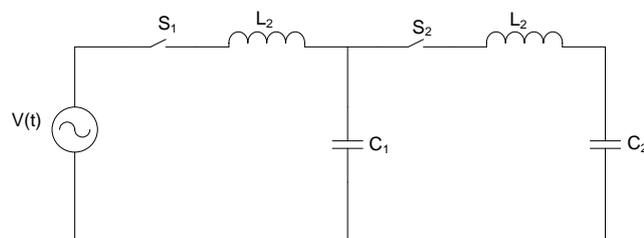
- Rating tegangan (*Voltage rating*), faktor kali 1.1 dapat diberlakukan karena tegangan bisa naik 10% di atas rating yang tercantum di *nameplate*.
- Toleransi kapasitor (*capacitor tolerance*), faktor kali 1.05 – 1.15 dari arus nominal dapat dibuat sebagai dasar untuk toleransi pabrikan.
- Arus harmonisa (*harmonic current*). *Capacitor bank* dapat menimbulkan arus harmonisa. Faktor kali 1.1 diberikan untuk *capacitor bank* yang ditanahkan (*ungrounded*) dan 1.05 untuk yang tidak ditanahkan. Namun jika tidak ada informasi yang cukup dari

capacitor bank-nya, maka faktor kali 1.25 dan 1.35 dapat diberlakukan berturut-turut untuk *ungrounded system* dan *grounded system*.

- *Back-to-Back Capacitor Banks Switching*

Inrush current suatu *capacitor bank* akan meningkat ketika ada *capacitor bank* telah beroperasi pada bus yang sama, gambar 2.8.

Kondisi *back-to-back capacitor bank switching* adalah jika saklar atau PMT S_2 ditutup sementara C_1 telah terhubung ke sistem sebelumnya. *Transient current* akan lebih banyak mengalir ke *capacitor bank* yang telah lebih dahulu terhubung ke sistem, sehingga PMT akan merasakan transient arus yang sangat besar. *Back-to-back capacitor switching* lebih memberikan tekanan kepada PMT daripada ke sistem⁽¹⁾.



Gambar 2.7 Rangkain ekuivalen dua capacitor bank pada satu bus.

II.4 PMT yang terpasang

Berikut adalah tabel *nameplate* dari CB yang terpasang (ex ABB).

Tabel 2.2

Name Plate 150kV CB (ex ABB) – GI Sanur

ABB		Contains fluorinated greenhouse gases covered by the Kyoto Protocol		C E	
				Made in Sweden	
Circuit-breaker type	LTB 17001/B	Operating device type	FSA1		
No.	1HSB01235046	No.	1HSB01235046-B1		
Order No.	KD2000353/10	Year of manufacture	2012		
Voltage	170 kV	Standard	IEC 62271-100		
Insulation level at altitude	≤ 1000 m	To earth	Across open pole		
lightning impulse withstand voltage		750 kV	750 kV		
switching impulse withstand voltage		- kV	- kV		
power frequency withstand voltage		325 kV	325 kV		
Frequency	50 Hz	Max. working pressure	080 Mpa (gauge)		
Nominal current	3150 A	Gas pressure (+ 20°C)			
Short-circuit breaking current	40 kA	Filling	0.70 SF6	Mpa (abs)	
DC component	43%	Alarm	0.62	Mpa (abs)	
First pole-to-clear factor	15	Blocking	0.60	Mpa (abs)	
Making current	100 kA	Volume per pole	74	l	
Short-time withstand current 3 s	40 kA	Mass of gas	11	kg	
		Mass total	2075	kg	
Line-charging breaking current	61 A	Operating Sequence	0-0.3s-CO-3min-CO		
Classification	M	Temperature Class	30 °C		

D. Pengaruh Pemasangan Capacitor Bank pada sistem

Pemasangan *Capasitor bank* pada suatu *Power system* dapat memberikan beberapa pengaruh kepada sistem ^{(3) (5) (6)}, yakni:

- Meningkatkan tegangan sistem
- Memperbaiki regulasi tegangan
- Menurunkan rugi-rugi daya I^2R karena dapat mengurangi besar arus yang ditransmisikan.
- Memperbaiki power factor
- Menurunkan beban kVA dari pembangkit atau meurunkan permintaan beban kVA

Shunt Capacitor dapat mempengaruhi semua peralatan listrik dan rangkaian di sisi sumber dimana *shunt capacitor* dipasang, terutama dalam ukuran kVAR yang besar. Dimana dia dapat mempengaruhi masing-masing bagian sistem termasuk diantaranya pembangkit.

Besaran kVAR yang diperlukan dalam sistem dipengaruhi oleh peningkatan *lagging* kVAR (beban induktif) akibat arus ekstasi dari transformator dan motor-motor yang ada dalam sistem. Kondisi *lagging* kVAR ini yang menyebabkan dibutuhkananya *capacitor bank* yang dapat memperbaiki power factor.

Proses *switching* dari *shunt capacitor bank* pada gardu induk ataupun pada feeder distribusi pada dasarnya adalah kondisi normal pada suatu sistem tenaga listrik. Meskipun kenyataannya dapat menghasilkan *transient current* dan *transient voltage* pada sistem tenaga listrik. *Transient* ini dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan jika besarnya melampaui ketahanan peralatan atau sebaliknya.

Adanya kondisi *transient* pada proses *capacitor bank switching* ini, menjadi tantangan tersendiri bagi para engineer untuk mengontrol atau membatasi besarnya *transient current* dan *transient voltage*.

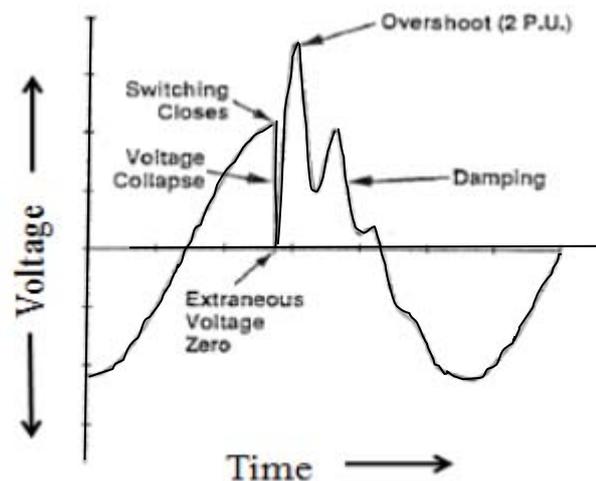
E. Tegangan Transient

Berdasarkan IEEE 1100-1999, *transient* didefinisikan sebagai:

Suatu gangguan pada gelombang bolak-balik selama sub-siklus yang dapat terlihat dalam bentuk yang tajam dan diskontinuitas dalam waktu singkat.

(A sub-cycle disturbance in the AC waveform that is evidenced by sharp, brief discontinuity of the waveform)⁽³⁾.

Transient merupakan perubahan yang terjadi tiba-tiba, ketika *switch* membuka dan menutup atau ketika terjadi gangguan pada sistem. *Capacitor switching* merupakan kondisi normal pada sistem dan *transient* yang timbul umumnya bukan suatu masalah bagi peralatan, selama besaran puncaknya masih berada di bawah *level surge protection, surge protection* (1.8pu atau di atasnya)⁽³⁾.



Gambar 2.8 Switching Transient

Puncak tegangan dari transient tergantung dari titik dimana *capacitor switching* terjadi, kondisi terburuk bisa mencapai 2 kali lebih besar dari tegangan puncak normal. Namun besaran ini biasanya lebih kecil karena adanya elemen resistif dari sistem.

F. Harmonisa

Pengaliran daya reaktif pada sistem dapat berkurang dengan pemasangan *capacitor bank*. Untuk mencapai hasil optimum, pemasangan *capacitor bank* disarankan sedekat mungkin dengan beban⁽³⁾. Namun pilihan ini tidak begitu baik, karena adanya interaksi antara harmonisa dan kapasitor, sehingga akan mengganggu beban-beban yang berada di dekatnya.

Gangguan harmonisa tegangan dan arus ini disebabkan adanya beban-beban non-linear dan peralatan pada sistem daya listrik. Peralatan elektronik adalah penyebab utama dari distorsi harmonisa⁽³⁾. Namun *arcing* peralatan sistem daya listrik juga menjadi penyumbang munculnya harmonisa. Beban-beban tersebut menghasilkan arus tidak sinusoidal yang selanjutnya mempengaruhi impedansi sistem dan menghasilkan distorsi tegangan. Pemasangan *capacitor bank* dapat menciptakan resonansi seri dan paralel, yang dapat memperbesar distorsi harmonisa.

Total harmonisa (THD) dari arus bervariasi dari 200% pada terminal beban sampai dengan beberapa persen pada tingkatan transmisi. Sedangkan THD tegangan bermain dari 10% pada beberapa transformator distribusi sampai 1% pada tingkat transmisi⁽³⁾.

Dampak dari harmonisa arus adalah terjadinya pemanasan berlebih pada transformator serta pemanasan pada kawat penghantar netral dari rangkaian terhubung bintang. Karena harmonisa ke tiga

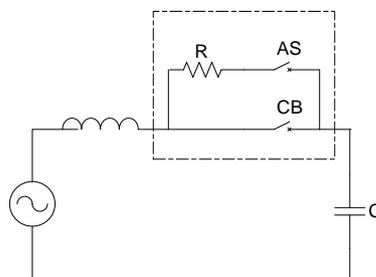
dan kelipatannya tidak dapat dihilangkan di netral sebagaimana harmonisa lainnya⁽³⁾. Meskipun hal ini dapat diatasi dengan memperbesar ukuran kawat penghantar netral dan menambahkan filter untuk mengurangi harmonisa arus yang mengalir di netral.

G. Metode-metode Pengontrolan Capacitor Switching

Beberapa metode pengontrolan *capacitor switching* yang dapat dilakukan, yaitu:

- *Capacitor bank switching* tanpa menggunakan pembatas untuk mengurangi *transient current* dan *transient voltage* yang melewati peralatan *switching*. Metode ini banyak digunakan pada *capacitor bank* berkapasitas kecil, seperti *capacitor* yang dipasang pada penyulang (*feeder*) distribusi.
- Pemasangan induktor (*reactor*) pada *capacitor bank* ⁽¹²⁾, dimana induktor akan terus di-*energize* selama *capacitor bank* dioperasikan. Penambahan induktor ini bertujuan untuk membatasi *inrush current* di bawah level dari peralatan *switching*. Namun karena di-*energize* terus menerus maka akan menghasilkan rugi-rugi (panas) karena hadirnya resistansi.
- *Pre-Insertion Inductor* adalah salah satu metode untuk mengurangi *transient* dimana induktor hanya dimasukkan sesaat, selanjutnya induktor di-*bypass* ⁽¹²⁾. Metode ini juga bertujuan membatasi *transient* pada proses *switching capacitor*. Namun tetap menghasilkan rugi-rugi panas sampai dengan induktor di lepas.

- *Pre-Insertion Resistor*^(10) 11), metode ini mirip dengan *pre-insertion inductor* yang juga dapat membatasi *inrush* pada proses *switching*. Suatu resistor dipasang parallel pada saat *switching*. Setelah proses *switching*, resistor dilepas dengan membuka saklar bantu (*auxiliary switch*).
- *Switching Controller*⁽³⁾, dalam aplikasinya dikenal juga sebagai *point to wave* atau *Synchronous Switching* atau *Zero-Crossing Breaker*. Metode *Zero-crossing breaker* ini mengatur proses *close* dari setiap *pole* (fase) *Circuit breaker*. Dimana proses *close* CB dilakukan pada saat gelombang tegangan berada pada titik nol, sehingga tidak dihasilkan *transient current*. Namun metode ini membutuhkan ketepatan waktu dan pengontrolan.



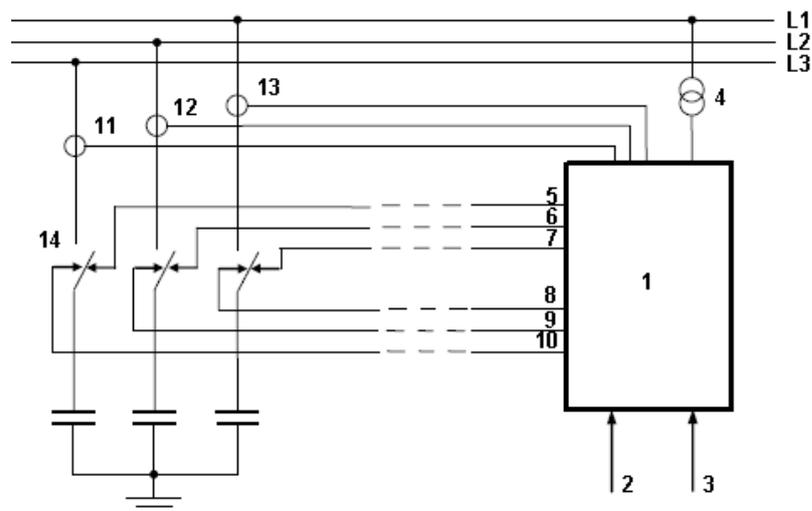
R = resistor
 C = capacitor
 AS = Auxiliary switch
 CB = Circuit Breaker

Gambar 2.9. Capacitor switching dengan pre-insertion resistor

Saat ini, aplikasi *high voltage Capacitor bank* di Gardu Induk PLN disertai dengan pemasangan Induktor (*reactor*). Dan khusus untuk wilayah Jawa dan Sumatera dilengkapi dengan *switching controller* atau *point to wave control*.

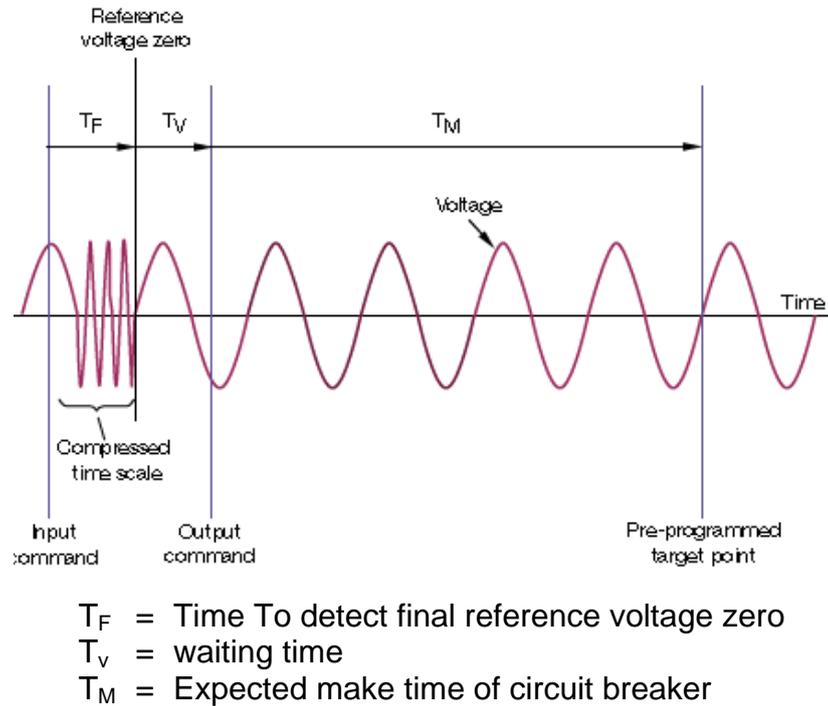
H. Switching Controller

Ada beberapa istilah yang digunakan untuk *capacitor switching controller* ini, antara lain: *point to wave control*, *zero crossing breaker* dan *switching controller*⁽¹³⁾. Pengontrolan *capacitor switching* merupakan suatu metode untuk mengurangi pengaruh *transient* dengan mengontrol waktu operasi *switching*. Perintah *close/ open* ke CB atau PMT akan ditunda selama waktu tertentu untuk mencapai titik *close/ open* yang tepat. Gambar 2.10 memperlihatkan ilustrasi umum dari prinsip kerja suatu *switch controller* (*Switchsynch*TM *controller – ABB*)⁽¹⁴⁾.



Item	Designation
1	Controller
2	Input command
3	Input command
4	Voltage transformer
5	Close output (L3)
6	Close output (L2)
7	Close output (L1)
8	Open output (L1)
9	Open output (L2)
10	Open output (L3)
11	Current transformer
12	Current transformer
13	Current transformer
14	Circuit-breaker

Gambar 2.10.. Diagram prinsip pemasangan switching controller



Gambar 2.11. Skema Operasi Capacitor Switch Controller.

Ketika *capacitor bank* di-energize, maka perintah input diberikan ke *switching controller*. Selanjutnya *controller* akan menentukan *reference time instant*, dihubungkan dengan sudut fase dari tegangan busbar. Setelah itu ditentukanlah suatu waktu tunda untuk selanjutnya *controller* memberikan output berupa perintah *close* ke CB.

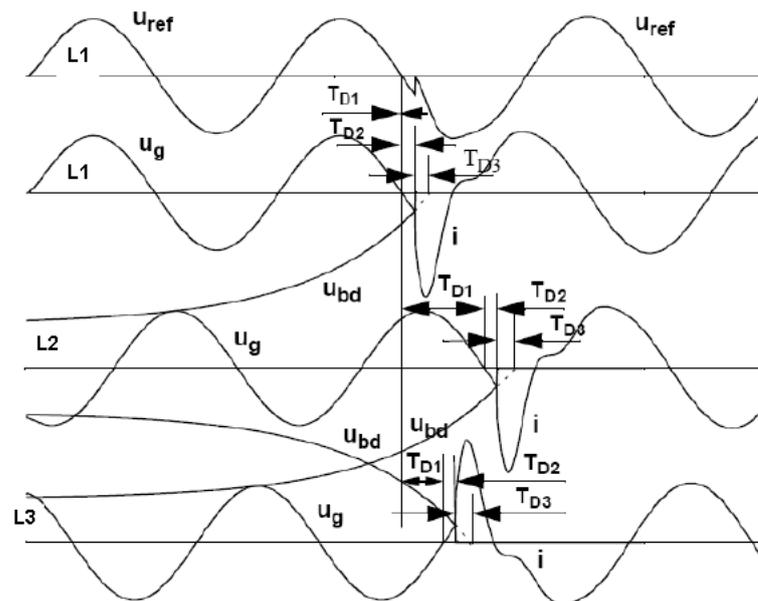


Gambar 2.12.

Switchsynch™ Controller F236 (Ex ABB) yang terpasang di GI Sanur

Prinsip kerja

Prinsip kerjanya dapat diilustrasikan seperti terlihat pada gambar 2.12, 2.13 dan 2.14 untuk kontrol penutupan PMT dan membuka PMT. Ketika *controller* menerima perintah, maka mikroprocessor mulai menghitung di nilai nol dari tegangan referensi yang diperoleh dari transformator tegangan (*potential transformer* – PT). Selanjutnya *controller* mengirimkan perintah penutupan (5, 6, 7) ke *operating coil* setiap fase dari PMT setelah waktu tunggu tercapai (T_v). Posisi waktu penutupan setiap fase dari PMT tidak persis sama.



Gambar 2.13.

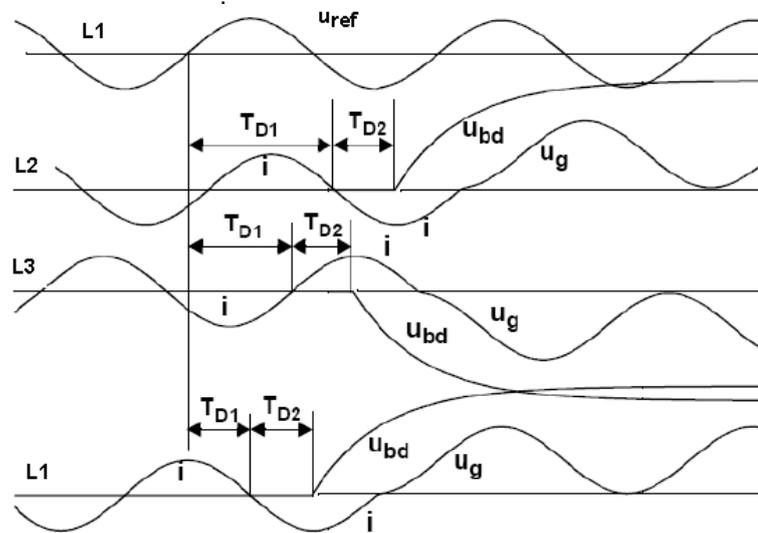
Prinsip dasar pengontrolan *energizing* suatu *capacitor bank* dengan menggunakan *single pole operated CB*.

U_{bd} = Rate of Decrease of Dielectric Strength (RDDS)

T_{D1} = phase shift parameter

T_{D2} = waktu tunda tambahan untuk kontak menutup (*additional delay for contact touch*)

T_{D3} = pre-arcing time



Gambar 2.14.

Prinsip dasar pengontrolan de-energizing suatu *capacitor bank* dengan menggunakan *single pole operated CB*.

U_{ref} = tegangan referensi (*reference voltage*)

i = arus

U_g = perbedaan tegangan (U_{gap})

U_{bd} = RDDS

T_{D1} = phase shift parameter

T_{D2} = waktu tunda tambahan untuk kontak membuka (*additional delay for contact separation*)

I. Alternative Transient Program Draw (ATPDraw)

1. Gambaran singkat ATPDRAW

ATPDraw adalah hak cipta dari SINTEF Energy Research © 1996 – 1997, Trondheim, Norwegia. Diprogram dan dikembangkan oleh Dr. Hans Kr. Heidalen. Selanjutnya didesain kembali dan dikonversi ke windows oleh O. G. Dahl, Dahl Data Design, Norwegia serta Bonneville Power Administration, Amerika Serikat, perusahaan yang membiayai pengembangan program.

ATPDraw untuk windows merupakan program bebas (*royalty free*) dan dapat diunduh (*download*) bebas dari servernya [ftp.ee.mtu.edu](ftp://ee.mtu.edu).

*ATPDraw*TM untuk windows adalah *software* berbasis gambar, merupakan bagian dari program *Electromagnetic Transient Program* (EMTP). *ATPDraw* membantu dalam pembuatan dan mengubah model jaringan listrik yang akan disimulasikan. Dalam program ini, para penggunanya dapat membangun suatu rangkaian listrik dari komponen-komponen dasar yang telah ada. *Processor* selanjutnya mengolah inputan ATP dan memberikan penamaan unik untuk setiap sambungan komponen yang selanjutnya disebut *node*. Rangkaian listrik dapat digambarkan dalam satu fase maupun tiga fase. *ATPDraw* sangat membantu dalam analisa *transient* pada sistem daya listrik.

ATP memiliki banyak model, antara lain mesin-mesin, transformator, *surge arrester*, saluran transmisi dan kabel. Dengan ATP, jaringan yang kompleks dapat disimulasi. Analisa sistem kontrol, peralatan elektronika dan karakteristik komponen-komponen nonlinier juga memungkinkan untuk dianalisa. Gangguan sismetris dan tidak simetris (*unsymmetric*) seperti gangguan, *lightning surge* dan berbagai macam operasi *switching* dapat pula disimulasi.

2. Komponen-komponen yang tersedia dalam *ATPDraw*

ATPDraw menyediakan berbagai komponen yang sering digunakan dalam pemodelan ⁽¹⁵⁾, yakni:

Komponen-komponen standard

Percabangan linier (*linier branches*)

Resistor, Induktor, *Capacitor*, RLC
 RLC 3-phase, simetris dan non-simetris
 Induktor dan capacitor dengan kondisi awal

Percabangan non-linier (*Non-linier branches*)

Current dependent resistor
Current dependent inductor
Time dependent resistor
Current dependent
TACS controlled resistor

Model Saluran (*line models*)

RLC pi-equivalent, 1, 2 and 3-phase
RL Coupled, 2, 3 and 6-phase
RL Symmetric, sequence input, 3 and 6 phase
Clarke distributed parameter, 1, 2, 3, 6 dan 9-phase

Saklar - *Switches*

Time Controlled, 1 and 3-phase
Voltage controlled
Diode, Valve, TACS, Double TACS
Statistic, independent
Systematic, independent

Sumber-sumber - *Sources*

DC, Ramp, Two-slope ramp
AC, 1 and 3 phase
Double-exponential source
Heidler source, TACS source
 Sumber AC dan DC tidak ditanahkan – *Ungrounded AC and DC source*

Mesin-mesin – *Machines*

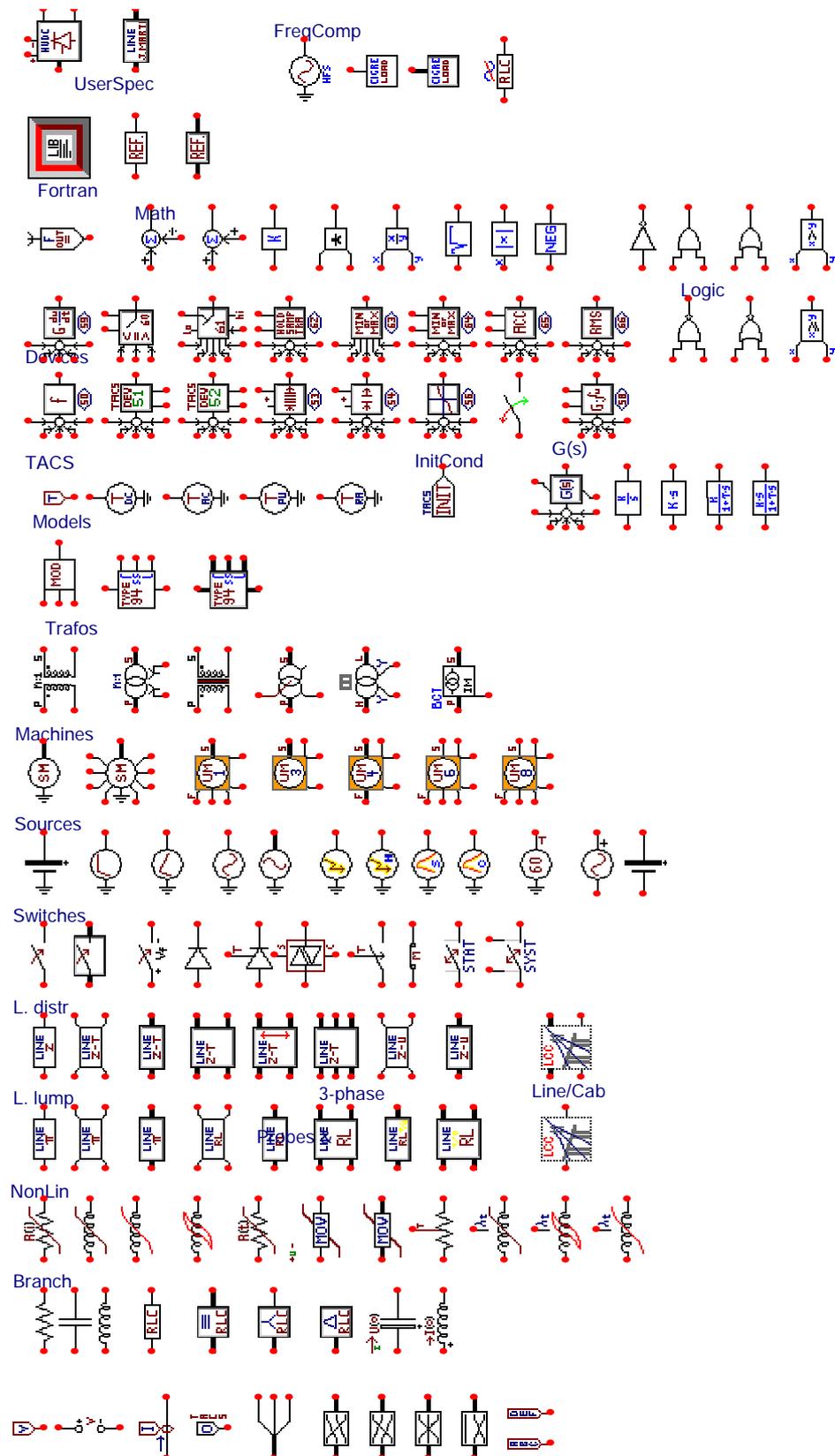
Mesin sinkron, Mesin induksi, Mesin DC
Universal machine

Transformator - *Transformer*

Single phase ideal
Single phase with saturation
Saturable transformer, 3 phase
Transformator 3 fase.

Saluran udara – *overhead line*

1 – 9 phase distributed
1 – 9 phase equivalent PI – circuits
1 – 9 phase frequency dependent



Gambar 2.15. Komponen – komponen ATPDraw

3. Membangun Rangkaian

Setelah masuk ke media gambar, selanjutnya memilih komponen sesuai dengan model yang akan disimulasi. Dalam penelitian ini, komponen-komponen yang digunakan, antara lain:

- Sumber AC Tiga fase, sebagai *infinite bus* di GI Sanur. Tegangan input per fasa adalah tegangan puncak.
- RLC tiga fase sebagai impedansi sumber dan impedansi beban 20 kV, dalam Ohm (Ω), milli Henry (mH) dan mikro Farad (μF).
- Transformator 3 Fase (*ideal*) sebagai beban dari sistem GI Sanur. Data yang diinput adalah nilai perbandingan antara tegangan primer dan sekunder.
- 3 buah *Single Phase Time Controlled Switch*, yang digunakan sebagai *Single Pole CB*. Agar bisa disimulasi penutupan PMT tiga fase secara serempak dan tidak serempak. Waktu dalam detik atau *second* (s)
- 3 buah *single phase inductor sebagai reactor*, dinyatakan dalam mH.
- 6 buah *single phase capacitor* untuk memodelkan *capasitor bank, double Y ungrounded*, dinyatakan dalam μF .
- Resistor sebagai 20 kV *Neutral Grounding Resistor (NGR)*, dinyatakan dalam Ω .

BAB III

METODE PENELITIAN

A. RANCANGAN PENELITIAN

Penelitian ini melakukan kajian tentang pengaruh *switching capacitor* pada sistem 150 kV. Dengan melihat dampak pemakaian *switching controller* maupun tanpanya pada proses *switching* tersebut. Sebab jika tanpa *switching controller*, nilai *transient current* dan *transient voltage* masih di bawah ketahanan peralatan maka tidak perlu ditambahkan *switching controller*.

Simulasi kondisi di atas dilakukan dengan bantuan *ATPDraw Software*. Hasil kajian ini diharapkan menjadi bahan pertimbangan bagi PLN dalam penggunaan *switching controller* pada *capacitor switching* di Gardu Induk.

B. WAKTU DAN LOKASI PENELITIAN

A. Waktu pelaksanaan penelitian ini dimulai sejak bulan April sampai dengan bulan Agustus tahun 2013.

B. Lokasi Penelitian:

Salah satu gardu induk (GI) di PT. PLN P3B Jawa Bali yang memiliki *hv capacitor bay*, yaitu: GI Amlapura atau GI Sanur atau GI Nusa Dua atau GI Banyuwangi. Namun yang dijadikan sampel analisa adalah GI. Sanur.

C. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah:

1. Studi *literature*

Studi literature, meliputi studi pustaka, buku-buku, paper, internet, dan referensi lainnya terkait *capacitor switching* pada *power system* dan penggunaan *ATPDraw*.

2. Pengambilan data di lapangan

Pengumpulan data, Penulis melaksanakan pengumpulan data-data sistem kelistrikan di Gardu Induk Sanur berupa Single line diagram, data peralatan *Capacitor Bay* (*name plate PMT, Capacitor, reaktor, dll*), pengujian waktu penutupan *controller* (F236 – ex ABB) serta pencatatan beban GI tersebut.

3. Pengolahan Data

Setelah mendapatkan data-data yang dibutuhkan selanjutnya data tersebut diolah untuk dimodelkan dalam *ATPDraw*.

4. Analisa Hasil

Menganalisa hasil simulasi dari *ATPDraw*.

5. Penarikan Kesimpulan

Merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisis. Selain itu juga akan diberikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan.

D. METODE PENGUMPULAN DATA

Metode pengumpulan data, antara lain:

1. Pencatatan data
2. Pengambilan gambar
3. Pengujian waktu penutupan kontak *switching controller*.

E. INSTRUMEN PENELITIAN

Peralatan bantu yang digunakan dalam penelitian ini, meliputi:

1. Laptop (OS. Windows XP dan Windows 7)
2. *Power Simulator* – DOBLE F6150
3. *Software ATP Draw Version 3.5p11*
4. *Microsoft Office (Word 2007, Excel 2007 dan Visio 2007)*
5. Printer
6. Kamera

BAB IV

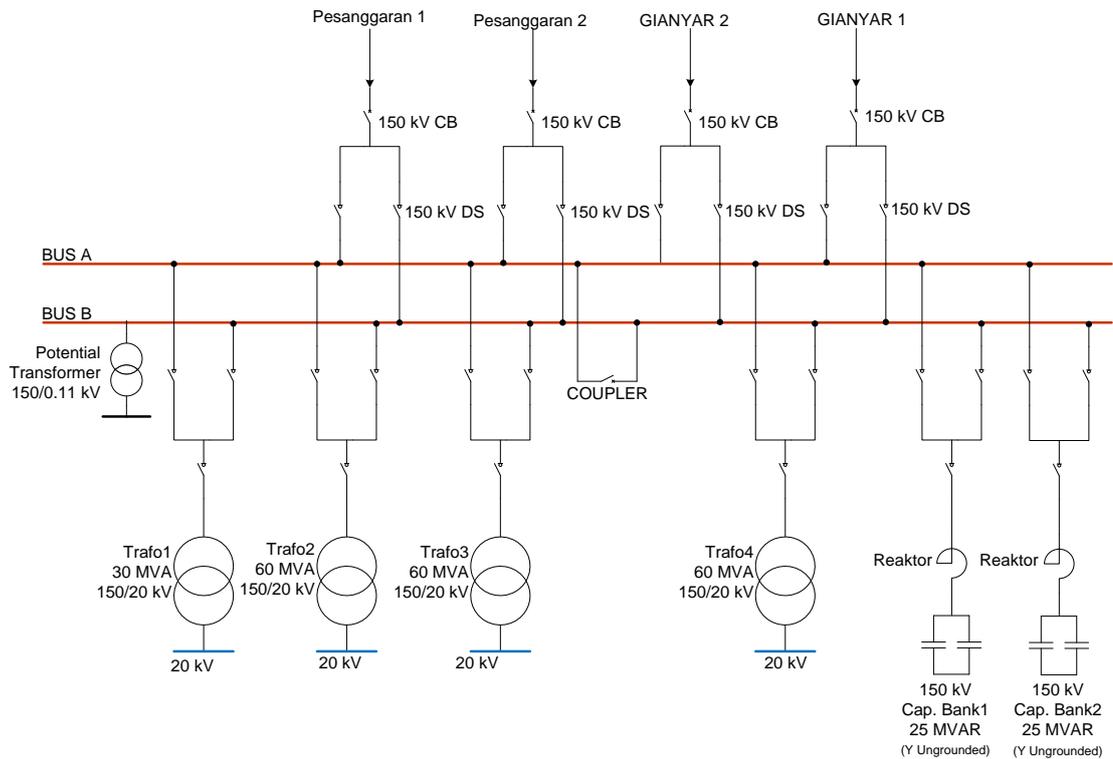
HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Membangun Model Simulasi

Dalam analisa *capacitor switching* ini, digunakan bantuan *Alternative Transient Program (ATP)*. ATP adalah universal program untuk simulasi fenomena *transient*. Untuk mencapai fungsi ATP maka peralatan-peralatan sistem perlu dimodelkan.

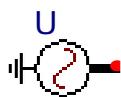
Power supply di sistem Bali lebih dari 50% dari sistem Jawa, maka di beberapa GI di Bali, tegangan bisa mencapai 140 kV dari tegangan nominal 150 kV. Meskipun tegangan ke distribusi 20 kV dapat dinaikkan dengan bantuan *tap changer* dari trafo, namun posisi *tap changer* yang telah mencapai maksimum, maka diperlukan cara lain untuk menaikkan tegangan.

Solusi yang diambil oleh PLN adalah dengan memasang Capacitor Bank 150 kV di beberapa Gardu Induk di Bali, diantaranya GI Nusa Dua, GI Sanur, GI Pesanggaran, GI Pamecutan Kelod dan GI Amlapura. Beberapa dari wilayah tersebut berada di pusat-pusat beban seperti Nusa Dua dan Sanur. Untuk sampel sistem yang diambil dalam penelitian ini adalah Gardu Induk Sanur – Bali, dengan diagram satu garis (*single line diagram – sld*), seperti gambar 4.1.



Gambar 4.1. SLD GI Sanur

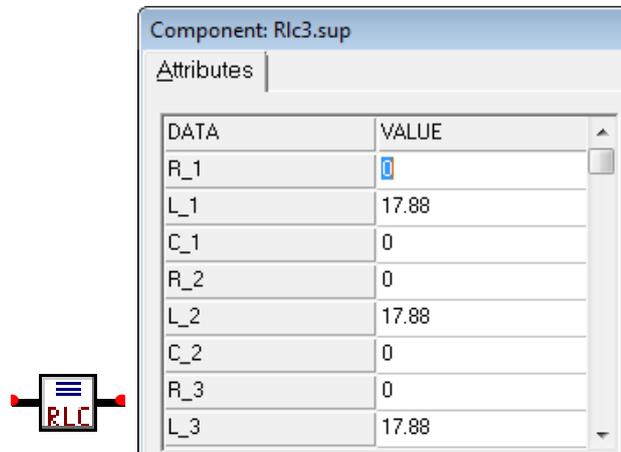
Dalam pemodelan sistem GI Sanur ini, dianggap bus GI Sanur sebagai *infinite bus*. Dengan tegangan sumber 140 kV, sesuai kondisi di lapangan, ketika capacitor bank akan dioperasikan. Sumber dimodelkan oleh ATP model AC3PH-type 14 (sumber 3 fase), dengan nilai *amplitude*: $(140 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} = 114309.5 \text{ V})$.



Component: Ac3ph.sup	
Attributes	
DATA	VALUE
U/I	0
Amp.	114309.5
f	50
pha	0
A1	0
Tstart	-1
Tstop	1

Gambar 4.2. model dan tampilan data sumber 3 fase (Ac3ph)

Adapun impedansi sumber adalah $L = 17.88 \text{ mH}$ (nilai R diabaikan).



Gambar 4.3.
Model dan tampilan data impedansi sumber 3 fase (Rlc3)

Sedangkan beban 20 kV yang terhubung di keempat transformatornya dijadikan satu. Rata-rata persentase beban setiap transformator tercantum pada tabel 4.1.

Tabel 4.1

KAPASITAS DAN BEBAN TRANSFORMATOR TERPASANG DI GI SANUR

No. Trafo	Kapasitas Terpasang (MVA)	Beban	
		%	MVA
1	30	61	18.3
2	60	37	22.2
3	60	61	36.6
4	60	32	19.2
		Total	96.3

Jika dianggap *power factor* beban pada saat itu adalah 0.8, maka selanjutnya kita mendapatkan nilai R dan L, yang tertuang dalam tabel IV.2, dengan menggunakan persamaan:

$$R = \sqrt{3} \cdot V^2 / P \quad \dots\dots\dots 4.1$$

$$L = \sqrt{3} \cdot V^2 / (2\pi f Q) \quad \dots\dots\dots 4.2$$

Dimana:

R = Tahanan dalam Ohm

L = Induktansi dalam Henry

V = Tegangan fase-fase dari sistem dalam Volt

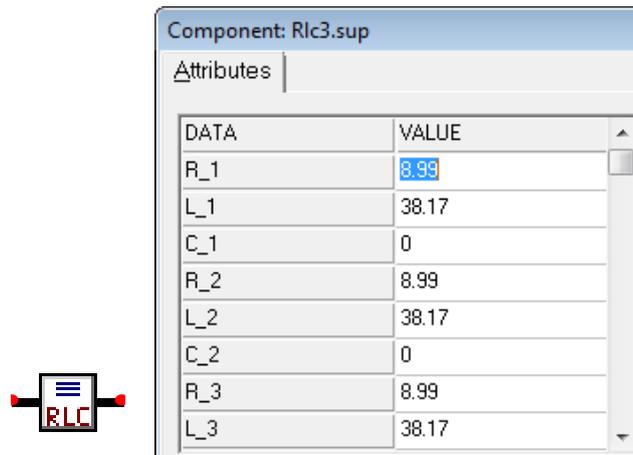
P = Daya Aktif dalam Watt

Q = Daya Reaktif dalam VAR

TABEL 4.2 NILAI R DAN L BEBAN

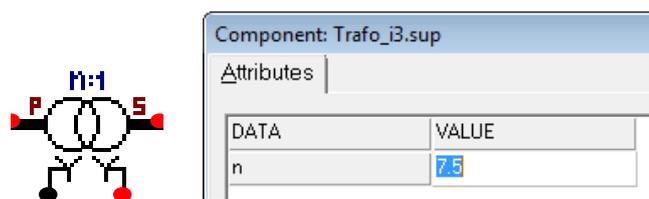
Beban				
S (MVA)	P (MW)	Q (MVAR)	R (Ω)	L (mH)
96.3	77.04	57.78	8.99	38.17

Dengan menggunakan komponen - RLC3 - yang sama seperti impedansi sumber, maka diperoleh tampilan window komponen beban 20 kV seperti gambar 4.4.



Gambar 4.4. Model dan tampilan data mewakili beban 20 kV (Rlc3)

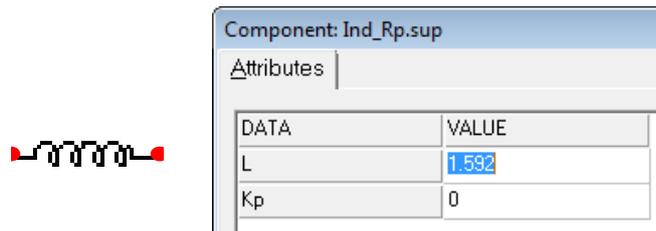
Adapun transformator dimodelkan oleh komponen transformator ideal, dengan perbandingan tegangan primer dan tegangan sekunder 150 kV/ 20 kV = 7.5. Sesuai dengan yang terpasang di lapangan, grup tranformator adalah Yy. Dengan titik netral sisi primer di tanahkan langsung (*solidly grounded*) dan netral sisi sekunder ditanahkan melalui impedansi 40 Ohm.



Gambar 4.5. Model dan window yang mewakili transformator 150 kV/20 kV

Komponen sistem Reaktor dimodelkan oleh tiga buah induktor satu fase, dengan nilai *reactor* terpasang 0.5 Ohm atau induktansi sebesar 1.592 mH, diperoleh dari rumus 4.3.

$$X_L = 2 \pi f L \times 1000 \dots\dots\dots 4.3$$

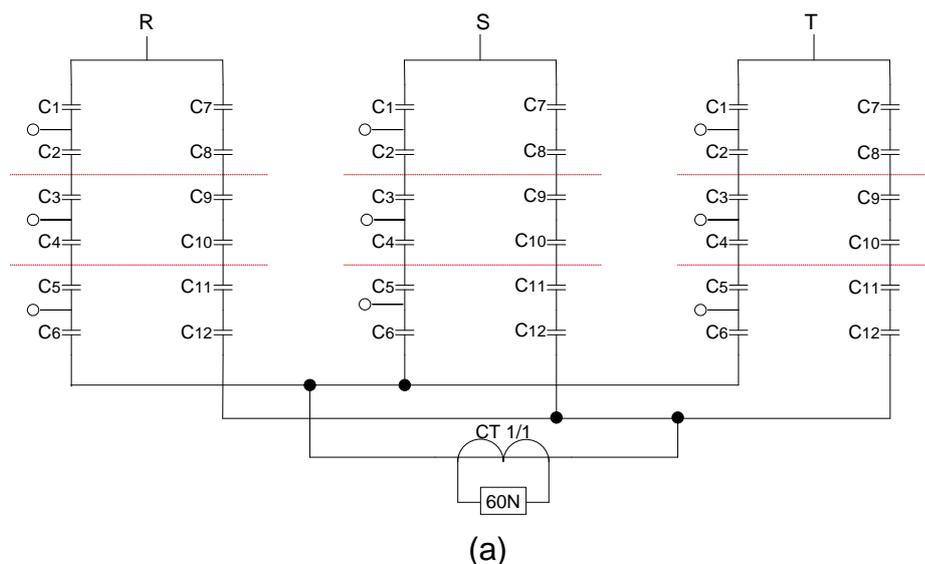


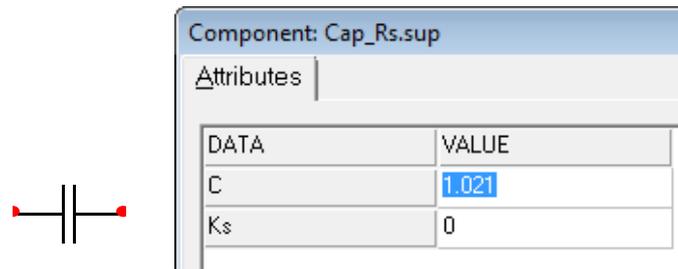
Gambar 4.6. Model dan tampilan data induktor satu fase yang mewakili reaktor

Untuk *capacitor bank*, seperti dengan gambar *single line diagram* 4.6, dimodelkan dengan kapasitansi seperti gambar 4.8. Adapun nilai kapasitansi ekuivalent perfase diperoleh dari persamaan

$$C = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \times 10^6 (\mu F) \dots\dots\dots 4.4$$

Oleh karena *Capacitor bank* 25 MVAR adalah *wye ungrounded double* (bintang), maka setiap satu hubungan bintang senilai 12.5 MVAR. Sehingga diperoleh nilai C disetiap fasa dari kedua hubung bintang adalah 1.021 μF .



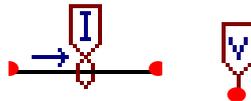


(b)

Gambar 4.7.

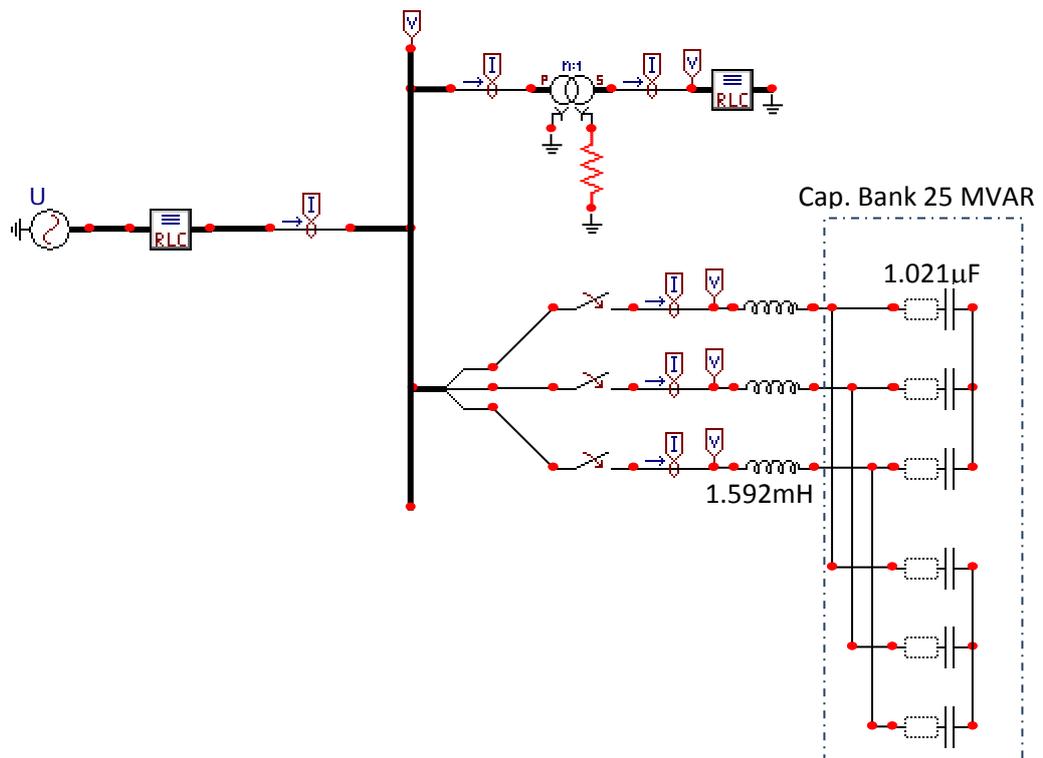
(a) Single Line Diagram 150 kV Capacitor Bank 25 MVAR – GI Sanur s
(b) dan tampilan data kapasitor satu fase

Untuk membantu membaca gelombang arus dan tegangan pada suatu titik dapat digunakan komponen meter (ATP – probe).



Gambar 4.8. Model ATP untuk Amperemeter dan Voltmeter

Setelah semua komponen dirakit, maka didapatkan model seperti gambar 4.9. Hanya *satu capacitor bank* 25 MVAR yang dimodelkan pada sistem ini, karena dalam pengoperasian 2 bay *capacitor bank* di GI Sanur ini tidak pernah bersamaan atau dilakukan bergantian.



Gambar 4.9. Model ATP untuk sistem GI Sanur

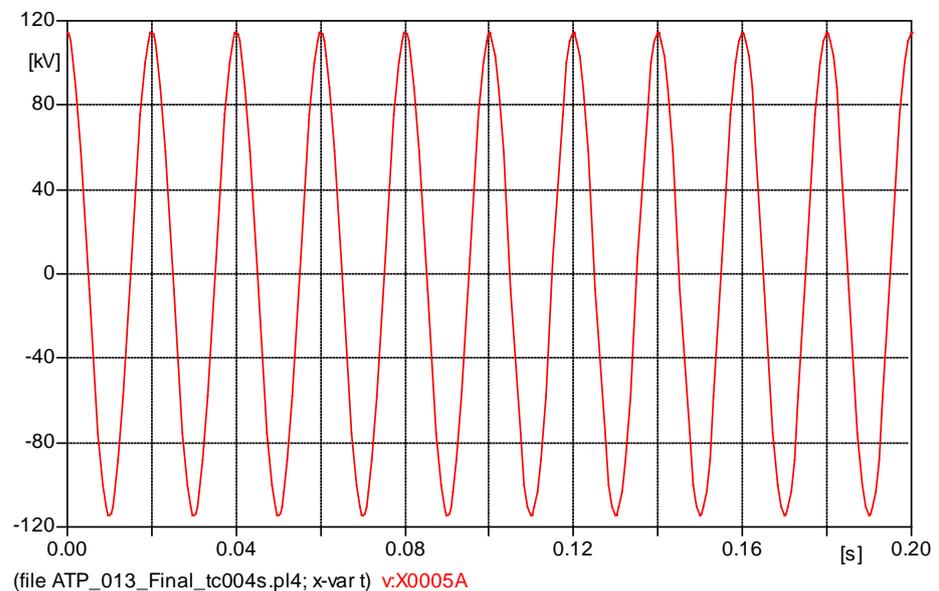
B. Respon *Transient* pada *Capacitor Bank Switching*

1. Respon *Transient* pada *Capacitor Bank Switching* dengan waktu penutupan *PMT* serempak

Pada saat *PMT* diperintahkan menutup, pada dasarnya tidak diketahui dimana titik penutupan tersebut terjadi pada gelombang sinusoidal tegangan. Bisa terjadi mendekati atau persis di titik nol, bahkan mendekati atau persis di puncak gelombang. Sehingga untuk simulasi switching kapasitor pada waktu penutupan kontak-kontak *PMT* secara serempak serempak, dibuat waktu *switching*

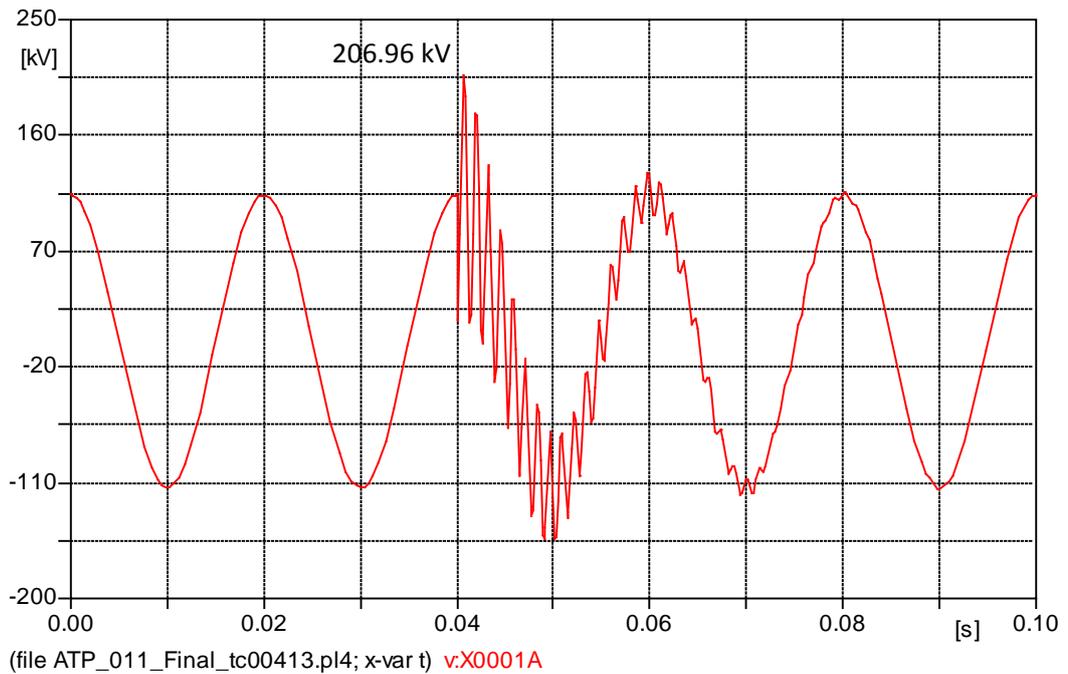
($T_c = \text{closing time}$) tepat di titik puncak gelombang tegangan yaitu $T_c = 0.0400$ s dan mendekati nol gelombang $T_c = 0.0249$ s.

Penentuan T_c tersebut dengan melihat gelombang sistem, seperti pada gambar 4.10. Gelombang tegangan fase R mencapai puncak pada pada waktu 0.0200 s, 0.0400 s dan berulang setiap selang waktu 20 ms. Dan selanjutnya dipilih $T_c = 0.0400$ s sebagai waktu penutupan kontak-kontak PMT untuk kondisi waktu penutupan saat gelombang berada di titik puncak. Adapun gelombang tegangan fase R mencapai titik nol pada waktu 0.0250 s dan berulang setiap 20 ms berikutnya. Sehingga dipilih waktu $T_c = 0.0249$ s atau 1 ms sesaat sebelum mencapai tegangan nol.



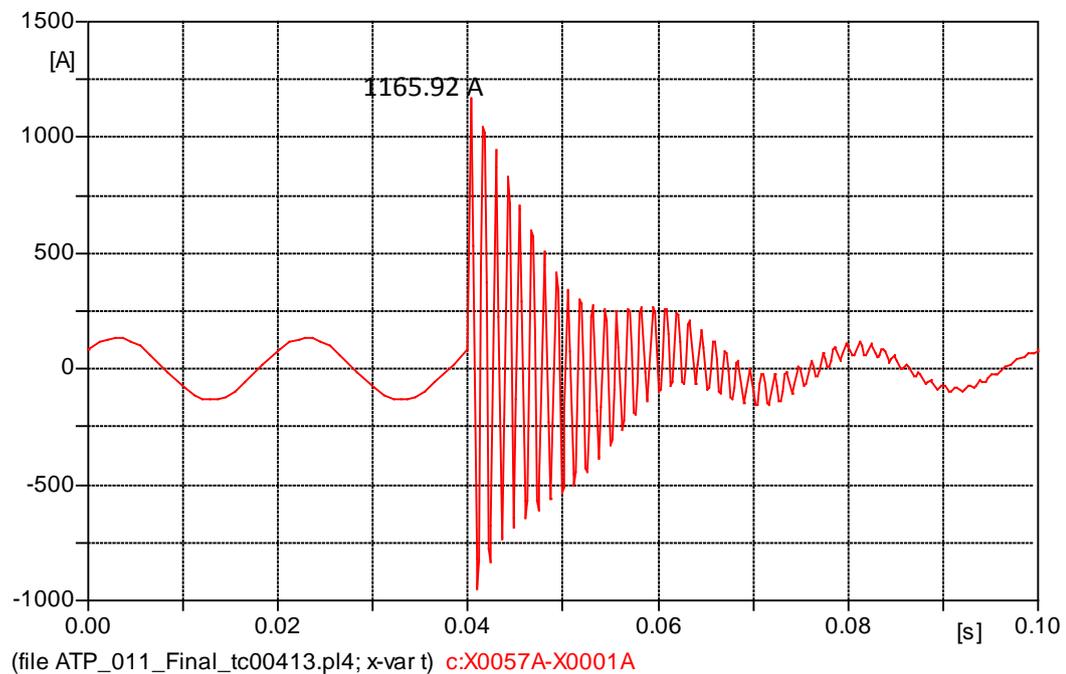
Gambar 4.10. Gelombang tegangan fase R

Gambar 4.11 sampai dengan 4.16 adalah gambar *transient voltage* untuk $T_c = 0.0400$ s. Gelombang ini diambil pada bus 150 kV.



Gambar 4.11. Tegangan transient fase R dengan $T_c = 0.0400$ s

Gambar 4.11, menunjukkan hasil simulasi capacitor switching pada tegangan fase R dengan waktu penutupan kontak PMT adalah $T_c = 0.0400$ s. Penutupan kontak PMT tepat di puncak gelombang tegangan tercapai. Adapun nilai *transient* tegangan mencapai 206.96 kV (206960 Volt). Jika dibandingkan dengan nilai tegangan fase nominal, $150000 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} = 122474$ Volt, maka tegangan transienya mencapai 1.69 kali dari tegangan fase normal.

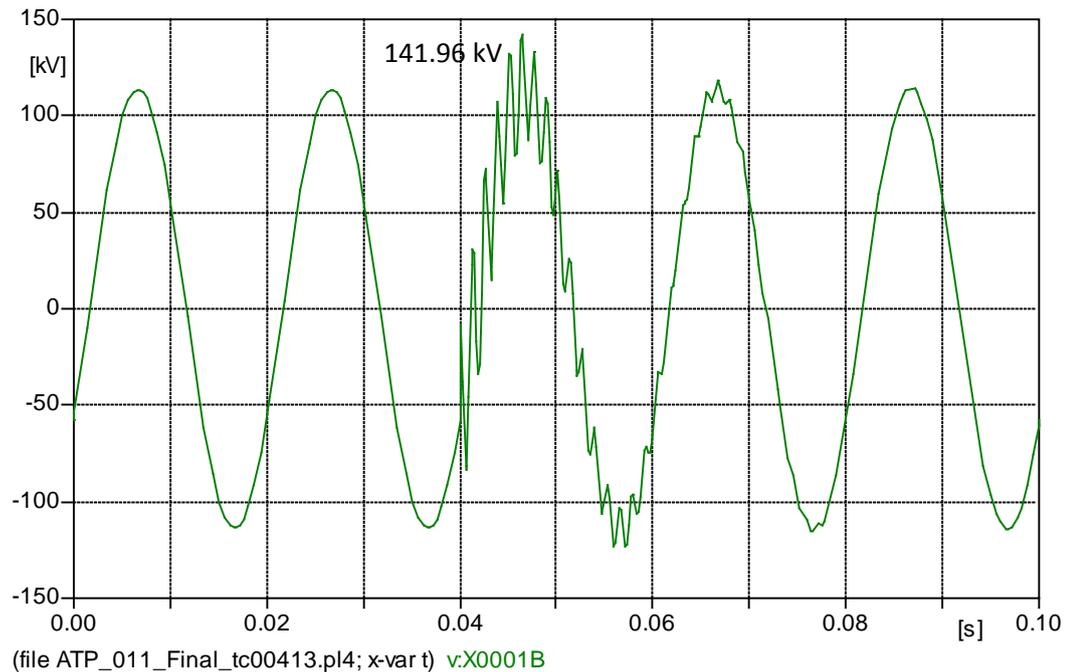


Gambar 4.12. Arus transient fase R dengan $T_c = 0.0400$ s

Gambar 4.12 adalah hasil simulasi untuk transient arus pada fase R dengan waktu penutupan $T_c = 0.0400$ s. Dengan nilai arus mencapai 1165.92 A. Dengan menggunakan persamaan 4.3 diperoleh arus fase rms dari *capacitor bank* 25 MVAR adalah 96.34 A atau puncak gelombang arus 136.25 A.

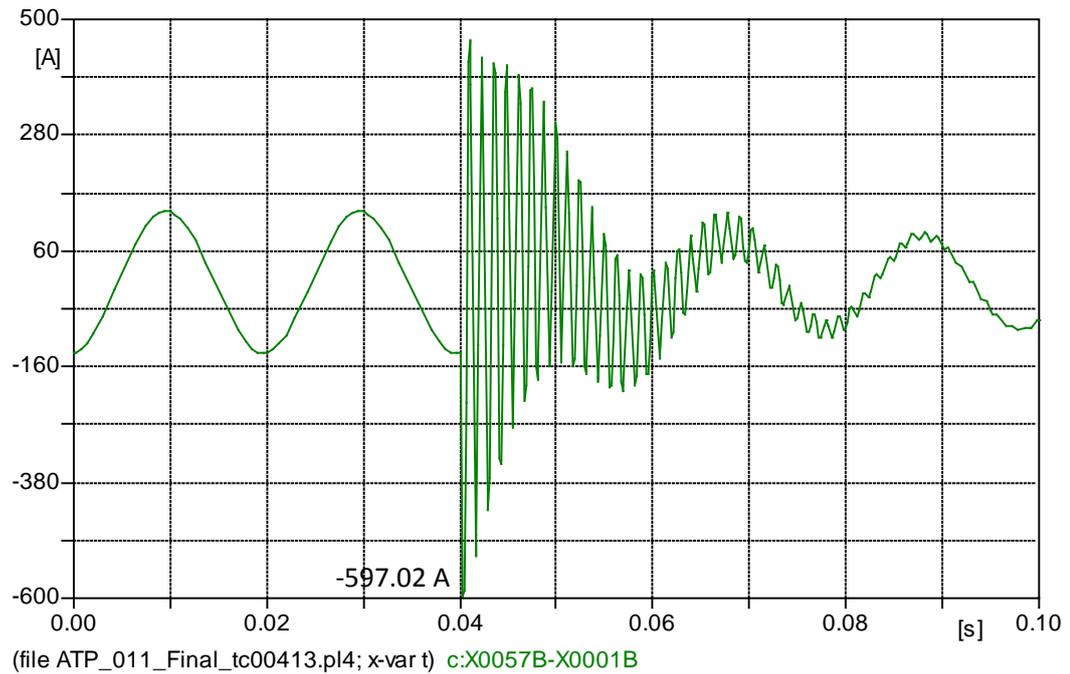
$$i = \frac{Q}{\sqrt{3}V} \dots\dots\dots 4.3$$

Sehingga nilai transient mencapai 8.56 kali arus fase nominal dari *capacitor bank*.



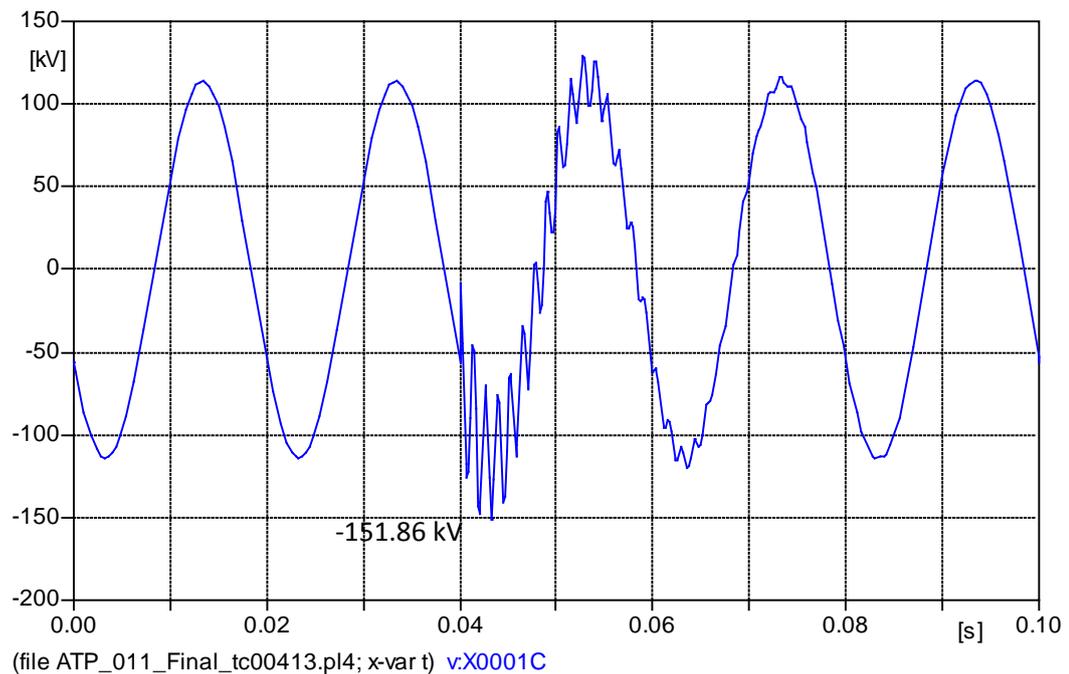
Gambar 4.13. Tegangan Transient fase S dengan $T_c = 0.0400$ s

Gambar 4.13, menunjukkan hasil simulasi *capacitor switching* pada tegangan fase S dengan waktu penutupan kontak PMT adalah $T_c = 0.0400$ s. Dengan selisih 120° ($1/3$ cycle) dari fase R, maka kontak PMT pada fase ini menutup mendekati titik nol dari gelombang tegangan sistem fase S. Sehingga nilai tegangan transient tidak setinggi tegangan transient pada fase R, yaitu dengan nilai 141.96 kV (141960 Volt), atau 1.16 kali tegangan fase nominal.



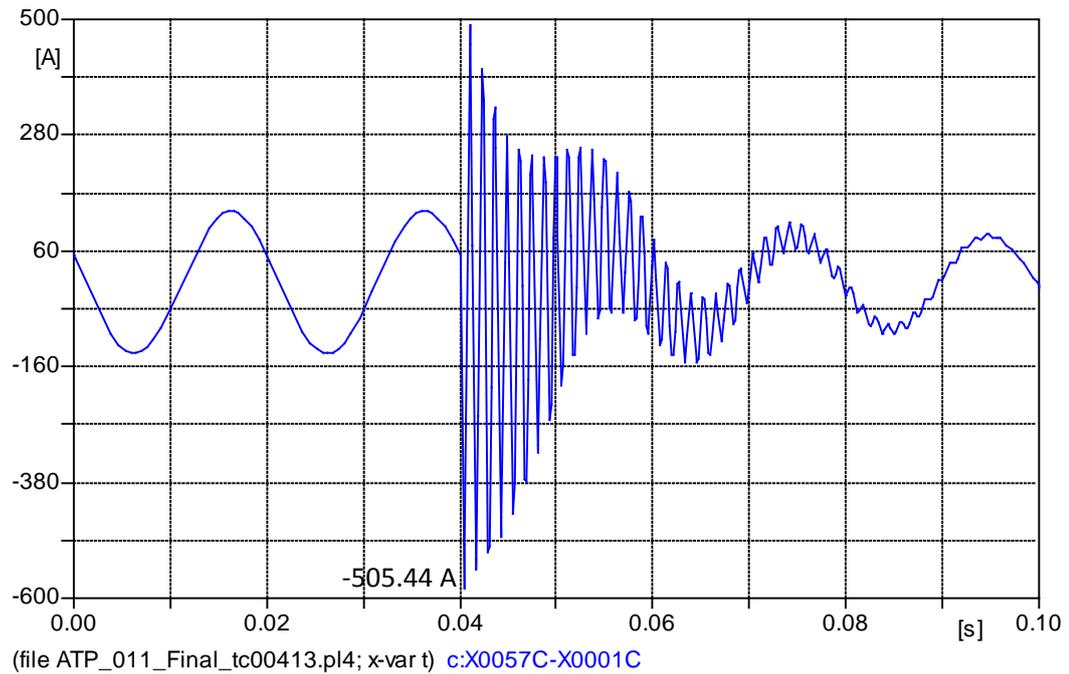
Gambar 4.14. Arus transient fase S dengan $T_c = 0.0400$ s

Gambar 4.14 adalah hasil simulasi untuk transient arus pada fase S dengan waktu penutupan $T_c = 0.0400$ s. Dengan nilai puncak arus mencapai 597.02 A, atau 4.38 kali dari puncak arus fase nominal untuk *capacitor bank* 25 MVAR.



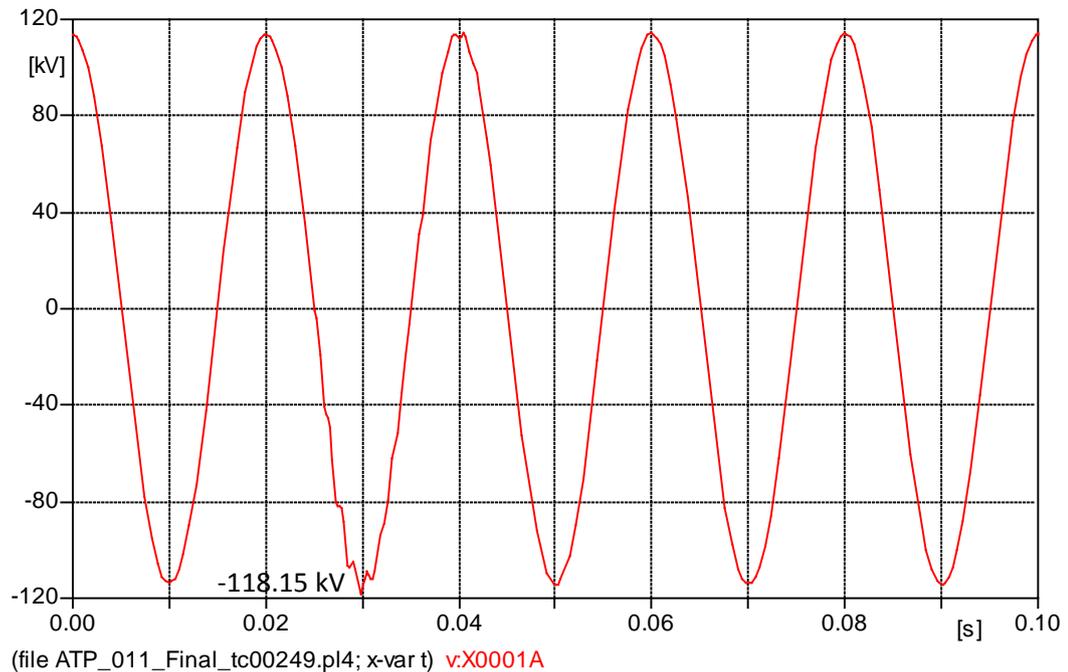
Gambar 4.15. Tegangan transient fase T dengan $T_c = 0.0400$ s

Gambar 4.15, menunjukkan hasil simulasi *capacitor switching* pada tegangan fase T dengan waktu penutupan kontak PMT adalah $T_c = 0.0400$ s. Dengan selisih 240° ($2/3$ cycle) dari fase R, maka kontak PMT pada fase ini menutup mendekati puncak negative dari gelombang tegangan, sehingga diperoleh puncak tegangan transient yang juga cukup tinggi (tapi masih dibawah tegangan transient fase R) yakni senilai -151.86 kV (-151860 Volt) atau 1.24 kali puncak tegangan fase normal.



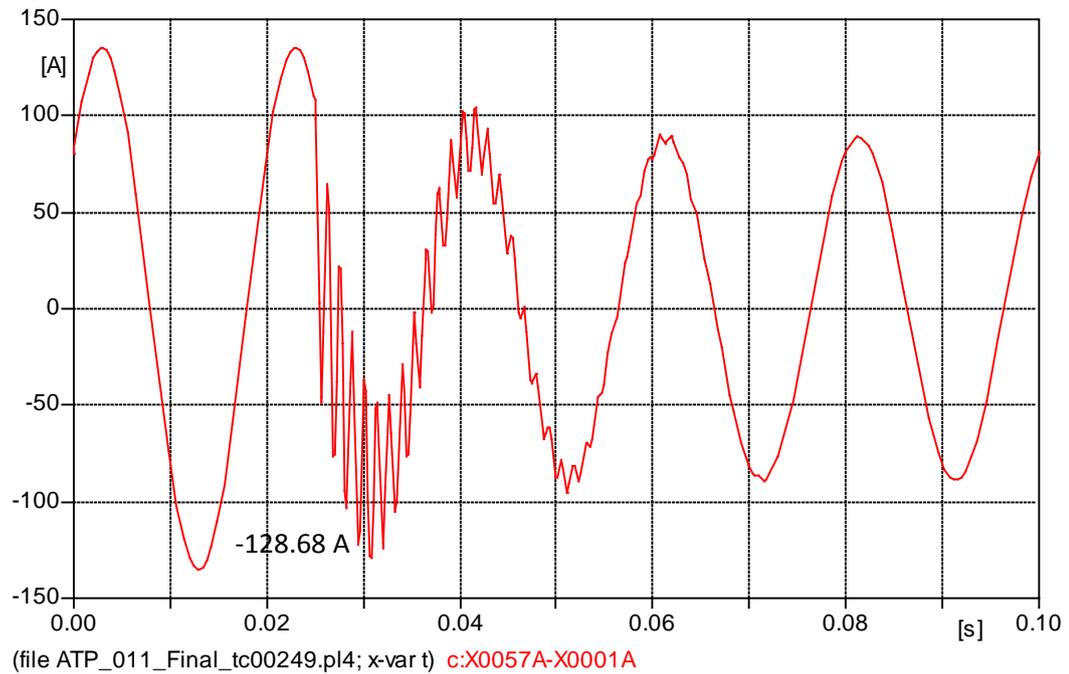
Gambar 4.16. Arus Transient fase T dengan $T_c = 0.0400$ s

Seperti halnya pada transient arus fase R, hasil simulasi untuk transient arus pada fase T yang terlihat pada gambar 4.16 dengan waktu penutupan $T_c = 0.0400$ s, nilai puncak transient arus mencapai - 505.44 A atau 3.71 kali dari puncak arus fase nominal.



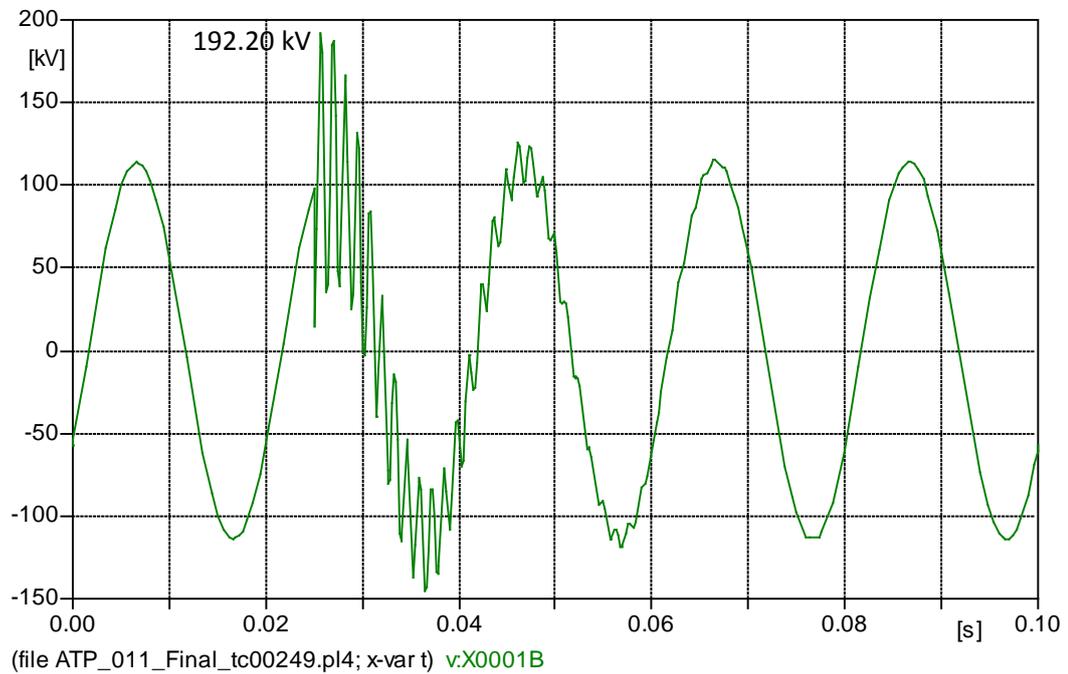
Gambar 4.17. Tegangan transient fase R dengan $T_c = 0.0249$ s

Gambar 4.17 adalah hasil simulasi transient tegangan fase R dengan waktu penutupan PMT adalah $T_c = 0.0249$ s atau setelah nilai nol dari referensi tegangan fase R. Dengan nilai puncak tegangan transient mencapai -118.15 kV (118150 Volt). Nilainya terlihat lebih rendah dari nominal (0.96 kali dari tegangan fase nominal), karena tegangan fase-fase sistem pada saat *capacitor bank ini dimasukkan adalah 140 kV atau inputan fase adalah 114309.5 Volt.*



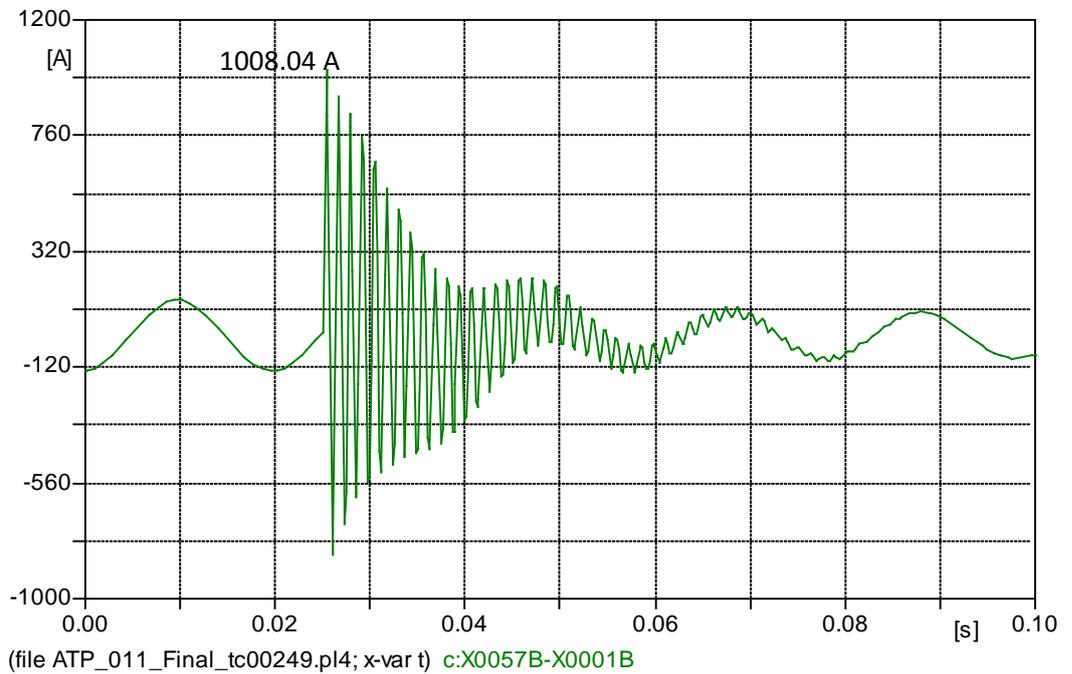
Gambar 4.18. Arus transient fase R dengan $T_c = 0.0249$ s

Gambar 4.18 adalah hasil simulasi untuk arus transient pada fase R dengan waktu penutupan $T_c = 0.0249$ s. Nilai puncak arus transient tidak setinggi dibandingkan jika *switching* dilakukan pada $T_c = 0.0400$ s (nilai arus mencapai 1165.92 A), arus transient fase R kali ini hanya sebesar 128.68 A atau.



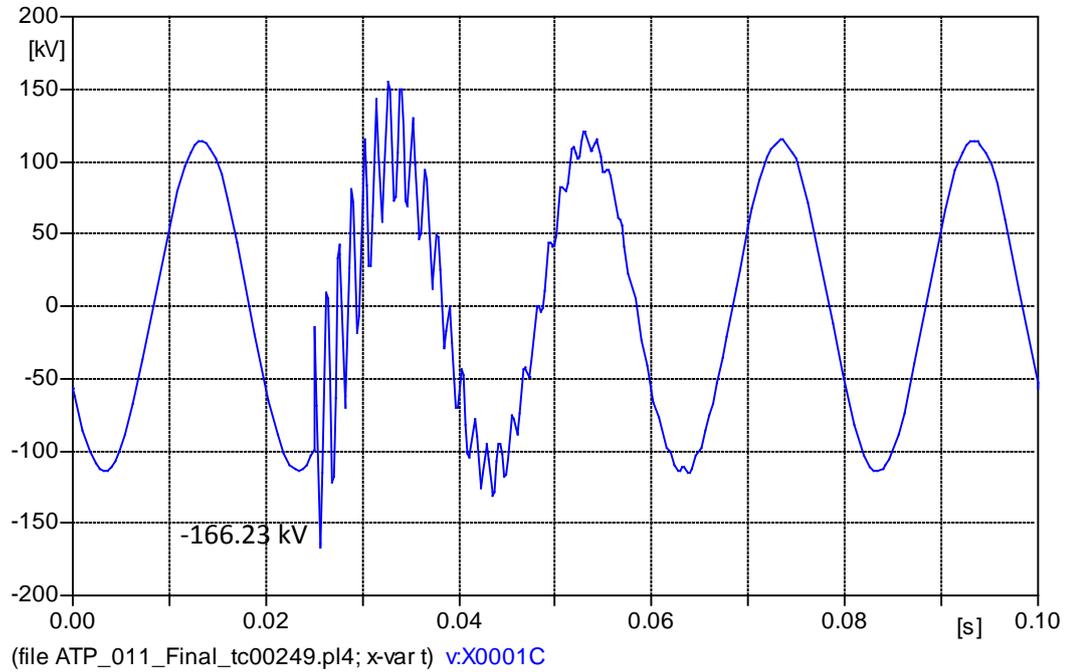
Gambar 4.19. Tegangan transient fase S dengan $T_c = 0.0249$ s

Gambar 4.19 adalah hasil simulasi tegangan transient fase S dengan waktu penutupan PMT adalah $T_c = 0.0249$ s. Berbeda dengan tegangan fase R sebelumnya yang penutupan terjadi sesaat setelah titik nol tegangan tercapai, fase S kali ini menutup mendekati nilai puncak gelombang tegangan. Sehingga tegangan transient mencapai 192.20 kV (192200 Volt) atau 1.57 kali dari puncak gelombang tegangan fase nominal.



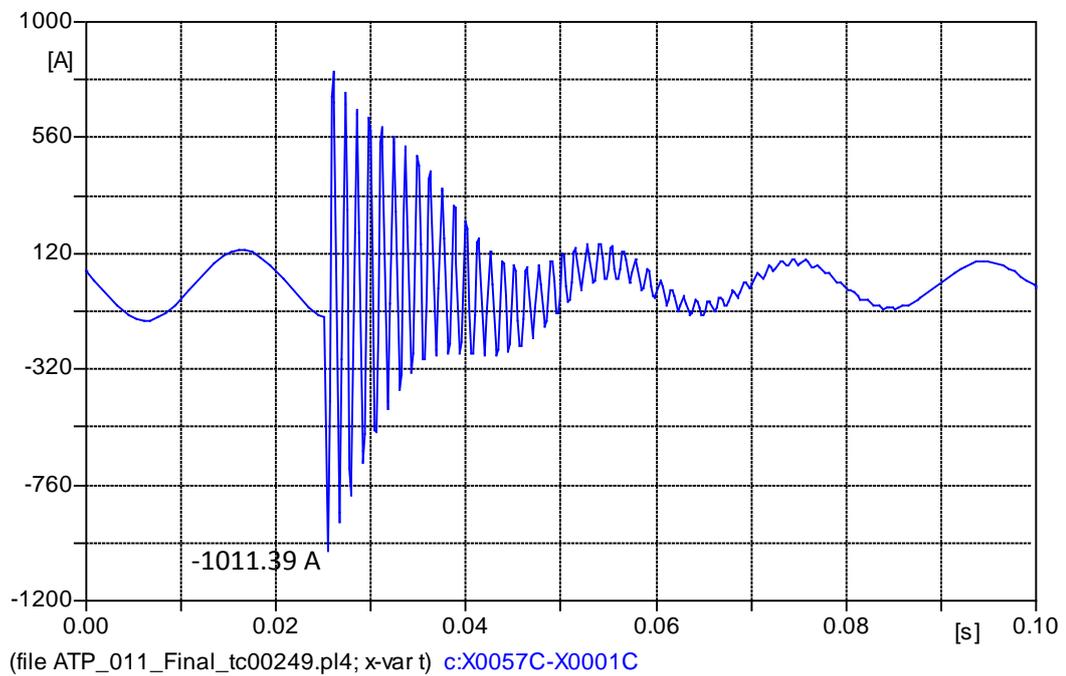
Gambar 4.20. Arus transient fase S dengan $T_c = 0.0249$ s

Gambar 4.20 adalah hasil simulasi untuk arus transient pada fase S dengan waktu penutupan $T_c = 0.0249$ s. Nilai arus transient cukup tinggi dibandingkan pada fase yang sama jika *switching* dilakukan pada $T_c = 0.0400$ (nilai arus mencapai 597.02 A), puncak gelombang arus transient fase S kali ini mencapai 1008.04 A atau 7.4 kali dari puncak arus nominal.



Gambar 4.21. Tegangan transient fase T dengan $T_c = 0.0249$ s

Gambar 4.21 adalah hasil simulasi tegangan transient fase T pada waktu penutupan PMT saat $T_c = 0.0249$ s. Kondisi penutupan fase T kali ini sesaat setelah titik puncak negative gelombang tegangan fase T tercapai. Sehingga tegangan transient mencapai -166.23 kV (166230 Volt) atau 1.36 kali tegangan fase normal.



Gambar 4.22. Arus transient fase T dengan $T_c = 0.0249$ s

Gambar 4.22 adalah gelombang arus hasil simulasi untuk arus transient pada fase T dengan waktu penutupan $T_c = 0.0249$ s. Nilai transient arus fase T ini hampir sama dengan nilai fase S (-1008.04A) yakni sebesar -1011.39A.

Hasil simulasi di atas dituangkan dalam tabel 4.3.

Tabel 4.3. Hasil Simulasi penutupan PMT serempak

Waktu penutupan	Tegangan Transient (kV)			Arus Transient (A)		
	R	S	T	R	S	T
Tc = 0.0400s	206.96	141.96	151.86	1165.92	597.02	505.44
Tc = 0.0249s	118.15	192.20	166.23	126.68	1008.04	1011.39

Dari tabel 4.3, pada $T_c = 0.0400$ s, tegangan transient tertinggi terjadi pada fase R, dengan puncak gelombang mencapai 206.96 kV (206960 Volt). Puncak gelombang tegangan fase kondisi normal adalah 122474 Volt. Jadi terjadi tegangan transient sekitar 1.67 kali dari tegangan nominal. Adapun untuk puncak gelombang arus transient mencapai 1165.92 Ampere.

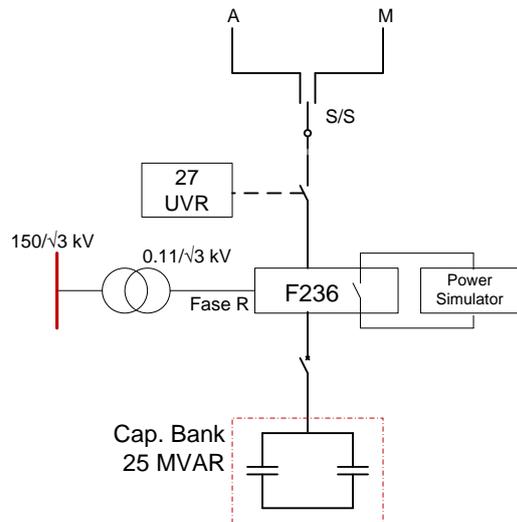
2. Respon Transient pada *Capacitor Bank Switching* dengan *waktu penutupan PMT tidak serempak*

Dengan acuan hasil pengetesan switching controller yang terpasang seperti pada gambar 4.23, maka didapatkan perintah penutupan dari controller seperti yaitu:

Fase R : 5163.90 ms

Fase S : 5168.70 ms

Fase T : 5163.90 ms



Gambar 4.23.

Rangkaian pengetesan waktu kerja kontak *switching controller*

S/s = Auto – Manual selector switch

A = Auto Control

M = Manual Control

UVR / 27 = undervoltage relay

F236 = Switching Controller Type (Ex ABB)

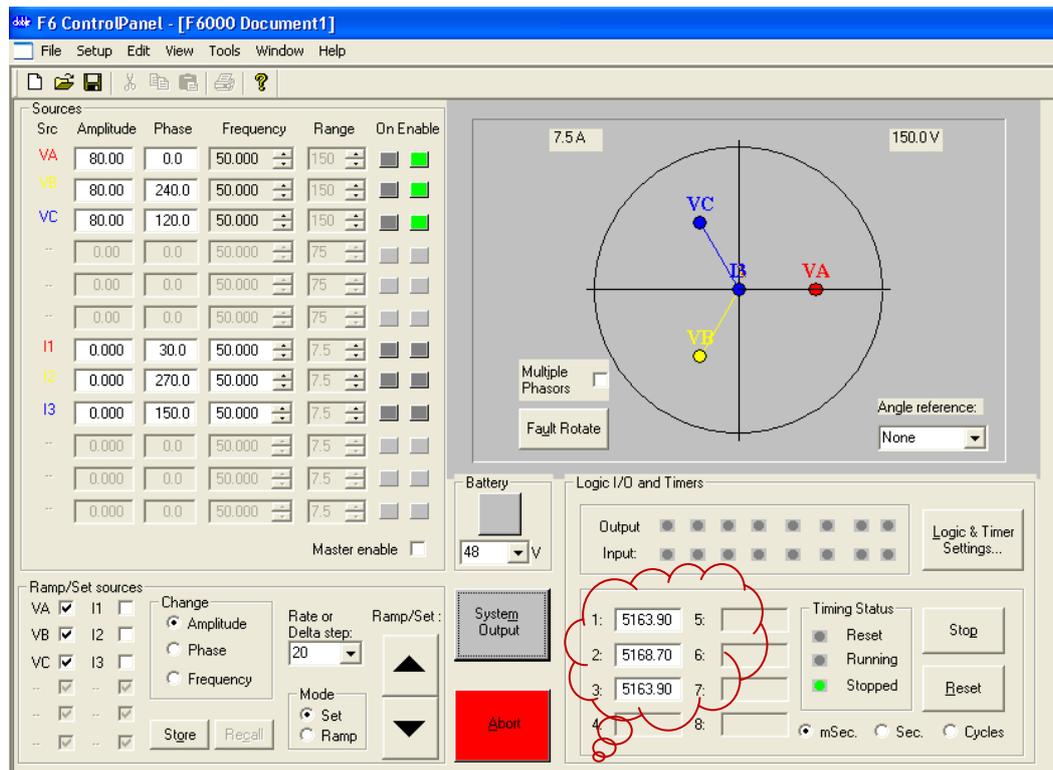
Pada saat pengetesan, s/s dibawa ke posisi auto. Power simulator injeksi tegangan normal ke F236 di setiap fase sebesar $110 \text{ V} / \sqrt{3}$. Selanjutnya tegangan diturunkan di bawah setting undervoltage relay ($99 \text{ V} / \sqrt{3}$). Setelah mencapai waktu tunda operasinya (5000 ms) maka UVR memberikan input ke F236 untuk memerintahkan PMT menutup. Dengan mengurangi waktu penutupan di atas dengan 5000 ms (waktu tunda kerja dari undervoltage relay) maka diperoleh waktu penutupan switching controller sebagai berikut:

Fase R : 163.90 ms

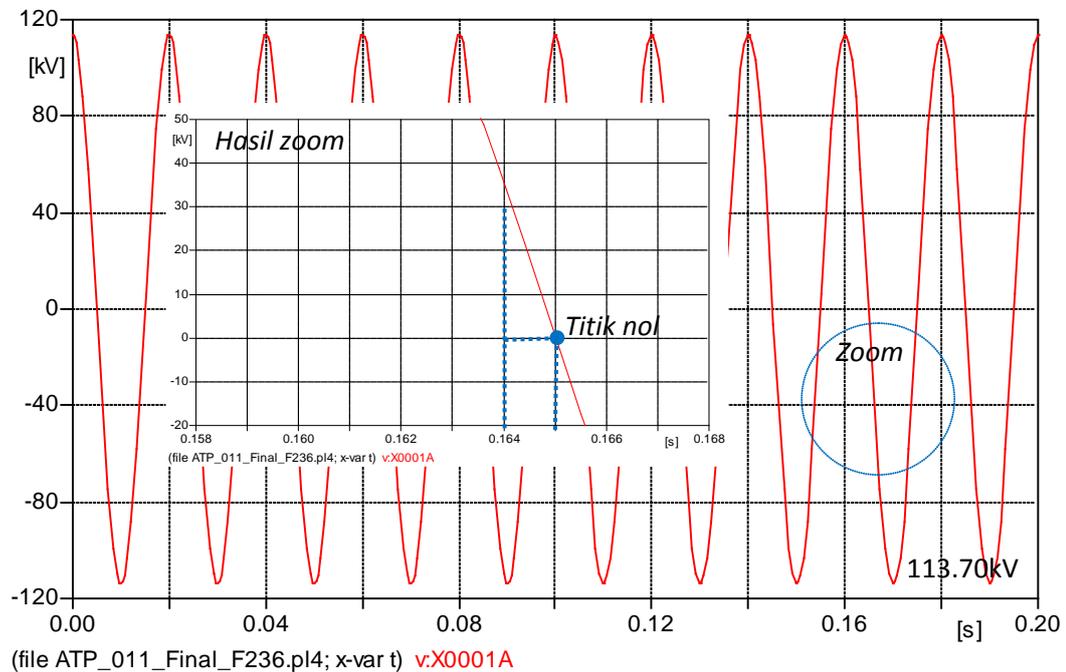
Fase S : 168.70 ms

Fase T : 163.90 ms

Sehingga diperoleh hasil simulasi seperti pada gambar 4.25 sampai dengan 4.30.

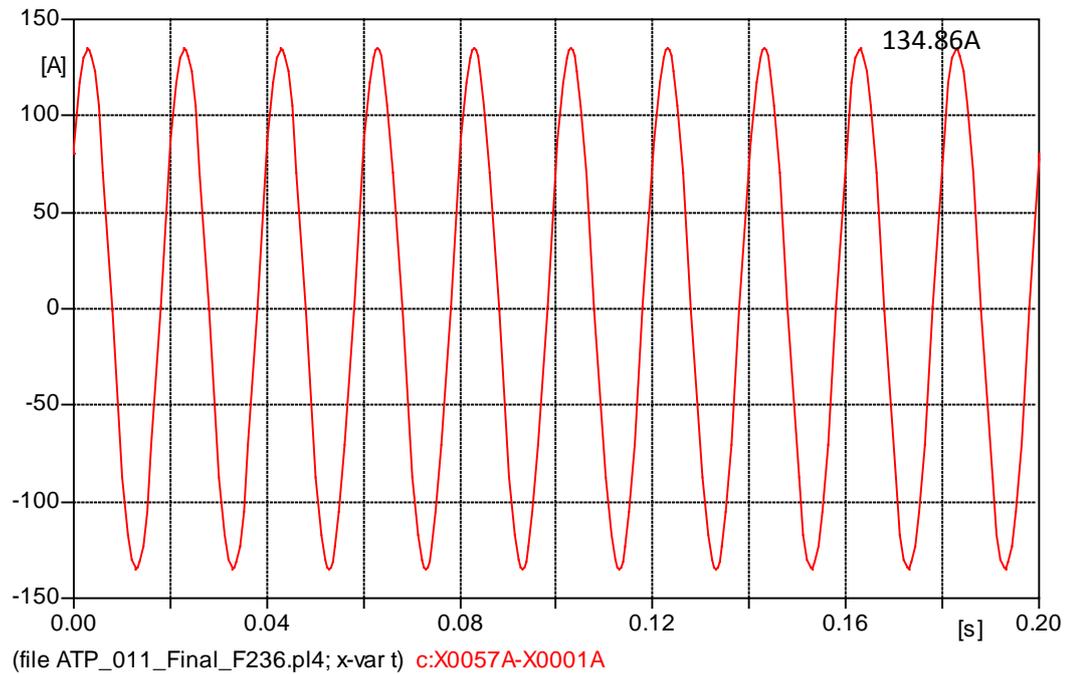


Gambar 4.24.
Hasil pengetesan waktu penutupan Controller F236 - Ex ABB
(Menggunakan Power Simulator – DOBLE F6150)



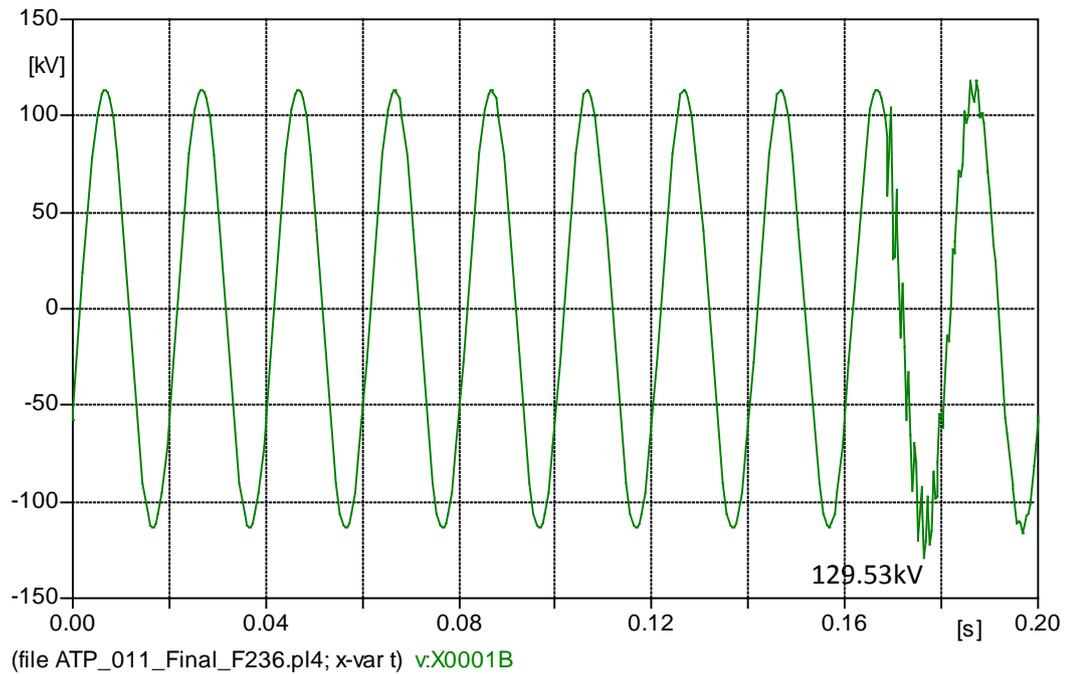
Gambar 4.25. Tegangan transient fase R dengan $T_c = 0.1639$ s

Gambar 4.25 adalah hasil simulasi transient tegangan fase R dengan waktu penutupan kontak PMT fase R adalah $T_c = 0.1639$ s. Waktu penutupan ini sangat dekat dengan titik nol gelombang tegangan fase R (0.165 s). Sehingga bisa dikatakan tidak terlihat lonjakan tegangan setelah switching dilakukan.



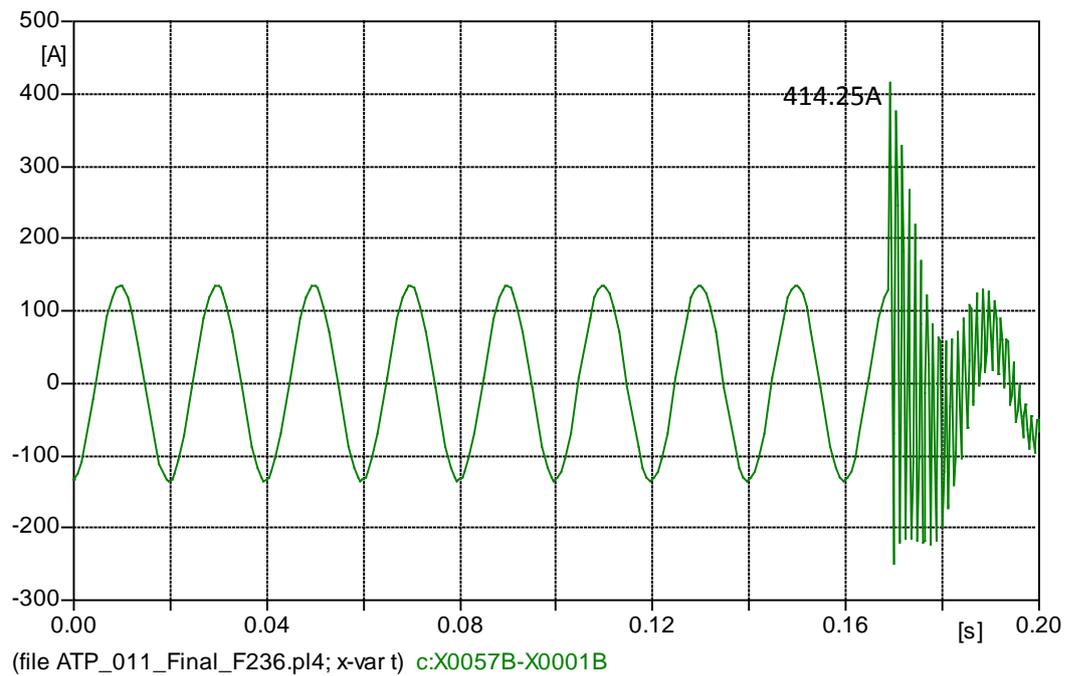
Gambar 4.26. Arus transient fase R dengan $T_c = 0.1639$ s

Gambar 4.26 adalah hasil simulasi untuk transient arus pada fase R dengan waktu penutupan kontak PMT adalah $T_c = 0.1639$ s. nilai arus tertinggi yang dicapai setelah switching adalah 134.86 A.



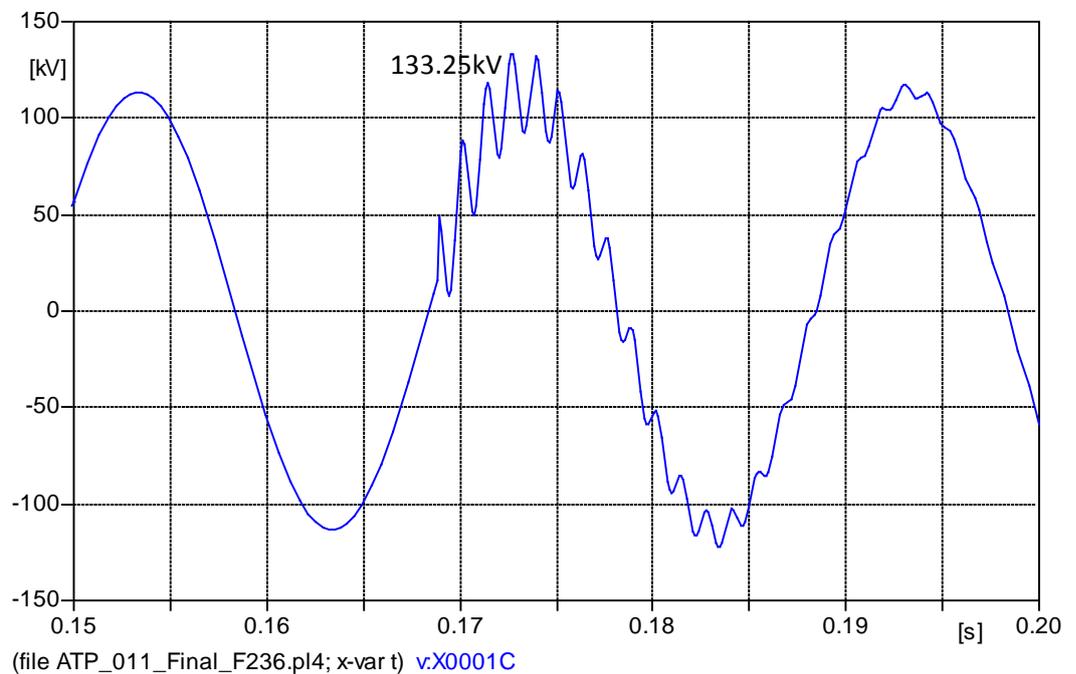
Gambar 4.27. Tegangan transient fase S dengan $T_c = 0.1687$ s

Gambar 4.27 adalah hasil simulasi transient tegangan fase S dengan waktu penutupan kontak PMT fase S adalah $T_c = 0.1687$, penutupan kontak PMT fase S terjadi 3.7 ms setelah puncak positif dari gelombang tegangan fase S terjadi. Nilai tegangan transient mencapai 129.53 kV (129530 Volt) atau 1.06 kali dari puncak tegangan fase nominal.



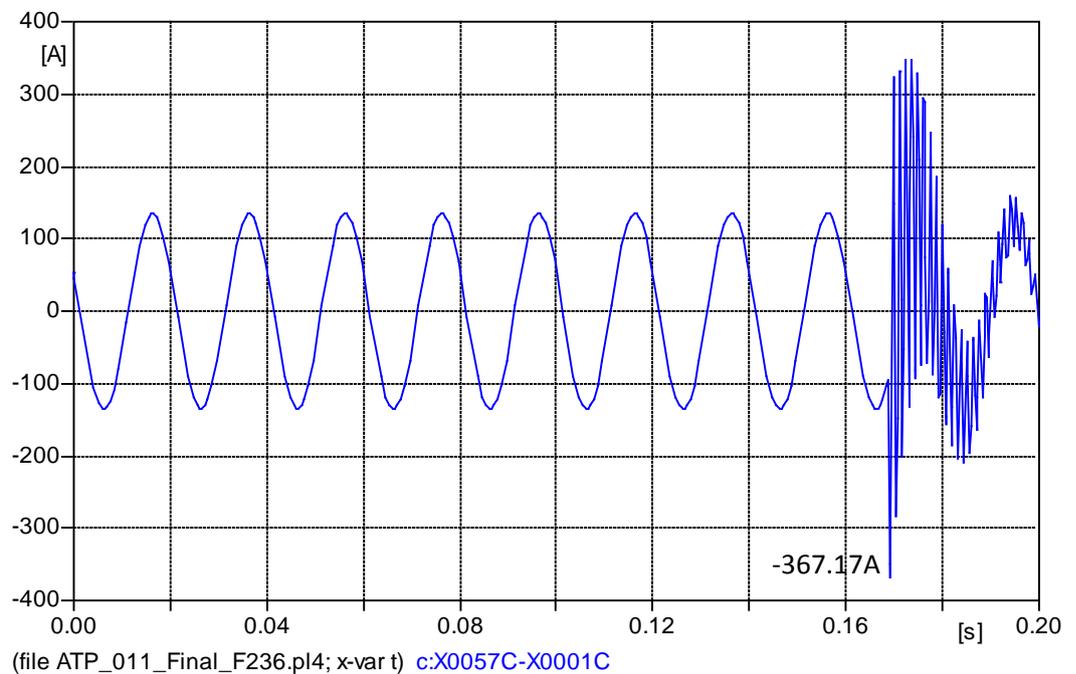
Gambar 4.28. Arus transient fase S dengan $T_c = 0.1687$ s

Gambar 4.28 adalah hasil simulasi untuk arus transient pada fase S dengan waktu penutupan kontak PMT pada fase ini adalah $T_c = 0.1687$ s. nilai arus tertinggi yang dicapai sesaat setelah switching adalah 414.25 A.



Gambar 4.29. Tegangan transient fase T dengan $T_c = 0.1639$ s

Gambar 4.29 adalah hasil simulasi tegangan transient fase T dengan waktu penutupan kontak PMT fase S adalah $T_c = 0.1639$ s. Waktu penutupan kontak PMT fase terjadi 0.4 ms setelah nilai nol dari gelombang fase T terjadi. Sehingga diperoleh nilai tegangan transient mencapai 133.25 kV (133250 Volt) atau 1.088 kali dari tegangan fase normal.



Gambar 4.30. Arus transient fase S dengan $T_c = 0.1639$ s

Gambar 4.30 adalah hasil simulasi untuk transient arus pada fase T dengan waktu penutupan kontak PMT pada fase ini adalah $T_c = 0.1639$ s. Nilai puncak gelombang arus tertinggi yang dicapai setelah switching adalah -367.17 A.

Tabel hasil simulasi untuk penutupan PMT yang tidak serempak di setiap fase-nya dirangkum dalam tabel 4.4.

Tabel 4.4. Hasil Simulasi penutupan PMT tak-serempak

Waktu penutupan	Tegangan Transient (kV)			Arus Transient (A)		
	R	S	T	R	S	T
$T_c = 0.1639$ s	113.70			134.86		
$T_c = 0.1687$ s		129.53			414.25	
$T_c = 0.1639$ s			133.25			-367.17

Dari tabel 4.4, terlihat bahwa tegangan transient tertinggi terjadi pada fase T ($T_c = 0.163.9s$) dengan puncak gelombang tegangan mencapai 131.53 kV atau sekitar 1,088 kali dari tegangan nominal. Sedangkan nilai arus transient tertinggi tercapai di fase S, sebesar 414.25A. Karena pada saat kontak PMT fase S menutup, gelombang arus berada pada titik maksimum.

C. PEMBAHASAN

Dari hasil simulasi, terlihat bahwa kondisi terburuk, tegangan dan arus transient tertinggi, terjadi bila penutupan kontak PMT pada saat 25 MVAR *capacitor bank* di-energize mendekati atau tepat menutup di puncak gelombang tegangan sistem. Dimana nilai tegangan transient bisa mencapai 1.69 kali tegangan nominal. Dan arus transient tertinggi mencapai 1165.92 Ampere.

Bila dilihat pada spesifikasi tegangan, pada dasarnya PMT mampu menahan kenaikan tegangan sampai dengan 325 kV atau puncak tegangan per fase adalah 265361 Volt (*power frequency withstand voltage*). Berarti kontak PMT setiap fasenya mampu menahan kenaikan tegangan puncak per fase sampai dengan 265361 Volt (2.167 kali tegangan fase nominal). Sehingga transient tegangan tertinggi yang mencapai 1.69 kali fase nominal masih di bawah ketahanan PMT.

Sehingga meskipun tanpa switching controller tidak menjadi masalah bagi peralatan switching, dalam hal ini PMT. Namun karena proses switching open-close capacitor bay hampir setiap hari dilakukan, maka agar waktu operasi (*life time*) dari PMT lebih lama, maka penambahan switching controller memang menjadi lebih baik.

Adapun transient arus yang mampu mencapai 1165.92 A, juga menjadi tidak masalah bagi PMT dengan arus nominal 3150 Ampere. Sementara ketahanan terhadap arus (*withstand capacity*) mencapai 40 kA selama 3 s. *Withstand capacity* adalah kemampuan peralatan terhadap arus transient selama selang waktu tertentu. Sedangkan kondisi steady state dari gelombang arus tercapai 0.06s (*3 cycles*) kemudian.

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Berdasarkan hasil simulasi disimpulkan:

1. Besar tegangan transient pada *hv capacitor bank switching* bisa mencapai 1.69 dari tegangan nominal.
2. Pengaturan penutupan kontak setiap fase dari PMT, dengan menggunakan *switching controller*, dapat mengurangi besarnya transient tegangan dan arus pada saat *hv capacitor bank switching*.
3. Dengan spesifikasi peralatan switching (PMT) yang terpasang cukup tinggi (withstand current mencapai 40 kA; 3s) maka dengan tegangan transient tegangan 1.69 dari tegangan nominal, maka tidak perlu penambahan *switching controller pada hv capacitor bank*.

B. Saran

1. Bagi peneliti selanjutnya yang akan mengambil judul berkaitan dengan capacitor switching dapat mempertimbangkan untuk menggunakan SOFTWARE lainnya agar dapat membandingkan a hasil simulasinya dengan ATP.
2. Agar ada penelitian selanjutnya, yang meneliti dampak dari *switching controller pada hv capacitor bank* pada peralatan di sisi tegangan rendah.

DAFTAR PUSTAKA

1. *The Impact of Switching Capacitor Banks with Very High Inrush Current on Switchgear; KEMA TIC and Schneider Electric, Study Committee A3; Preferential Subject 2 – 2012.*
2. *Shehab Abdulwadood Ali; Capacitor Banks Switching Transient in Power System; CSCanada, 2011.*
3. *Durga Bhavani Mupparty , Capacitor Switching Transient Modeling and Analysis on An Electrical Utility Distribution System Using Simulink Software, 2011.*
4. *C. D. Tsirekis and N. D Hatziangyriou; Control of Shunt Capacitors and Shunt Reactors Energization Transients, International Conference on Power System Transient; 2003*
5. *Electrical Transmission and Distribution Book, Chapter 8. Application of Capacitor To Power Systems, Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, Pennsylvania, 1964*
6. *Ramasamy Natarajan, Power System Capacitor, Taylor & Francis Group, LLC, 2005.*
7. *Alstom Brochure, Air Core reactor, Dry Type.*
8. *Trench Brochure, Reactor*
9. *C.J. dos Santos, D.V. Coury, M.C. Tavares, M. Oleskovicz, An ATP Simulation of Shunt Capacitor Switching in Electrical Distribution System*
10. *Kulas, S.J, Capacitor Switching Techniques, Warsaw University of Technology, Poland, 2009*
11. *Michael Beanland, Thomas Speas, Joe Rostron, “Pre-insertion Resistors in High Voltage Capacitor Bank Switching, 2004*
12. *Camm, E.H., “Shunt Capacitor Overvoltages and a Reduction Technique”, S&C Electric Company, Chicago, Illinois, 1999.*
13. *Controlled Switching – Buyer’s and Application Guide, ABB, 2010*

14. *Product Manual Switchsync F236 Rev.5, ABB, 2012*
15. *Laszlo Prikler, Hans Kr. Hoidalén; ATPDraw for Windows version 1.0 User's Manual, 1998.*
16. Central Station Engineers of The Westinghouse Electric Corporation, "*Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 4 ed.*", 1950, The Westinghouse Electric Corporation.
17. Edward Reid Edward Reid, W., "*Capacitor Application Consideration – Utility/ user Interface*", *IEEE*, 1991.
18. *Gopakumar, G., Yan, H., Mork, B.A., Mustaphi, K.K., "Shunt Capacitor Bank Switching Transient: A Tutorial and Case Study".*

LAMPIRAN

