



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISA DAN PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN  
MULTILEVEL STATCOM (STATIC SYNCHRONOUS  
COMPENSATOR) DALAM MENGURANGI GANGGUAN  
TEGANGAN KEDIP**

**SKRIPSI**

**AKHMAD SYAIFUL HIDAYAT**

**0606073745**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya  
nyatakan dengan benar.**

**Nama : Akhmad Syaiful Hidayat**

**NPM : 0606073745**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 21 Juni 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Akhmad Syaiful Hidayat  
NPM : 0606073745  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : Analisa dan Perancangan Sistem Pengendalian  
Multilevel STATCOM (Static Synchronous  
Compensator) Dalam Mengurangi Gangguan  
Tegangan Kedip

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.**

## DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr.Ing. Eko Adhi Setiawan, ST, MT ( )  
Penguji : Aji Nur Widyanto, ST, MT ( )  
Penguji : Ir. Agus R. Utomo, MT ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Juni 2010

## UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, puji syukur kepada Allah SWT atas rahmat dan kasih sayang-Nya sehingga penulis diberikan kemudahan, kesempatan, dan kelancaran dalam penyusunan skripsi dan proses sidang. Penulis sangat menyadari bahwa, tanpa bantuan dari berbagai pihak sangatlah sulit untuk menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih secara khusus kepada:

1. Kedua orang tua saya, kepada Ibu, Ibu, Ibu, dan Bapak atas dorongan semangat, doa yang tulus, dan kasih sayang yang diberikan dalam waktu yang sangat lama. Tak akan tergantikan apa yang telah kalian berikan pada anakmu ini. Serta kepada kakak dan adik saya. Kehadiran kalian memberi banyak makna dalam hidup, dan keinginan untuk bersama menjadi ~~besar~~”.
2. Professor Hirofumi Akagi, selaku pembimbing, pengawas, dan juga mentor saya dalam mengerjakan penelitian yang kemudian saya jadikan sebagai skripsi saya ini. Terima kasih atas ilmu dan kesempatan yang diberikan untuk dapat melakukan penelitian di laboratorium Akagi & Fujita. Serta kepada Associate Prof. Hideaki Fujita dan Assistant Prof. Makoto Hagiwara.
3. Bapak Dr. Ir. Dodi Sudiana, M.Eng. dan juga Bapak Dr. Abdul Muis yang telah membantu saya dalam proses administrasi dan pengurusan kelengkapan kelulusan studi saya tingkat S1. Tanpa koordinasi dan bantuannya, akan sulit bagi saya untuk dapat menunaikan azzam saya lulus tepat waktu ( 4 tahun)
4. Dr.Ing. Eko Adhi Setiawan, ST, MT selaku dosen pembimbing saya di Universitas Indonesia. Terima kasih atas masukan, saran dan tips yang diberikan dalam proses saya menuntut ilmu dan pengerjaan skripsi. Walaupun terpisah dalam jarak yang jauh, namun komunikasi dan bimbingan yang diberikan mampu memberi banyak peran dalam proses pengerjaan skripsi nantinya.

5. Teman – teman lab di Laboratorium Akagi & Fujita atas ilmu, keceriaan, sharing yang diberikan. Menjadi teman dan “keluarga” selama melakukan penelitian ini.
6. Teman – teman YSEP, PPI Tokodai, dan TIT lainnya atas kebersamaan yang diberikan sehingga mampu menjadi pemberi semangat “tambahan” dalam proses penelitian ini. Banyak pula pelajaran dan hikmah yang insya Allah saya dapatkan dari interaksi yang saya luangkan bersama kalian.
7. Seluruh teman –teman Teknik Elektro angkatan 2006, atas apa yang telah kita lalui bersama, kita *share* bersama, kita pelajari bersama, dan tentunya atas kebersamaan yang menjadikan kita dekat satu sama lain. Serta peminatan Gatrik yang solid.
8. Kepada pihak – pihak yang ikut membantu dalam proses pengerjaan skripsi ini yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu.

Akhir kata, semoga Allah SWT meridhoi dan merahmati atas apa yang telah saya lakukan selama ini. Semoga pula skripsi ini dapat menjadi salah satu rantai ilmu dan menjadi manfaat bagi yang lainnya.

“Tak ada gading yang tak retak” penulis sadar skripsi ini masih sangat jauh dari sempurna. Penulis sangat mengharapkan masukan, pendapat, saran, dan kritik untuk sebagai masukan untuk menyempurnakan pada kesempatan yang akan datang (akhmad.syaiful@gmail.com).

Tokyo, 21 Juni 2010

Penulis

## ABSTRAK

Nama : Akhmad Syaiful Hidayat  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Analisa dan Perancangan Sistem Pengendalian Multilevel STATCOM (Static Synchronous Compensator) Dalam Mengurangi Gangguan Tegangan Kedip

Daya reaktif yang berlebihan dalam sistem listrik menjadi salah satu penyebab penurunan kualitas daya. Permasalahan ini dapat diatasi dengan penggunaan *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) sebagai bagian dari kompensator daya reaktif. Skripsi ini menjelaskan mengenai STATCOM dengan pembahasan lebih khusus pada konfigurasi *multilevel* STATCOM serta metode pengendalian dan perancangannya. Metode pengendalian secara keseluruhan terdiri dari pengendalian daya reaktif dan tegangan kapasitor yang didukung pengendalian penyeimbangan tegangan kapasitor yang kemudian diterapkan pada *phase shift sinusoidal* PWM. Metode pengendalian juga dirancang untuk mengurangi gangguan tegangan kedip. Simulasi menunjukkan kemampuan operasi *multilevel* STATCOM dalam kondisi normal dan ketika tegangan kedip terjadi dengan mempertahankan pengaturan daya reaktif dan penyeimbangan tegangan kapasitor.

Kata kunci : *kompensator daya reaktif, STATCOM, tegangan kedip*

## ABSTRACT

Name : Akhmad Syaiful Hidayat  
Study Program : Electrical Engineering  
Title : Analysis and Control Design of Multilevel STATCOM (Static Synchronous Compensator) for Voltage Sags Mitigation

Excessive reactive power in electrical system has becomes one factor that contribute to the power quality problems. As a reactive power compensator, *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) has ability to control excessive reactive power. This book describes STATCOM especially for Multilevel STATCOM configuration with focussed on dicussion of the control method and design. The whole control are consist of reactive power and capacitor voltage control combining with the voltage balancing control for capacitor voltage implemented with phase-shifted unipolar sinusoidal PWM. This control method also allow for voltage sags mitigation. Based on simulation, multilevel STATCOM has ability to kept reactive power compensation and capacitor voltage balancing during normal operation as well as when voltage sagss appear.

Keywords : *reactive power compensator, STATCOM, voltage sags.*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Pembatasan Masalah	3
1.4 Sistematika Penulisan	3
<b>BAB 2 STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR (STATCOM)</b>	<b>4</b>
2.1 Permasalahan Daya Reaktif	4
2.2 Kompensator Daya Reaktif	5
2.3 Static Synchronous Compensator (STATCOM)	7
2.4 Prinsip Kerja STATCOM	8
2.5 Multilevel STATCOM	12
2.5.1 Pendahuluan Mutlievel STATCCOM	12
2.5.2 Prinsip Kerja Multilevel STATCOM	15
2.6 Metode Pengendalian STATCOM	16
2.7 Permasalahan Tegangan Kedip	20
2.7.1 Faktor Penyebab Tegangan Kedip	20
2.7.2 Pengaruh Tegangan Kedip	21
2.8 Parameter Operasi Kerja STATCOM	22
2.9 Perangkat Lunak PSCAD/EMTC	23
<b>BAB 3 PERANCANGAN PENGENDALIAN MULTILEVEL STATCOM</b>	<b>24</b>

3.1	Pemodelan STATCOM	24
3.2	Perancangan Pengendalian	26
3.2.1	Pengendalian Daya Reaktif dan Tegangan Kapasitor	26
3.2.2	Pengendalian Penyeimbangan Tegangan Kapasitor	29
3.2.2.1	Pengendalian Penyeimbangan Antar Fasa	29
3.2.2.2	Pengendalian Penyeimbangan Individu	33
3.2.3	PWM Pergeseran Fasa Sinusoidal (Phase-Shift Sinusoidal PWM)	34
3.3	Diagram Pengendalian	35
3.4	Sistem Pengendalian	37
	<b>BAB 4 SIMULASI OPERASI MULTILEVEL STATCOM</b>	<b>38</b>
4.1	Rangkaian Simulasi	38
4.2	Simulasi Operasi Multilevel STATCOM	39
4.2.1	Simulasi Kondisi Normal Operasi	40
4.2.1.1	Simulasi Operasi Mode Kapasitif ( $q^* = 15\text{kVAR}$ )	40
4.2.1.2	Simulasi Operasi Mode Induktif ( $q^* = -15\text{kVAR}$ )	41
4.2.1.3	Simulasi Operasi Keadaan Perpindahan (Induktif-Kapasitif)	42
4.2.2	Simulasi Kondisi Munculnya Tegangan Kedip	44
4.2.2.1	Simulasi Tanpa Pengendali	44
4.2.2.2	Simulasi Kondisi Tegangan Kedip 20%	47
4.2.2.3	Simulasi Kondisi Tegangan Kedip 50%	48
	<b>BAB 5 KESIMPULAN</b>	<b>51</b>
	<b>DAFTAR REFERENSI</b>	<b>52</b>
	<b>LAMPIRAN</b>	<b>54</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Parameter Rangkaian Simulasi

39



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konfigurasi Kompensator Daya Reaktif	6
Gambar 2.2	Blok Diagram STATCOM	9
Gambar 2.3	Hubungan $V_s$ dan $V_c$ Untuk Pengiriman Daya Aktif	10
Gambar 2.4	Prinsip Kerja STATCOM	12
Gambar 2.5	Konfigurasi Rangkaian MMC	13
Gambar 2.6	Konfigurasi Rangkaian Konverter Bertingkat dan Gelombang Keluarannya	16
Gambar 2.7	Dasar Arsitektur Pengendalian STATCOM	18
Gambar 2.8	Alur Proses Pengendalian STATCOM	19
Gambar 2.9	Tegangan Kedip atau <i>Voltage Sags</i>	20
Gambar 3.10	Hubungan STATCOM dengan Sumber	25
Gambar 3.11	Diagram Sederhana Hubungan STATCOM dengan Sumber	25
Gambar 3.12	Diagram Fasor Teknik Neutral Shift Rangkaian 3-fasa	30
Gambar 3.13	Blok Pengendalian Penyeimbangan Antar Fasa ( $V_{O^*}$ )	33
Gambar 3.14	Blok Pengendalian Penyeimbangan Individu	34
Gambar 3.15	PWM Pergeseran Fasa Konfigurasi 3-sel 1-fasa	35
Gambar 3.16	Blok Diagram Pengendalian <i>Multilevel</i> STATCOM	36
Gambar 3.17	Sistem Pengendalian <i>Multilevel</i> STATCOM 6-sel	37
Gambar 4.18	Rangkaian Simulasi <i>Multilevel</i> STATCOM, 200V, 15-kVAR	38
Gambar 4.19	Grafik Hasil Operasi Mode Kapasitif, $q^* = 15\text{kVAR}$ , $v_C = 30\text{V}$	40
Gambar 4.20	Grafik Hasil Operasi Mode Kapasitif, $q^* = -15\text{kVAR}$ , $v_C = 30\text{V}$	42
Gambar 4.21	Grafik Hasil Operasi Keadaan Perpindahan dari Induktif ke Kapasitif, $q^* = -15\text{kVAR}$ ke $15\text{ kVAR}$ , $v_C = 30\text{V}$	43
Gambar 4.22	Grafik Kondisi Tegangan Kedip Muncul Selama 100ms pada Mode Kapasitif, $q^* = 15\text{kVAR}$ , $v_C = 30\text{V}$	45
Gambar 4.23	Grafik Kondisi Tegangan Kedip 20% selama 100ms, Mode Kapasitif, $q^* = 15\text{kVAR}$ , $v_C = 30\text{V}$	47
Gambar 4.24	Grafik Kondisi Tegangan Kedip 50% selama 100ms, Mode Kapasitif, $q^* = 15\text{kVAR}$ , $v_C = 30\text{V}$	49

## BAB 1

### PENDAHULUAN

#### 1.1. Latar Belakang

Energi listrik merupakan energi utama yang digunakan hampir pada seluruh sisi kehidupan manusia. Seiring kemajuan zaman, permintaan akan energi listrik semakin meningkat. Energi listrik tersebut digunakan untuk memasok beban listrik yang semakin banyak dengan perbedaan karakteristik yang ada. Kedua hal ini ternyata mempengaruhi sistem tenaga listrik yang digunakan untuk menmasok energi listrik ke konsumen.

Pengaruh dari karakteristik beban ini salah satunya terletak pada besarnya daya reaktif pada sistem kelistrikan. Pada dasarnya, daya reaktif merupakan komponen daya yang diakibatkan karakteristik beban yang memiliki sifat induktif dan kapasitif. Semakin besar beban kapasitif yang terpasang akan menyebabkan sistem kelebihan daya reaktif yang bersifat kapasitif. Sementara semakin besar beban induktif yang terpasang akan menyebabkan sistem kelebihan daya reaktif yang bersifat induktif. Faktor ini kemudian dapat mempengaruhi sistem yang dapat menurunkan jumlah daya nyata yang dikirim ke beban dan memperburuk faktor daya.

Solusi untuk mengatasi besarnya daya reaktif dapat dilakukan dengan menambahkan peralatan yang berfungsi sebagai beban tambahan beban pada sistem. Metode ini dapat kita lihat pada penggunaan *capacitor bank* yang digunakan untuk menurunkan daya reaktif yang bersifat induktif. Akan tetapi, mengingat sifat beban listrik yang dinamis hal ini akan sulit untuk dilakukan terhadap sistem yang memiliki beban dinamis. Apabila pada suatu saat sistem memiliki beban kapasitif yang besar, akan menyebabkan sistem memiliki nilai daya reaktif yang besar sehingga menurunkan kualitas sistem.

Salah satu solusi yang sering digunakan untuk mengatasi masalah daya reaktif adalah dengan menggunakan kompensator daya reaktif. Kompensator daya reaktif memiliki kemampuan untuk mengatur besarnya daya reaktif dan dapat bersifat fleksibel tergantung pada kondisi beban yang bekerja. Pembahasan teknologi kompensator daya reaktif pertama kali di kenalkan di dunia pada tahun 1980-an dengan menerapkan teknik *Voltage Source Converter (VSC)*. Seiring perkembangan teknologi dan kebutuhan terhadap kompensator daya reaktif, perkembangan teknologi ini semakin berkembang hingga melahirkan beberapa variasi dan konfigurasi yang berbeda. Salah satu jenis dari peralatan ini adalah *Static Synchronous Compensator (STATCOM)*.

Kemampuan STATCOM dalam mengatasi permasalahan daya reaktif menjadikan STATCOM sebagai pilihan yang banyak digunakan. Selain itu dengan teknologi elektronika daya yang terus berkembang, STATCOM ikut mengalami perkembangan baik dari sisi konfigurasi, komponen, maupun teknik pengendalian yang digunakan. Kehandalan dan kemampuan STATCOM untuk memiliki kemampuan dalam menghadapi masalah gangguan listrik ikut menjadi salah satu isu penting dalam pembahasan selain kemampuan pengaturan daya reaktif.

## **1.2 Tujuan Penelitian**

Penyusunan skripsi ini memiliki tujuan untuk membahas mengenai *multilevel* STATCOM yang merupakan perkembangan terbaru dari teknologi STATCOM dilihat dari sisi konfigurasi rangkaian. Pembahasan akan terfokus pada penjelasan, dasar konfigurasi, perancangan teknik pengendalian dan simulasi untuk melihat kemampuan kerja *multilevel* STATCOM. Diharapkan dari pembahasan skripsi ini mampu memberikan pemahaman lebih lanjut mengenai perkembangan STATCOM dengan konfigurasi *multilevel* STATCOM.

Selain itu, skripsi ini juga berfungsi untuk memaparkan perancangan metode pengendalian dan simulasi pada *multilevel* STATCOM untuk dapat mengkompensasi daya reaktif dan menjaga keseimbangan tegangan kapasitor. Pada bagian ini juga akan dibahas mengenai kemampuan dari pengendalian

multilevel STATCOM untuk mampu mengurangi dampak munculnya tegangan kedip.

### 1.3 Pembatasan Masalah

Pada skripsi ini masalah dibatasi pada konfigurasi *multilevel* STATCOM dengan konfigurasi bintang yang tersusun dari rangkaian H-bridge konverter dan kapasitor sebagai media penyimpan energi. Pembahasan dilakukan terkait dengan operasi kerja, fungsi, konfigurasi, dan metode pengendalian untuk menjalankan fungsi rangkaian *multilevel* STATCOM dalam pengendalian kelebihan daya reaktif dan faktor daya pada sistem serta kemampuan dalam gangguan tegangan kedip.

### 1.4 Sistematika Penulisan

Penyusunan skripsi ini dilakukan dengan menggunakan metode studi literatur yang dilanjutkan metode perancangan dan tahapan simulasi. Sistematika penyusunan skripsi terbagi dalam 5 bab dengan pembahasan yang bersifat individu sehingga diharapkan untuk mudah dipahami. Sistematika penulisan tersebut antara lain :

- a. Bab 1 – Pendahuluan. Pada bab ini menjelaskan latar belakang, batasan masalah, dan sistematika penulisan.
- b. Bab 2 – Landasan Teori. Pada bab ini menjelaskan mengenai teori – teori yang membahas dasar teori yang digunakan dalam menyusun skripsi ini.
- c. Bab 3 – Perancangan Metode Pengendalian. Bab ini menjelaskan mengenai perancangan pengendalian yang diterapkan pada skripsi ini.
- d. Bab 4 – Simulasi dan analisa. Bab ini memaparkan tahapan dan hasil simulasi beserta analisa mengenai hasil.
- e. Bab 5 - Kesimpulan dan Saran. Bab ini menjelaskan kesimpulan yang dapat diambil dan juga saran terhadap skripsi ini.

## BAB 2

### STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR (STATCOM)

#### 2.1 Permasalahan Daya Reaktif

Transmisi listrik merupakan salah satu bagian yang mengambil peran penting dalam sistem kelistrikan. Hal ini dikarenakan transmisi listrik memiliki fungsi sebagai penyambung antara sisi pembangkit dengan sisi pengguna atau beban. Kegagalan pada sisi transmisi listrik akan menyebabkan putusnya aliran listrik yang mengakibatkan kerugian yang besar pada sisi konsumen. Selain itu, kegagalan operasi listrik juga dapat berdampak besar terhadap sisi pengirim yang dapat menurunkan atau merusak kinerja pembangkit. Oleh karena itu, kebutuhan transmisi listrik untuk dapat beroperasi secara konsisten menjadi hal penting yang terus diupayakan.

Selain harus memiliki kinerja yang konsisten, transmisi listrik juga menghadapi permasalahan lain yang mengakibatkan turunnya kinerja sistem. Salah satu masalah yang menjadi fokus utama adalah permasalahan kualitas listrik. Pembahasan kualitas listrik umumnya membahas parameter yang berisikan tentang kehandalan operasi sistem, variasi nilai tegangan, keadaan *transient* tegangan dan arus, nilai harmonik, dan lain - lain. Permasalahan ini menjadi faktor yang mengambil peran besar dalam permasalahan listrik secara keseluruhan, dengan nilai daya reaktif pada sistem menjadi salah satu penyebab utama.

Daya reaktif yang berlebihan pada sistem menyebabkan penurunan kinerja transmisi listrik. Hal ini dikarenakan daya reaktif akan mempengaruhi jumlah daya nyata yang akan digunakan beban dan ikut menentukan besarnya faktor daya yang bekerja pada sistem. Semakin besar nilai daya reaktif maka akan membuat nilai faktor daya dan daya nyata yang dikirim ke beban semakin menurun yang nantinya akan menurunkan efisiensi sistem.

Selain itu, daya reaktif juga dapat membawa efek negatif lain pada sistem transmisi listrik. Daya reaktif dapat menjadikan sistem berada pada kondisi “kelebihan” beban yang nantinya mengakibatkan tegangan sistem akan turun. Hal ini dikarenakan daya yang dikonsumsi menjadi lebih tinggi namun pasokan daya yang berasal dari sumber relatif tetap. Sehingga dapat dikatakan besarnya nilai daya reaktif yang bekerja pada sistem menjadi salah satu parameter penting untuk diperhatikan. Oleh karena itu diperlukan adanya pengaturan jumlah daya reaktif yang terdapat pada sistem.

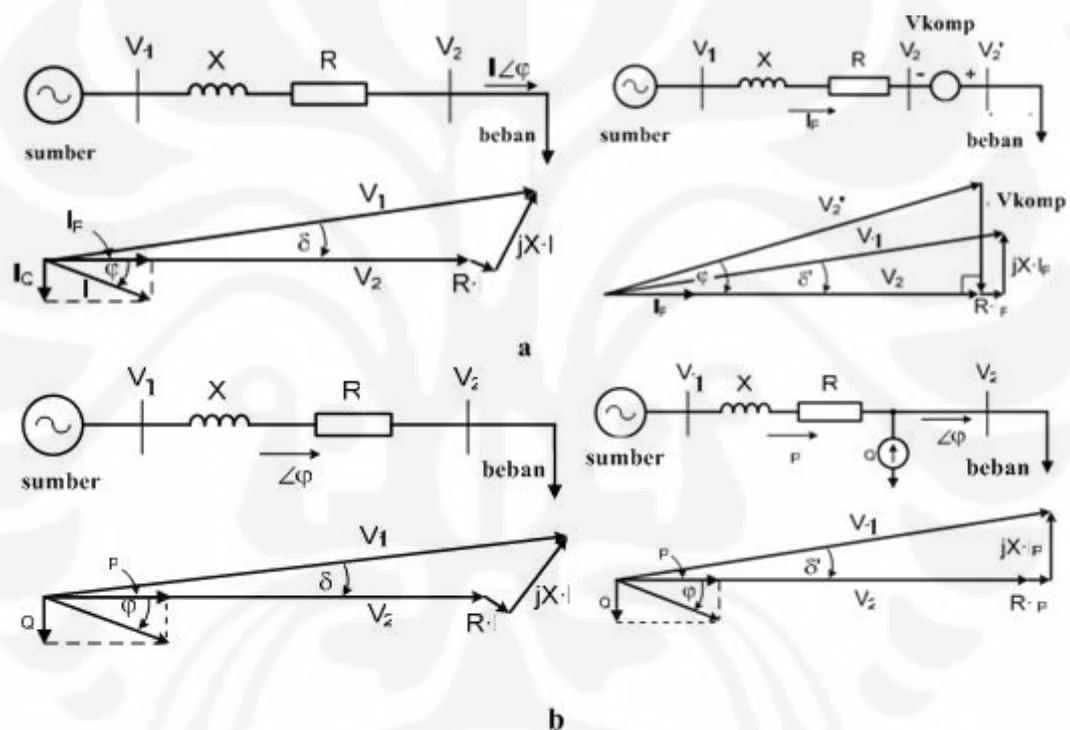
## 2.2 Kompensator Daya Reaktif

Kompensator daya reaktif atau dikenal dengan nama lain kompensator *VAR* didefinisikan sebagai peralatan yang berfungsi untuk pengaturan jumlah daya reaktif untuk memperbaiki operasi sistem tenaga listrik AC. Kompensator daya reaktif tergolong dalam peralatan *Flexible AC Transmission System* (FACTS) yang mampu beroperasi secara fleksibel dalam mengatur aliran daya pada sistem transmisi.

Penggunaan kompensator daya reaktif dalam sistem transmisi listrik telah terbukti mampu memperbaiki kualitas dan kehandalan sistem kelistrikan. Hal ini dikarenakan selain mengatur jumlah daya reaktif dalam sistem, kompensator daya reaktif juga memiliki fungsi untuk pengaturan dan penyeimbangan level tegangan pada jaringan. Berikut adalah beberapa fungsi dan kegunaan kompensator daya reaktif dalam memperbaiki kualitas listrik :

1. Meningkatkan besarnya daya aktif yang mampu dikirimkan sistem,
2. Menjaga kestabilan tegangan di tiap level pada sistem transmisi,
3. Mampu meningkatkan kinerja sistem *High Voltage Direct Current* (HVDC) pada sisi terminal konverter (AC-DC),
4. Meningkatkan efisiensi transmisi listrik,
5. Mampu mengontrol keadaan *steady-state* dan kelebihan tegangan sementara,

Pada bagian perancangan, rangkaian kompensator daya reaktif dapat dibagi dalam dua kategori, yaitu kompensator daya reaktif dengan konfigurasi seri dan paralel (shunt). Keduanya dapat disusun dengan menggunakan rangkaian tegangan sebagai sumbernya atau *Voltage-Sourced Converter (VSC)* maupun arus sebagai sumbernya atau *Current-Sourced Control (CSC)*. Pada keadaan beroperasi, keduanya akan menyesuaikan diri dengan keadaan beban yang bersifat induktif atau kapasitif sehingga mampu mengatur daya reaktif pada sistem. Sehingga dengan pengaturan ini, kompensator daya reaktif dapat meningkatkan faktor daya untuk perbaikan kualitas daya.



Gambar 2.1 Konfigurasi Kompensator Daya Reaktif : a) Konfigurasi Seri b) Konfigurasi Paralel

Prinsip kerja dari kompensator daya reaktif yang tersusun seri dan paralel dapat terlihat pada gambar 2.1. Ketika sistem tidak memiliki kompensator daya reaktif, pengaruh besarnya daya reaktif akan dapat menurunkan besarnya daya nyata ( $p$ ) yang dapat digunakan. Kompensator daya reaktif dengan konfigurasi seri menempatkan komponen sumber tegangan atau arus yang tersusun secara seri terhadap sistem. Sementara kompensator daya reaktif dengan konfigurasi paralel

menempatkan komponen sumber tegangan atau arus yang disusun paralel terhadap sistem.

Manfaat dan fungsi dari pengendalian daya reaktif ikut mendukung perkembangan yang signifikan dalam teknologi kompensator daya reaktif. Secara umum perkembangan ini dapat dilihat dari teknologi yang digunakan dan hubungan antara kompensator daya reaktif dengan sumber, terhubung secara seri atau paralel. Sementara ditinjau dari sisi teknologi yang digunakan, perkembangan teknologi kompensator daya reaktif berkaitan erat dengan perkembangan pesat komponen elektronika daya dan metode pengendalian yang digunakan.

Perkembangan komponen elektronika daya saat ini telah mampu mencapai terciptanya komponen yang memiliki nilai kerja tinggi dan handal. Dengan menggunakan komponen elektronika daya, kompensator daya reaktif akan memiliki kapasitas kerja yang tinggi dengan hasil optimal. Salah satu perkembangan terbaru dari kompensator daya reaktif ini adalah *Static Synchronous Compensator* (STATCOM).

### **2.3 Static Synchronous Compensator (STATCOM)**

STATCOM dikategorikan sebagai teknologi baru dalam bidang kompensator daya reaktif. Pada rangkaiannya, STATCOM menggunakan rangkaian konverter yang terdiri dari komponen elektronika daya dan juga media penyimpan energi untuk pengaturan daya reaktif. Pada sisi pengendalian, STATCOM sudah menerapkan skema pengendalian secara digital sehingga memungkinkan kinerja yang optimal dan penerapan teknik pengendalian dengan nilai operasi lebih tinggi.

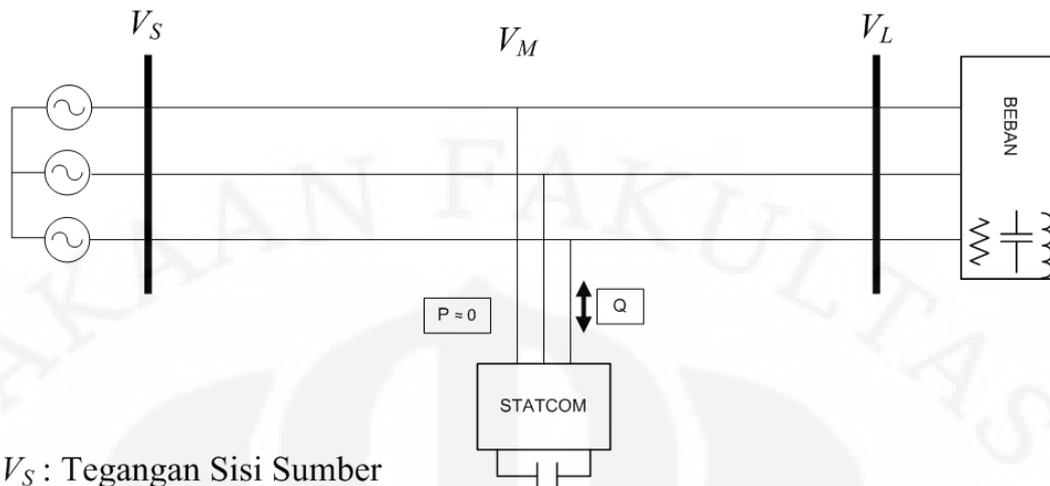
Selain memiliki fungsi untuk mengendalikan daya reaktif, STATCOM juga memiliki fungsi dalam memperbaiki parameter lain yang berhubungan dengan kualitas listrik. Sebagai contoh, STATCOM mampu menghasilkan nilai harmonik yang kecil dan nilai tegangan AC yang terkendali sebagai keluarannya. Nilai tegangan keluaran ini dapat mengendalikan nilai - nilai arus reaktif dengan menggunakan metode penyaklaran. Selain itu STATCOM juga mampu berfungsi untuk mengkompensasi beberapa masalah lain seperti *flicker*, impedansi hantaran pada sistem transmisi, dan perbedaan sudut fasa.

Berdasarkan rangkaiannya, STATCOM dapat dibagi menjadi 2 bagian, yaitu STATCOM dengan tegangan sebagai sumbernya dan STATCOM dengan arus sebagai sumbernya. Keduanya memiliki fungsi dan prinsip yang sama dalam beroperasi. Perbedaan antara keduanya terletak pada sumber yang digunakan, yaitu sumber tegangan dan arus.

Pada sisi aplikasi, konfigurasi umum STATCOM yang digunakan adalah rangkaian yang menggunakan sumber tegangan (VSC). Hal ini dikarenakan, VSC memiliki kelebihan dibandingkan dengan CSC pada sisi biaya dikarenakan penggunaan komponen yang lebih sederhana. Konfigurasi STATCOM dengan struktur ini menggunakan media penyimpan energi yang digunakan dalam pengaturan daya reaktif melalui teknik konverter. Rangkaian konverter yang digunakan umumnya tersusun atas kombinasi dari komponen elektronika daya yang mampu berfungsi sebagai saklar otomatis (IGBT, GTO, IGCT, dan lain lain) dengan dioda yang dihubungkan secara paralel. Kombinasi ini memungkinkan dilakukannya teknik konverter AC/DC dan DC/AC untuk mengubah sinyal AC menjadi DC dan sebaliknya.

#### **2.4 Prinsip Kerja STATCOM**

Pengaturan daya reaktif oleh STATCOM terjadi dengan cara membandingkan besarnya nilai tegangan terminal antara STATCOM dengan sistem. Apabila tegangan STATCOM bernilai lebih rendah dari sistem maka STATCOM akan menyerap daya reaktif dari sistem. Sementara apabila tegangan STATCOM bernilai lebih tinggi dari sistem maka STATCOM akan menghasilkan daya reaktif ke sistem. Dengan pengaturan ini STATCOM mampu untuk mengkompensasi jumlah daya reaktif yang ada pada sistem. Blok diagram STATCOM secara umum dapat dilihat pada gambar 2.2.



$V_S$  : Tegangan Sisi Sumber  
 $V_M$  : Tegangan Sisi Jaringan  
 $V_L$  : Tegangan Sisi Beban

Gambar 2.2 Blok Diagram STATCOM

Persamaan aliran daya pada sistem yang menggunakan STATCOM dapat dinyatakan pada persamaan berikut ini :

$$S = 3 \frac{V_s V_c}{X_L} \sin \alpha - j3 \left( \frac{V_s V_c}{X_L} \cos \alpha - \frac{V_s^2}{X_L} \right) = P - jQ \quad (2.1)$$

S = Daya kompleks (VA)

$V_c$  = Tegangan terminal STATCOM

P = Daya aktif (W)

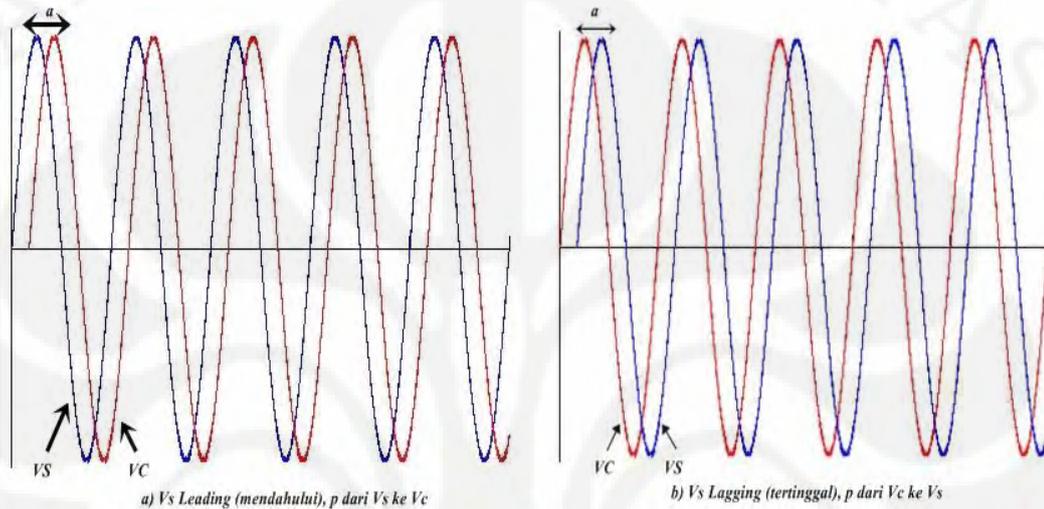
$X_L$  = reaktansi kebocoran (kabel) =  $\omega L$

Q = Daya reaktif (VAR)

$\alpha$  = beda fasa antara  $V_s$  dan  $V_c$

$V_s$  = Tegangan dari grid/sistem

Dalam persamaan tersebut terlihat bahwa variasi  $\alpha$  akan mempengaruhi aliran daya aktif antara sistem dengan STATCOM. Untuk nilai  $\alpha$  tertinggal (lagging), maka daya aktif akan mengalir dari  $V_C$  ke  $V_S$ . Sementara untuk nilai  $\alpha$  mendahului (leading) maka daya aktif akan mengalir dari  $V_S$  ke  $V_C$ . Pada keadaan  $V_S$  memiliki fasa yang sama dengan  $V_C$  ( $\alpha = 0$ ), maka daya aktif akan bernilai nol.



Gambar 2.3 Hubungan  $V_S$  dan  $V_C$  Untuk Pengiriman Daya Aktif

Nilai ( $\alpha = 0$ ) akan didapatkan ketika sistem berada pada keadaan stabil (steady-state). Dari sini kita mendapatkan persamaan untuk menentukan besarnya nilai daya reaktif yang bekerja :

$$Q = \frac{V_S}{X_L} (V_C - V_S) \quad (2.2)$$

Dari persamaan di atas dapat kita lihat bahwa nilai daya reaktif yang ada pada sistem ditentukan dari besarnya nilai  $V_S$ ,  $V_C$  dan  $X_L$ . Ketika  $V_C$  bernilai lebih besar dari  $V_S$  maka daya reaktif yang ada pada sistem akan bernilai positif. Hal ini mengindikasikan bahwa daya reaktif bersifat induktif. Sementara apabila nilai  $V_S$  bernilai lebih besar dari nilai  $V_C$  maka daya reaktif akan bernilai negatif yang menandakan sistem memiliki daya reaktif yang bersifat kapasitif.

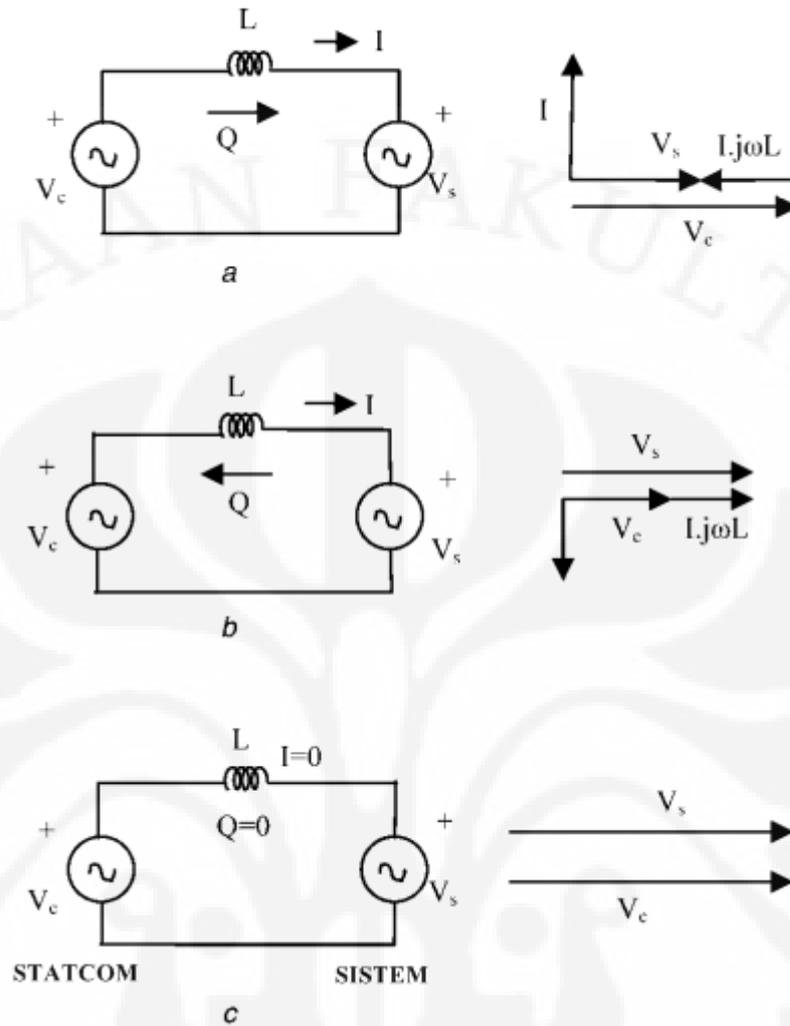
Perubahan nilai daya reaktif yang ada pada sistem inilah yang kemudian menjadi dasar pengoperasian STATCOM. Hal ini menjadikan STATCOM memiliki 3 jenis operasi kerja, yaitu :

1. Keadaan operasi Kapasitif (Mode Kapasitif)
2. Keadaan operasi Induktif (Mode Induktif)
3. Keadaan operasi tanpa beban

Untuk keadaan operasi tanpa beban, STATCOM tidak akan membangkitkan atau menyerap daya reaktif. Pada keadaan ini besarnya nilai  $V_C$  dan  $V_S$  adalah sama ( $V_S = V_C$ ). Hal ini mengakibatkan daya reaktif yang berada pada STATCOM akan bernilai nol. Dalam persamaan 2.2 juga terlihat apabila  $V_S$  dan  $V_C$  bernilai sama, maka akan dihasilkan nilai daya reaktif yang bernilai nol.

Pada saat  $V_C$  bernilai lebih besar dari  $V_S$ , STATCOM berada dalam keadaan operasi kapasitif. Pada kondisi ini, STATCOM menganggap adanya reaktansi induktif di sisi terminal yang terhubung dengan sistem. Hal ini akan mengakibatkan daya reaktif mengalir dari STATCOM menuju sistem. Sementara apabila  $V_S$  bernilai lebih besar dari  $V_C$  maka STATCOM akan menganggap sistem sebagai reaktansi kapasitif. Hal ini akan mengakibatkan daya reaktif mengalir dari sistem menuju STATCOM. Dalam kondisi ini STATCOM dikatakan beroperasi dalam kondisi mode induktif.

Untuk lebih memperjelas mengenai prinsip kerja dasar dan juga keadaan operasi STATCOM dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Prinsip Kerja STATCOM : a) keadaan operasi Kapasitif, b) keadaan operasi Induktif, c) keadaan operasi tanpa beban

## 2.5 Multilevel STATCOM

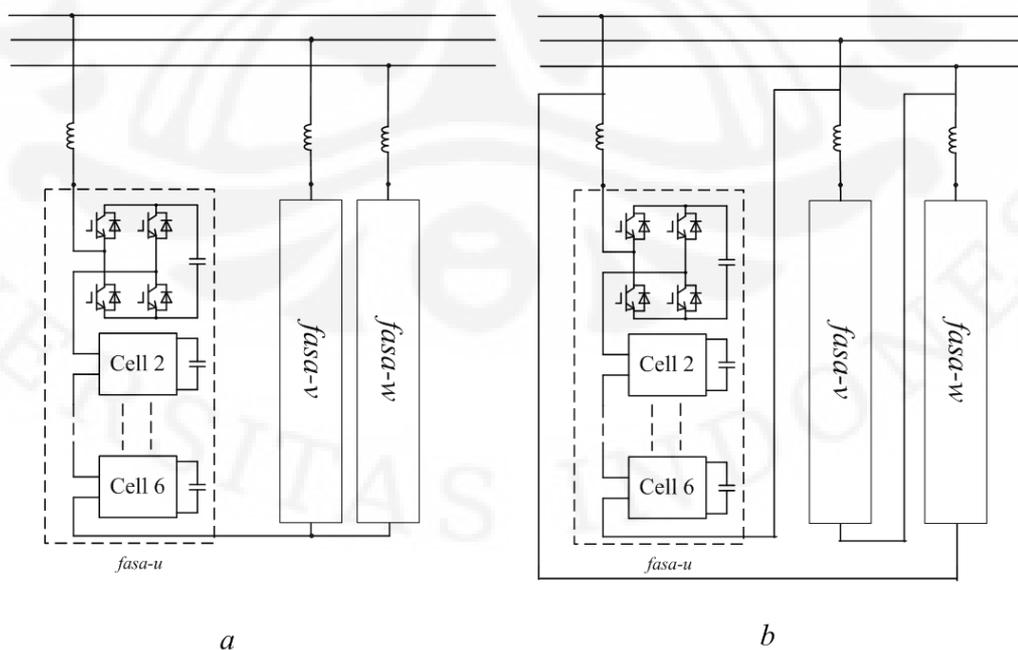
### 2.5.1 Pendahuluan Multilevel STATCOM

*Multilevel* STATCOM merupakan perkembangan lebih lanjut dari teknologi STATCOM. Perancangan konfigurasi ini dilandasi dari perkembangan teknologi transmisi listrik saat ini yang memerlukan peralatan listrik dengan kemampuan kerja lebih tinggi seiring meningkatnya nilai operasi listrik pada level transmisi. Akan tetapi, seiring kenaikan nilai operasi listrik menuntut kenaikan tingkat operasi yang ada pada STATCOM yang menyebabkan penggunaan komponen

lebih tinggi dan lebih mahal. Hal ini lah yang mnjadi salah satu alasan yang coba diatasi melalui konfigurasi ini.

Konsep utama dari *multilevel* STATCOM adalah dengan menerapkan teknik *Modular Multilevel Converter* (MMC) pada STATCOM. Penerapan teknik MMC dianggap mampu meningkatkan kemampuan STATCOM dalam hal pengendalian daya reaktif. Selain itu, konfigurasi ini memungkinkan untuk menghilangkan pemakaian transformator penurun tegangan dari sistem ke rangkaian yang mahal, berat, dan membutuhkan area yang besar. Sehingga menjadikan STATCOM lebih murah, ringan, dan memiliki ukuran lebih kecil. Dengan menerapkan konsep ini, STATCOM diharapkan mampu bekerja pada level tegangan yang tinggi dan memiliki kinerja yang baik dalam mengatasi permasalahan daya reaktif pada sistem.

Konfigurasi MMC pada STATCOM umumnya terdiri dari kapasitor yang berfungsi sebagai media penyimpanan energi dan komponen elektronika daya yang digunakan sebagai rangkaian konverter. Pengelompokan MMC berdasarkan jenisnya dapat terbagi menjadi 4 macam, yaitu MMC dengan konfigurasi bintang-ganda, MMC konfigurasi bintang, MMC konfigurasi delta, dan MMC rangkap. Pembahasan pada skripsi ini nantinya, akan terfokus pada MMC dengan konfigurasi bintang.



Gambar 2.5 Konfigurasi Rangkaian MMC : a) MMC konfigurasi bintang, dan  
b) MMC konfigurasi delta

Pada rangkaian MMC, semakin banyak jumlah tingkat pada konverter akan menghasilkan tegangan keluaran yang memiliki bentuk gelombang dengan tingkat lebih banyak. Hal ini akan membantu mengurangi harmonik pada sistem karena tegangan keluaran akan memiliki bentuk yang semakin sinusoidal. Akan tetapi, semakin banyak jumlah tingkat pada konverter akan menyebabkan munculnya tegangan yang tidak seimbang pada sisi sumber tegangan konverter dan menjadikan sistem pengendalian semakin rumit.

Banyaknya jumlah tingkatan dalam konfigurasi *multilevel* STATCOM ditetapkan berdasarkan nilai tegangan sistem tempat STATCOM bekerja dan kemampuan komponen saklar yang digunakan. Kemampuan komponen ini akan menentukan besarnya nilai rata – rata tegangan DC yang beroperasi pada STATCOM. Untuk *multilevel* STATCOM dengan konfigurasi H—bridge menggunakan komponen IGBT, banyaknya jumlah tingkatan ditentukan berdasarkan persamaan yang dibahas pada “Control and Performance of Medium-Voltage Transformerless Cascade PWM STATCOM with Star-Configuration”, (T. Yoshii, IEEE) :

$$N = \frac{V_s}{\sqrt{3} \cdot V_{dc_{rms}}} \quad (2.3)$$

N = banyaknya tingkat atau sel

V<sub>s</sub> = tegangan sistem (V)

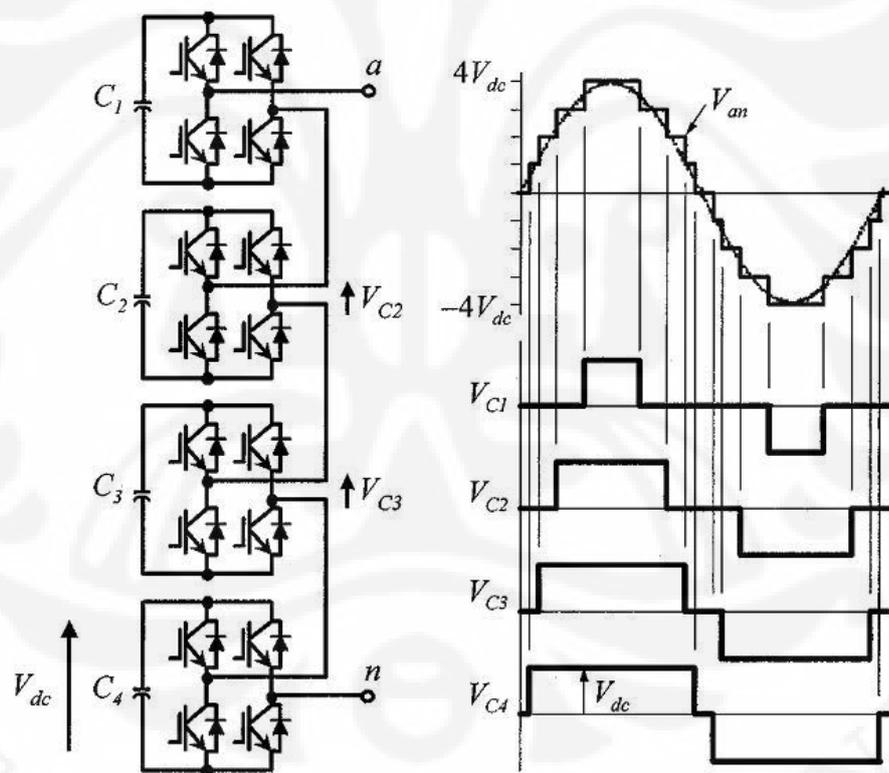
V<sub>dc<sub>rms</sub></sub> = tegangan *root mean square* (rms) sisi DC (V)

Sebagai contoh, apabila tegangan sistem, V<sub>s</sub>, adalah 6,6 kV dan besarnya tegangan rata - rata sisi DC adalah 1000 V, maka jumlah tingkat yang ada STATCOM adalah sebanyak 6 tingkat. Dalam hal ini besarnya tegangan rms sisi DC pada STATCOM (V<sub>dc<sub>rms</sub></sub>) adalah 625 V. Nilai ini didapatkan dari pembagian 1000/1,6, dimana angka 1,6 merupakan representasi dari tegangan rata – rata sisi DC dengan tegangan rms sisi DC.

### 2.5.2 Prinsip Kerja Multilevel STATCOM

Nilai tegangan keluaran yang dihasilkan dari konfigurasi *multilevel* STATCOM terpengaruhi dari banyaknya tingkat pada rangkaian. Semakin banyak tingkat pada rangkaian, maka gelombang keluaran yang dihasilkan akan memiliki bentuk yang semakin sinusoidal. Akan tetapi semakin banyak jumlah tingkatan pada STATCOM akan menjadikan sistem pengendalian yang semakin rumit dan timbulnya permasalahan ketiastabilan tegangan.

Pada gambar 2.6 merupakan gambar untuk rangkaian konverter 9-tingkat yang terdiri 4-sel tiap fasanya. Tegangan keluaran dari sistem ini memiliki bentuk gelombang anak tangga dengan bentuk hampir sinusoidal. Bentuk gelombang ini didapatkan dari penambahan nilai tegangan yang dihasilkan pada tiap sel.



Gambar 2.6 Konfigurasi Rangkaian Konverter Bertingkat dan Gelombang Keluarannya

Setiap sel akan menghasilkan tegangan yang berkisar antara  $+V_{dc}$ , 0, dan  $-V_{dc}$ . Nilai ini didapatkan dengan mengatur operasi hidup dan mati komponen saklar

pada rangkaian. Sementara komponen dioda yang disusun paralel dengan IGBT berfungsi untuk menentukan besarnya tegangan pada sisi DC. Fungsi ini sangat penting untuk menentukan lamanya waktu pengisian dan pelepasan tegangan oleh kapasitor.

Pada rangkaian tersebut tegangan keluaran pada terminal STATCOM akan memiliki nilai yang berkisar antara  $-4V_{dc}$  hingga  $+4V_{dc}$ . Nilai ini bervariasi dari  $-4V_{dc}$ ,  $-3V_{dc}$ ,  $-2V_{dc}$ ,  $-1V_{dc}$ ,  $0$ ,  $+1V_{dc}$ ,  $+2V_{dc}$ ,  $+3V_{dc}$ , dan  $+4V_{dc}$ . Sehingga terdapat 9-tingkat tegangan anak tangga yang menyerupai gelombang sinusoidal.

## 2.6 Metode Pengendalian STATCOM

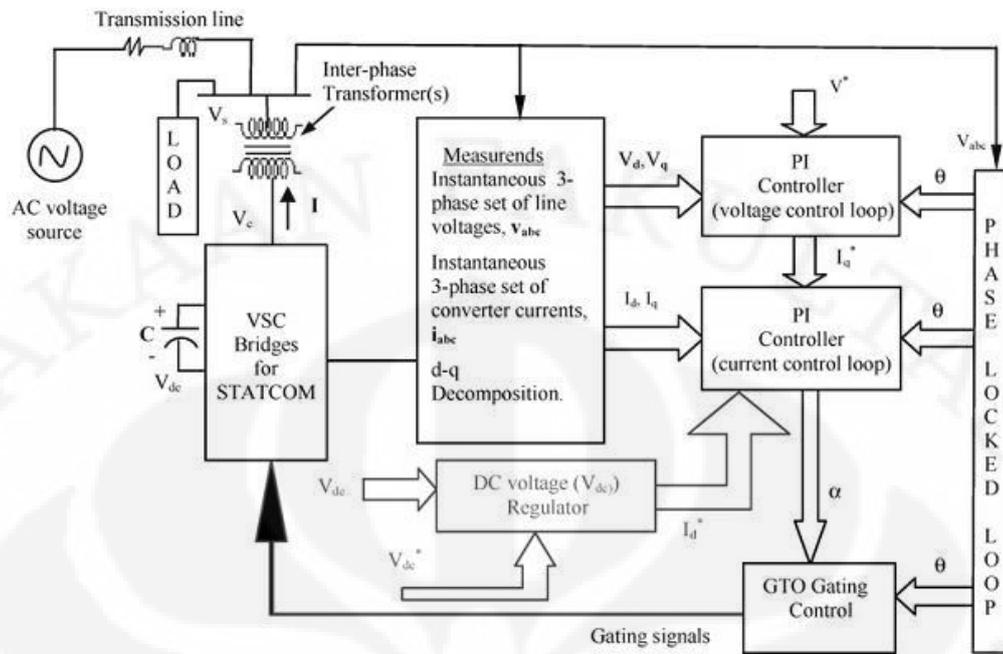
Metode pengendalian merupakan salah satu bagian terpenting dalam menentukan kinerja STATCOM. Pada dasarnya, metode pengendalian ini berfungsi mengatur tegangan terminal STATCOM menyesuaikan kondisi tegangan pada sisi jaringan. Dengan demikian, STATCOM akan mampu melakukan proses pengendalian daya reaktif pada sistem secara tepat.

Dalam menentukan metode pengendalian STATCOM terdapat beberapa faktor yang menjadi pertimbangan. Hal ini terkait dengan konfigurasi rangkaian dan kebutuhan operasi STATCOM. Beberapa faktor tersebut terdiri dari tipe aplikasi, konfigurasi sistem, kebutuhan operasi kerja dan optimasi kerugian. Faktor – faktor tersebut ikut mempengaruhi perancangan metode pengendalian STATCOM, sehingga memungkinkan banyak metode pengendalian STATCOM yang muncul. Diantara metode pengendalian pada STATCOM, metode *square-wave* dan modulasi lebar pulsa (PWM) merupakan metode yang sering digunakan dalam pengendalian kerja konverter.

Pada operasi metode *square-wave* dengan konfigurasi konverter 2-tingkat maka yang akan menjadi parameter utamanya adalah nilai sudut fasa ( $\alpha$ ) yang melalui reaktansi (L) antara sistem dengan STATCOM. Pada pengendalian ini tegangan sisi DC ( $V_{dc}$ ) akan disesuaikan dengan tegangan sistem agar dapat mengatur daya reaktif pada sistem. Sementara pada konfigurasi konverter 3-tingkat maka yang menjadi parameter utama untuk mengendalikan tegangan STATCOM adalah sudut-mati (dead-angle),  $\beta$ . Dengan pengendalian ini maka

tegangan AC pada sisi terminal konverter akan dikendalikan untuk pengaturan daya reaktif sementara nilai tegangan  $V_{dc}$  dijaga tetap.

Pada pengendalian STATCOM dengan menggunakan metode PWM, parameter utama untuk mengendalikan tegangan STATCOM adalah sudut fasa ( $\alpha$ ) dan indeks modulasi ( $m$ ). Metode ini akan mengatur nilai tegangan AC pada terminal STATCOM dengan menjaga nilai  $V_{dc}$  tetap. Secara umum pengendalian dengan metode PWM pada STATCOM dapat dilihat pada gambar 2.7.



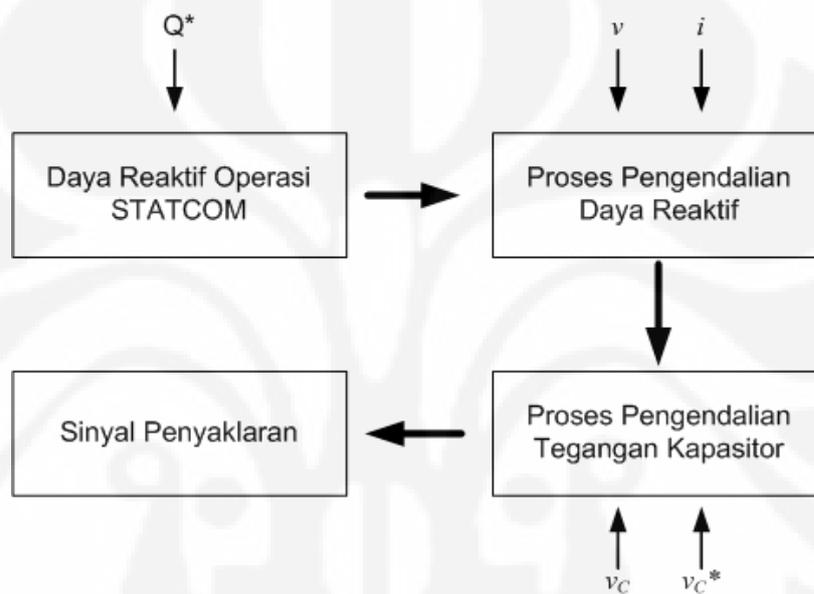
Gambar 2.7 Dasar Arsitektur Pengendalian STATCOM<sup>[1]</sup>

Dalam proses pengendalian STATCOM, loop pengendalian arus dan loop pengendalian tegangan digunakan dalam menentukan sinyal untuk proses penyaklaran. Loop pengendalian arus akan menghasilkan keluaran berupa beda fasa ( $\alpha$ ) yang digunakan untuk mengatur lamanya pembangkitan pulsa. Sementara loop pengendalian tegangan akan menghasilkan nilai referensi untuk arus daya reaktif ( $i_q^*$ ) yang digunakan menjadi salah satu masukan pada loop pengendalian arus. Kedua buah pengendalian ini menggunakan algoritma pengendali *Proportional-Integrator* (PI) atau kombinasi *Proportional-Integrator-Diferensiator* (PID).

Dalam proses perancangan dan penerapan sistem pengendalian, diperlukan pengukuran nilai tegangan dan arus sistem pada saat bekerja. Hal ini digunakan sebagai dasar dalam menentukan proses pengendalian STATCOM sehingga dapat mendukung STATCOM bekerja secara *real-time* mengikuti perubahan kondisi sistem. Sinyal ini kemudian diolah dalam bentuk yang lebih sederhana dan lebih mudah dikendalikan menggunakan teknik transformasi *d-q* atau transformasi  $\alpha$ - $\beta$ . Selain itu, sinyal masukan ini digunakan untuk menentukan besarnya sudut fasa dan frekuensi yang digunakan dalam proses pengendalian. Proses ini dilakukan

dengan menggunakan metode *Phase-Locked-Loop* (PLL). Kemudian pada akhir proses ini akan dibangkitkan sinyal untuk menentukan pengendalian gerbang penyaklaran. Melalui pengendalian gerbang penyaklaran ini, maka tegangan pada sisi DC dan terminal STATCOM dapat diatur sehingga memungkinkan pengendalian daya reaktif pada sistem.

Sehingga alur proses pengendalian STATCOM secara umum dapat dilihat pada gambar 2.8.

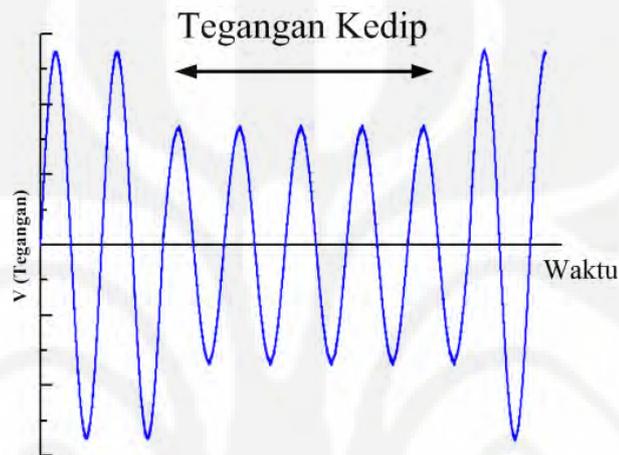


Gambar 2.8 Alur Proses Pengendalian STATCOM

Alur tersebut menjelaskan proses pengendalian STATCOM secara sederhana. Besarnya nilai daya reaktif yang bekerja pada sistem akan digunakan sebagai masukan untuk penentuan nilai kompensasi pada STATCOM. Selanjutnya akan dilakukan proses pengendalian daya reaktif dengan memasukkan nilai parameter tegangan dan arus dari sistem. Pada tahap berikutnya, juga dilakukan proses pengendalian tegangan kapasitor dengan menggunakan masukan nilai tegangan kapasitor pada sistem dan tegangan kapasitor yang ditentukan. Dengan menggabungkan antara pengendalian daya reaktif dan tegangan kapasitor, selanjutnya akan digunakan untuk menentukan sinyal penyaklaran. Sinyal penyaklaran ini berfungsi dalam pengaturan rangkaian konverter untuk menentukan besarnya tegangan STATCOM untuk pengaturan daya reaktif.

## 2.7 Permasalahan Tegangan Kedip

Tegangan kedip atau *voltage sags* didefinisikan sebagai kondisi menurunnya nilai tegangan *rms* pada sistem AC yang dapat berlangsung selama setengah periode hingga beberapa detik. Dalam pembahasan mengenai kualitas listrik, tegangan kedip tergolong dalam bagian *Power Frequency Disturbance* yang merupakan permasalahan kelistrikan yang dapat terjadi dalam waktu singkat atau lama.



Gambar 2.9 Tegangan Kedip atau *Voltage Sags*

Tegangan kedip tergolong sebagai permasalahan yang paling sering terjadi dalam transmisi listrik. Dampak munculnya tegangan kedip pada sistem, bergantung kepada besarnya tegangan dan durasi lamanya terjadi. Semakin besar presentasi penurunan nilai dan lama terjadinya, akan memberi dampak yang lebih buruk terutama pada sisi pengendalian. Pada beberapa kasus, pengaruh ini akan mengakibatkan kegagalan sistem pengendalian.

### 2.7.1 Faktor Penyebab Tegangan Kedip

Ditinjau dari sisi penyebabnya, tegangan kedip dapat terjadi dikarenakan beberapa faktor yang berkaitan dengan karakteristik beban dan kesalahan utilitas. Untuk faktor yang diakibatkan oleh karakteristik beban, perubahan tingkat kebutuhan operasi beban pada suatu waktu yang cukup drastis dapat memicu munculnya masalah ini. Sebagai contoh, hal ini dapat terjadi pada penyalan beban dengan kapasitas besar seperti penyalan motor listrik berdaya besar.

Pada proses penyalakan motor listrik, dalam hal ini motor induksi, dibutuhkan arus yang besar untuk memulai menjalankan atau menyalakan motor. Hal ini terkait karakteristik motor induksi yang memerlukan arus besar untuk memulai beroperasi. Nilai arus awal ini dapat berkisar antara 600% hingga 800% dari nilai kerja normalnya. Nilai arus yang besar ini akan beroperasi selama beberapa detik tergantung dari desain motor dan karakteristik beban. Besarnya nilai arus yang dibutuhkan beban ini akan mengalir melalui saluran yang menghubungkan antara sumber dengan beban. Apabila rangkaian memiliki nilai impedansi yang besar maka akan mengakibatkan tegangan jatuh yang relatif besar pada sistem. Peristiwa inilah yang mengakibatkan terjadinya tegangan kedip.

Faktor lain yang memicu munculnya tegangan kedip juga dapat disebabkan kesalahan utilitas. Faktor ini dapat terbagi menjadi 2 bagian, yaitu yang bersifat teknis maupun natural. Kesalahan utilitas ini merupakan permasalahan yang sering ditemukan pada sistem transmisi. Penyebab permasalahan ini umumnya dipengaruhi oleh faktor alam. Faktor ini sulit untuk diprediksi dikarenakan terjadi pada kondisi dan waktu yang tidak dapat ditentukan. Beberapa contoh kasus yang terjadi adalah adanya sambaran petir, kontak dengan tanaman atau binatang, atau yang bersifat teknis seperti kegagalan insulator pada jaringan.

### **2.7.2 Pengaruh Tegangan Kedip**

Permasalahan tegangan kedip mampu memberi pengaruh buruk pada peralatan yang bekerja sisi jaringan maupun beban. Hal ini akan memiliki pengaruh yang bervariasi sesuai dengan kemampuan dari peralatan – peralatan tersebut. Berdasarkan kepekaannya, peralatan listrik dapat terbagi atas 3 kategori, yaitu :

1. Peralatan yang peka terhadap nilai penurunan tegangan dari tegangan kedip. Peralatan yang tergolong dalam kategori ini merupakan peralatan yang peka terhadap nilai maksimum dan minimum selama terjadinya tegangan kedip. Beberapa contoh peralatan yang masuk dalam kategori ini adalah rangkaian pengendali dan mesin mesin yang beroperasi otomatis.

2. Peralatan yang peka terhadap nilai penurunan tegangan dan lama terjadinya tegangan kedip. Peralatan yang termasuk dalam kategori ini adalah peralatan – peralatan yang menggunakan *electronic power supplies*. Beberapa peralatan akan mengalami kesalahan atau kegagalan beroperasi selama masalah ini terjadi. Apabila terjadi dalam durasi yang melebihi batas yang mampu ditanggung oleh peralatan, akan mengakibatkan peralatan gagal beroperasi.
3. Peralatan yang peka terhadap karakteristik selain nilai tegangan dan lama terjadinya tegangan kedip. Beberapa peralatan yang masuk dalam kategori ini akan mendapatkan pengaruh selain dari level tegangan dan lama durasi tegangan kedip terjadi. Faktor tersebut terlihat tidak terlalu menonjol dibandingkan faktor penurunan tegangan dan durasinya. Hal ini mengakibatkan dampak yang sulit untuk ditentukan yang terlihat pada sistem.

## 2.8 Parameter Operasi Kerja STATCOM

Untuk melihat dan menentukan baik atau buruknya operasi kerja STATCOM, terdapat beberapa parameter yang digunakan sebagai acuan kerja STATCOM. Beberapa parameter tersebut antara lain :

1. Kemampuan Pengaturan Daya Reaktif.

Fungsi utama STATCOM adalah untuk dapat mengendalikan nilai daya reaktif yang ada pada sistem atau jaringan. Apabila sistem memiliki nilai daya reaktif berlebih maka STATCOM dapat berfungsi untuk “menghasilkan” daya reaktif induktif untuk melakukan kompensasi dan pengaturan, begitu pula sebaliknya. Kemampuan ini merupakan fungsi utama STATCOM dan menjadi parameter utama dalam menentukan kinerja STATCOM.

## 2. Tegangan Kapasitor

Kapasitor berfungsi sebagai media penyimpanan dan sumber energi yang digunakan untuk mengatur operasi STATCOM. Pada konfigurasi *multilevel* STATCOM, nilai tegangan kapasitor dapat menjadi tidak seimbang antara satu sel dengan sel lainnya yang berada satu fasa atau antara fasa. Hal ini akan mengakibatkan permasalahan ketidakseimbangan pada STATCOM yang dapat mengakibatkan ketidakmampuan *multilevel* STATCOM dalam pengaturan daya reaktif, kelebihan kapasitas kerja, kegagalan operasi kerja, dan beberapa permasalahan lainnya. Oleh karena itu, faktor ini menjadi penting untuk menjadi parameter yang diperhatikan.

### 2.9 Perangkat Lunak PSCAD/EMTC

Pada tahap pengerjaan skripsi, simulasi akan dilakukan dengan menggunakan software PSCAD/EMDC. Perangkat lunak ini dikembangkan oleh Manitoba HVDC Research Centre Inc, perusahaan yang bergerak di bidang utilitas dan berada di bawah perusahaan Manitoba Hydro, Canada. Perangkat lunak ini sudah banyak digunakan untuk menjalankan simulasi pada bidang elektronika daya dan juga sistem listrik.

## **BAB 3**

### **PERANCANGAN PENGENDALIAN MULTILEVEL STATCOM**

#### **3.1 Pemodelan STATCOM**

Dalam aplikasinya, STATCOM diletakkan antara sumber (jaringan transmisi atau distribusi) dengan sisi beban, seperti gambar 2.2. Hal ini berhubungan dengan fungsi STATCOM dalam mengatur jumlah daya reaktif yang ada pada sistem dan memperbaiki kualitas listrik pada sisi beban. Posisi STATCOM diletakkan cenderung lebih dekat pada sisi beban untuk menjamin efisiensi dan kinerja STATCOM. Dengan demikian pengaturan nilai daya reaktif dapat lebih mudah dilakukan.

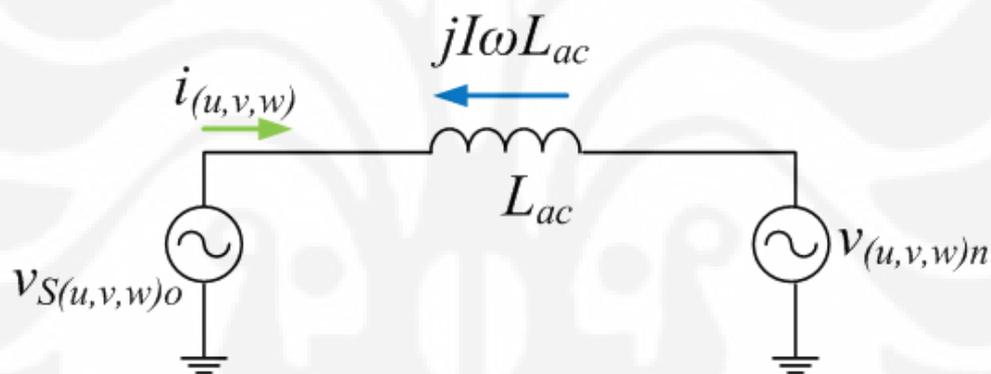
Fungsi STATCOM untuk pengaturan daya reaktif akan bergantung dengan keadaan beban dalam mengkompensasi perubahan jumlah daya reaktif. Dengan demikian apabila kita gunakan parameter perubahan daya reaktif yang diakibatkan sisi beban sebagai fungsi kerja STATCOM, maka memungkinkan kita untuk membuat hubungan langsung antara sisi sumber dengan STATCOM. Konsep inilah yang kemudian digunakan sebagai dasar pemodelan STATCOM.

Dalam simulasi dan percobaan, hal ini memungkinkan untuk menghubungkan langsung antara sumber dengan STATCOM dengan memasukkan nilai referensi daya reaktif ( $q^*$ ) sebagai parameter keadaan kondisi beban. Nilai  $q^*$  akan berfungsi sebagai inputan besarnya daya reaktif yang diperlukan STATCOM untuk bekerja. Sehingga penentuan nilai  $q^*$  dapat mengatur kondisi kerja yang dilakukan STATCOM.



Gambar 3.10 Hubungan STATCOM dengan Sumber

Dari diagram tersebut bila ditinjau tiap fasanya, maka dapat mempermudah permodelan STATCOM. Hal ini dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3.11 Diagram Sederhana Hubungan STATCOM dengan Sumber

Dari model di atas, akan didapatkan bentuk dan persamaan yang lebih sederhana dengan menggunakan Hukum Kirchoff. Persamaan yang dibentuk dari pemodelan ini adalah :

$$\begin{bmatrix} v_{Suo} \\ v_{Svo} \\ v_{Swo} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{un} \\ v_{vn} \\ v_{wn} \end{bmatrix} = L_{ac} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Parameter  $v_{Suo}$ ,  $v_{Svo}$ , dan  $v_{Swo}$  merupakan simbol tegangan 3-fasa yang berasal dari sumber, sementara  $v_{un}$ ,  $v_{vn}$ , dan  $v_{wn}$  merupakan tegangan terminal STATCOM.

### 3.2 Perancangan Pengendalian

Proses pengendalian STATCOM menekankan kemampuan STATCOM untuk dapat memiliki karakteristik cepat dalam menanggapi perubahan yang dinamis dengan nilai kesalahan atau *error* yang kecil pada kondisi *steady-state*. Kondisi ini menuntut teknik pengendalian pada STATCOM menjadi kunci penting keberhasilan operasi STATCOM.

Metode pengendalian STATCOM yang diterapkan pada skripsi ini memiliki fungsi untuk mendapatkan operasi STATCOM yang handal dalam pengaturan daya reaktif. Metode pengendalian ini akan mengatur jumlah daya reaktif, besarnya nilai tegangan kapasitor, menjaga keseimbangan tegangan kapasitor, dan mengurangi dampak tegangan kedip pada STATCOM.

Metode pengendalian ini secara umum terbagi dalam beberapa bagian, antara lain terdiri dari :

1. Pengendalian Daya Reaktif dan Tegangan Kapasitor,
2. Pengendalian Penyeimbangan Tegangan Kapasitor,
  - a. Pengendalian Penyeimbangan Individu,
  - b. Pengendalian Penyeimbangan antar Fasa,
3. *Phase Shifted Unipolar Sinusoidal PWM*.

Pengendalian ini kemudian akan digunakan dalam menentukan proses penyaklaran pada rangkaian konverter dengan menggunakan teknik PWM.

#### 3.2.1 Pengendalian Daya Reaktif dan Tegangan Kapasitor

Metode pengendalian ini menerapkan metode pengendalian penggabungan arus atau *Decoupling Current Control*. Melalui pengendalian ini, STATCOM akan memiliki kemampuan untuk mengatur nilai daya reaktif dan tegangan kapasitor. Persamaan (4.1) digunakan sebagai dasar dalam perencanaan teknik pengendalian ini. Persamaan 3-fasa tersebut kemudian dirubah menjadi bentuk 2-fasa menggunakan transformasi *d-q*, sehingga menjadi :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} - v_d \\ v_{sq} - v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ac} \frac{d}{dt} & -\omega L_{ac} \\ \omega L_{ac} & L_{ac} \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Ketika  $v_{suo}$ ,  $v_{svo}$ , dan  $v_{swo}$  merupakan gelombang sinusoidal dan seimbang maka besarnya nilai  $v_{sq}$  akan bernilai 0. Hal ini dikarenakan  $v_{suo}$  akan disejajarkan dengan sumbu-d sehingga berdasarkan persamaan yang dituliskan pada paper "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components", Akagi (IEEE, 1984) dapat dituliskan :

$$\begin{aligned} p &= v_{sd} \cdot i_d + v_{sq} \cdot i_q = v_{sd} \cdot i_d \\ q &= v_{sd} \cdot i_q - v_{sq} \cdot i_d = v_{sd} \cdot i_q \end{aligned} \quad (4.3)$$

Dari persamaan tersebut, terlihat bahwa parameter  $p$  dan  $q$  ditentukan dari besarnya nilai  $i_d$  dan  $i_q$  yang saling terpisah. Hal inilah yang kemudian menjadi dasar dalam proses pengendalian STATCOM. Dengan mengatur nilai  $i_d$  maka dapat diatur besarnya daya aktif yang digunakan untuk mengatur tegangan kapasitor, sementara besarnya nilai daya reaktif dapat diatur dengan mengatur dengan mengatur nilai  $i_q$ .

Melalui persamaan tersebut maka dapat ditentukan perancangan dalam menentukan nilai referensi  $i_d$  dan  $i_q$ . Besarnya nilai  $i_d^*$  dan  $i_q^*$  ditentukan berdasarkan persamaan :

$$i_d^* = \frac{3N\bar{v}_c}{v_{SM}} \left[ K_1 (v_c^* - \bar{v}_c) + \frac{K_1}{T_1} \int (v_c^* - \bar{v}_c) \right] \quad (4.4)$$

$$i_q^* = \frac{q^*}{v_{SM}} \quad (4.5)$$

Sementara itu, tegangan rata – rata pada fasa- $u$  atau  $cluster-u$  dihitung menggunakan persamaan :

$$\bar{v}_{Cu} = \frac{1}{6}(\bar{v}_{Cu1} + \bar{v}_{Cu2} + \bar{v}_{Cu3} + \bar{v}_{Cu4} + \bar{v}_{Cu5} + \bar{v}_{Cu6}) \quad (4.6)$$

dan tegangan rata – rata kapasitor ( $v_C$ ) untuk 3-fasa dihitung menggunakan persamaan :

$$\bar{v}_C = \frac{1}{3}(\bar{v}_{Cu} + \bar{v}_{Cv} + \bar{v}_{Cw}) \quad (4.7)$$

Besarnya nilai  $v_d^*$  dan  $v_q^*$  ditentukan dengan bantuan pengendalian menggunakan teknik pengendali *Proportional Integer* (pengendali PI) untuk parameter  $i_d$  dan  $i_q$ :

$$\begin{bmatrix} v_d^* \\ v_q^* \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \left( \begin{bmatrix} v_{Sd} \\ v_{Sq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_{ac} \\ \omega L_{ac} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - K_2 \begin{bmatrix} i_d^* - i_d \\ i_q^* - i_q \end{bmatrix} - \frac{K_2}{T_2} \int \begin{bmatrix} 0 \\ i_q^* - i_q \end{bmatrix} dt \right) \quad (4.8)$$

Pada persamaan (4.8), bagian pertama dan kedua pada sisi sebelah kanan, memiliki fungsi untuk menghilangkan nilai tegangan sumber ( $v_{Sd}$  dan  $v_{Sq}$ ) dan tegangan jatuh pada inductor ( $\omega L_{ac}i_d$  dan  $\omega L_{ac}i_q$ ). Persamaan inilah yang kemudian digunakan untuk mengendalikan daya reaktif dan juga tegangan kapasitor.

Dengan mensubstitusi persamaan (4.8) ke persamaan (4.2), maka didapatkan persamaan :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{L_{ac}} \begin{bmatrix} K_1(i_d^* - i_d) + \frac{K_1}{T_1} \int (i_d^* - i_d) dt \\ K_1(i_q^* - i_q) + \frac{K_1}{T_1} \int (i_q^* - i_q) dt \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Persamaan di atas menandakan perubahan pengaturan nilai  $i_d$  dan  $i_q$  bergantung pada pengendalian menggunakan teknik pengendali PI.

### 3.2.2 Pengendalian Penyeimbangan Tegangan Kapasitor

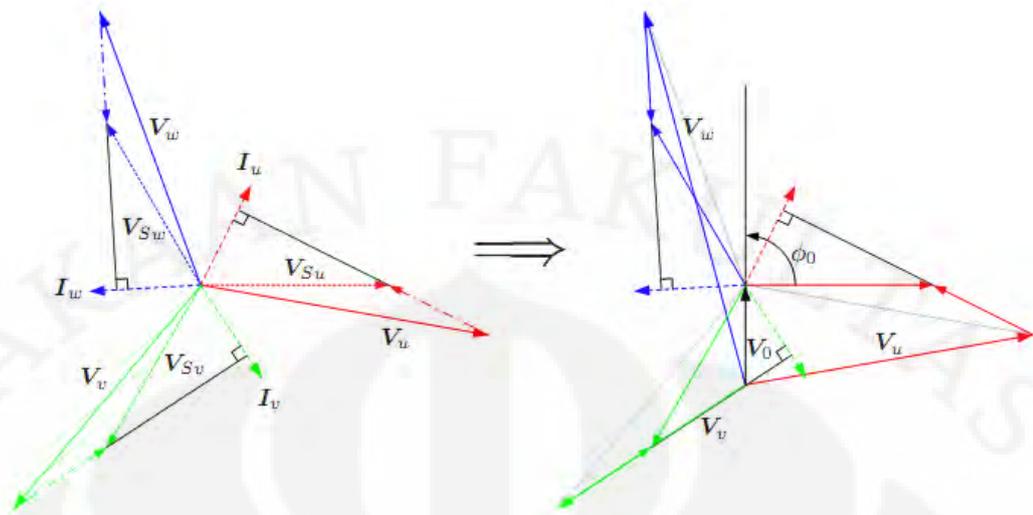
Metode pengendalian penyeimbangan tegangan kapasitor memiliki fungsi untuk menyeimbangkan tegangan kapasitor pada rangkaian. Pengendalian ini dapat diklasifikasikan dalam 2 kategori, yaitu :

1. Pengendalian Penyeimbangan antar Fasa,
2. Pengendalian Penyeimbangan Individu,

#### 3.2.2.1 Pengendalian Penyeimbangan Antar Fasa

Metode pengendalian ini bertujuan untuk dapat mengendalikan nilai tegangan kapasitor pada tiap fasa dengan fasa yang lain dan memperbaiki kondisi ketidakseimbangan yang terjadi pada *multilevel* STATCOM. Konsep pengendalian ini menggunakan konsep *neutral shift* dengan menerapkan metode *zero-sequence voltage*. *Neutral Shift* merupakan pergeseran titik neutral dari titik netral yang terdapat pada konfigurasi STATCOM dari titik netral yang berasal dari sumber . Metode ini pernah dipaparkan dalam “Symmetry Compensation using a H-Bridge Multilevel STATCOM with Zero Sequence Injection” oleh R.E. Betz, T dkk, pada IEEE.

Hal ini dapat dilakukan dengan memasukkan nilai tegangan *fundamental frequency zero-sequence*,  $v_0$ , kepada nilai tegangan yang ada pada STATCOM (konverter). Memasukkan nilai  $v_0$  ini tidak akan merubah tegangan antar fasa (line-to-line) sehingga tidak akan mengubah nilai yang bekerja pada sistem.



Gambar 3.12 Diagram Fasor Teknik *Neutral Shift* Rangkaian 3-fasa

Sistem pada persamaan ini dapat dituliskan dengan persamaan :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_u \\ \mathbf{V}_v \\ \mathbf{V}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{pu} \\ \mathbf{V}_{pv} \\ \mathbf{V}_{pw} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{V}_0 \end{bmatrix} = V_p e^{j\phi_1} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j(-2\pi/3)} \\ e^{j(2\pi/3)} \end{bmatrix} + V_0 e^{j\phi_0} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Besarnya daya yang berada pada tiap fasa, dapat dihitung dengan persamaan :

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{s}}_u &= \mathbf{V}_u \bar{\mathbf{I}}_u \\ \bar{\mathbf{s}}_v &= \mathbf{V}_v \bar{\mathbf{I}}_v \\ \bar{\mathbf{s}}_w &= \mathbf{V}_w \bar{\mathbf{I}}_w \end{aligned} \quad (4.11)$$

kemudian dengan mengambil komponen nyata dari persamaan (4.11), sehingga dapat dituliskan :

$$P_u = \Re [\mathbf{V}_u \cdot \bar{\mathbf{I}}_u] = \Re [(V_{pu} + V_0) \cdot \bar{\mathbf{I}}_u] = \Re [V_{pu} \cdot \bar{\mathbf{I}}_u + V_0 \cdot \bar{\mathbf{I}}_u] \quad (4.12)$$

Dari persamaan (4.12) apabila sistem 3-fasa berada pada kondisi seimbang  $v_0$  akan bernilai 0. Untuk pengendalian, digunakan komponen keduanya kemudian dirubah dalam bentuk  $d-q$  menggunakan transformasi  $d-q$ , sehingga menjadi :

$$\begin{aligned} V_0 \begin{bmatrix} \cos \phi_0 \\ \sin \phi_0 \end{bmatrix}^T \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \right) &= \frac{V_0}{\sqrt{3}} (I_d \cos \phi_0 + I_q \sin \phi_0) \\ &= \frac{V_0}{\sqrt{3}} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \cos \left( \phi_0 - \tan^{-1} \frac{I_q}{I_d} \right) \end{aligned} \quad (4.13)$$

sementara untuk fasa- $u$  dan fasa- $w$  dapat dituliskan menjadi :

$$\begin{aligned} P_{u0} &= \frac{V_0}{\sqrt{3}} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \cos \left( \phi_0 + \frac{2\pi}{3} - \tan^{-1} \frac{I_q}{I_d} \right) \\ P_{w0} &= \frac{V_0}{\sqrt{3}} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \cos \left( \phi_0 - \frac{2\pi}{3} - \tan^{-1} \frac{I_q}{I_d} \right) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Selanjutnya  $P_{u0}$ ,  $P_{v0}$ , dan  $P_{w0}$  dirubah dalam bentuk  $\alpha$ - $\beta$  menggunakan *Park Transformation*, menjadi :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P_{x0} \\ P_{y0} \\ P_{z0} \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{u0} \\ P_{v0} \\ P_{w0} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} V_0 \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \begin{bmatrix} \cos \left( \tan^{-1} \frac{I_q}{I_d} - \phi_0 \right) \\ \sin \left( \tan^{-1} \frac{I_q}{I_d} - \phi_0 \right) \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} V_0 \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{I_q}{I_d} - \phi_0$$

(4.16)

Berikut merupakan pengendalian yang digunakan untuk dapat menstabilkan tegangan kapasitor:

$$\begin{aligned}
 \Delta v_{C_u} &= (v_C^* - \bar{v}_{C_u}) \\
 \Delta v_{C_v} &= (v_C^* - \bar{v}_{C_v}) \\
 \Delta v_{C_w} &= (v_C^* - \bar{v}_{C_w})
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

Nilai  $v_C^*$  merupakan nilai referensi tegangan kapasitor dan  $v_C$  merupakan nilai rata – rata tegangan kapasitor pada salah satu fasa. Kemudian untuk menyusun teknik pengendaliannya, persamaan ini kita rubah dalam bentuk  $d-q$  sehingga menjadi :

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \Delta v_{C_x} \\ \Delta v_{C_y} \\ \Delta v_{C_z} \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{C_u} \\ \Delta v_{C_v} \\ \Delta v_{C_w} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \Delta v_{C_x} \\ \Delta v_{C_y} \\ \Delta v_{C_z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} (\bar{v}_C - \bar{v}_{C_u}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \{(\bar{v}_C - \bar{v}_{C_v}) - (\bar{v}_C - \bar{v}_{C_w})\} \\ \sqrt{3} (v_C^* - \bar{v}_C) \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{4.18}$$

Nilai  $\Delta v_{C_z}$  merupakan nilai deviasi dari nilai seluruh tegangan kapasitor. Kemudian ditetapkan pengendalian untuk menentukan sudut  $\gamma$  :

$$\tan \gamma^* = \frac{\Delta v_{C_y}}{\Delta v_{C_x}}
 \tag{4.19}$$

$$\phi_0^* = \tan^{-1} \frac{I_q}{I_d} - \gamma^*
 \tag{4.20}$$

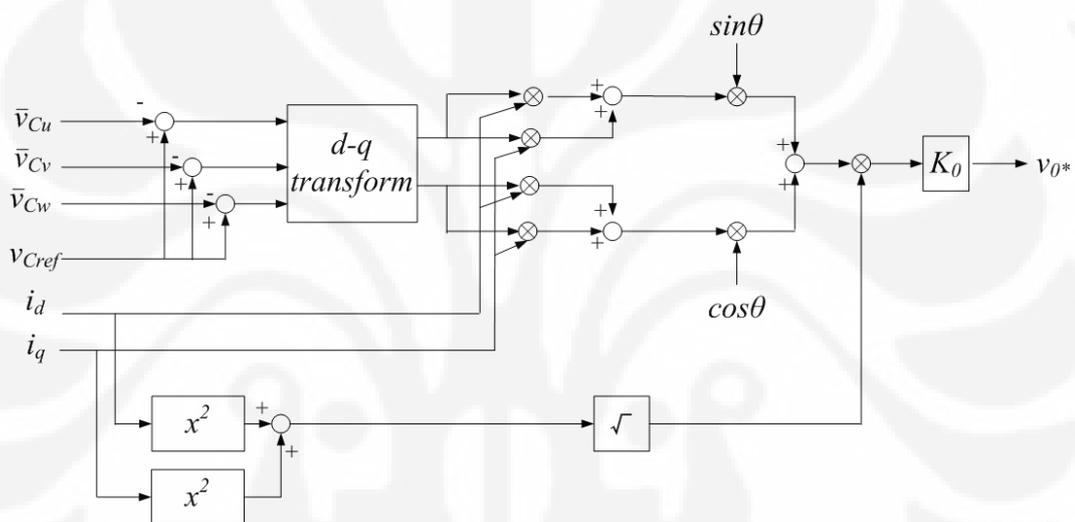
Dengan menggunakan teknik pengendalian *feed forward control*, maka ditetapkan persamaan untuk mengendalikan besarnya nilai  $v_0^*$  sebagai berikut :

$$V_0^* = K_0 \sqrt{\Delta v_{C_x}^2 + \Delta v_{C_y}^2}
 \tag{4.21}$$

Sehingga dengan memasukkan unsur arah atau sudut dari persamaan di atas, maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 V_0^* &= K_0 \sqrt{\Delta v_{C_x}^2 + \Delta v_{C_y}^2} \sin(\omega t + \phi_0^*) \\
 &= \frac{K_0}{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}} \{(\Delta v_{C_x} I_d + \Delta v_{C_y} I_q) \sin \omega t + (\Delta v_{C_x} I_q - \Delta v_{C_y} I_d) \cos \omega t\}
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

Persamaan inilah yang kemudian digunakan untuk pengendalian tegangan kapasitor antar fasa. Berikut adalah bagan pengendalian dari teknik ini :



Gambar 3.4 Blok Pengendalian Penyeimbangan Antar Fasa ( $v_0^*$ )

### 3.2.2.1 Pengendalian Penyeimbangan Individu

Kemampuan *modularity* merupakan bagian yang menjadi pusat perhatian dan kelebihan konfigurasi *multilevel* STATCOM. Sifat ini memberikan *multilevel* STATCOM operasi kerja yang tinggi sehingga dapat mengurangi atau menekan kebutuhan terhadap komponen dengan kualitas sangat baik. Semakin tinggi kualitas suatu komponen akan menyebabkan harga semakin mahal dan jauh dari sisi ekonomis.

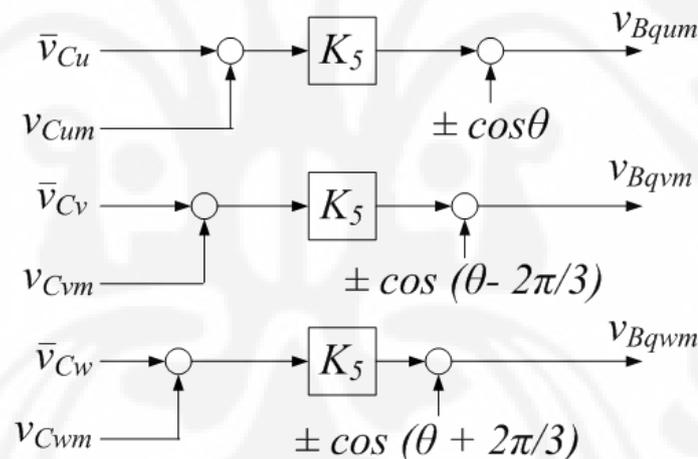
Akan tetapi di sisi lain, hal ini juga menjadi permasalahan tersendiri bagi konfigurasi *multilevel* STATCOM. Salah satu masalah yang muncul adalah tegangan kapasitor yang tidak seimbang pada tiap sel dan antar fasa, sesuai pada

penjelasan pada "Control and Performance of Medium-Voltage Transformerless PWM STATCOM with Star-Configuration", Yoshii (IEEE, 2006). Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan metode pengendalian yang dapat menjaga tegangan kapasitor pada tiap sel memiliki nilai yang stabil dan seimbang, sehingga disusunlah pengendalian penyeimbangan individu.

Teknik pengendalian penyeimbangan individu ini ditentukan dari persamaan (4.23) yang digunakan untuk masing - masing tegangan kapasitor:

$$v_{Bum} = K_5 (\bar{v}_{Cu} - \bar{v}_{Cum}) \cos \theta \quad (4.23)$$

Nilai  $v_{cu}$  merupakan nilai rata - rata tegangan kapasitor untuk fasa- $u$ , sementara  $v_{cum}$  untuk sel- $m$  pada fasa- $u$ . Untuk bagan pengendaliannya, dapat dilihat pada diagram di bawah ini :



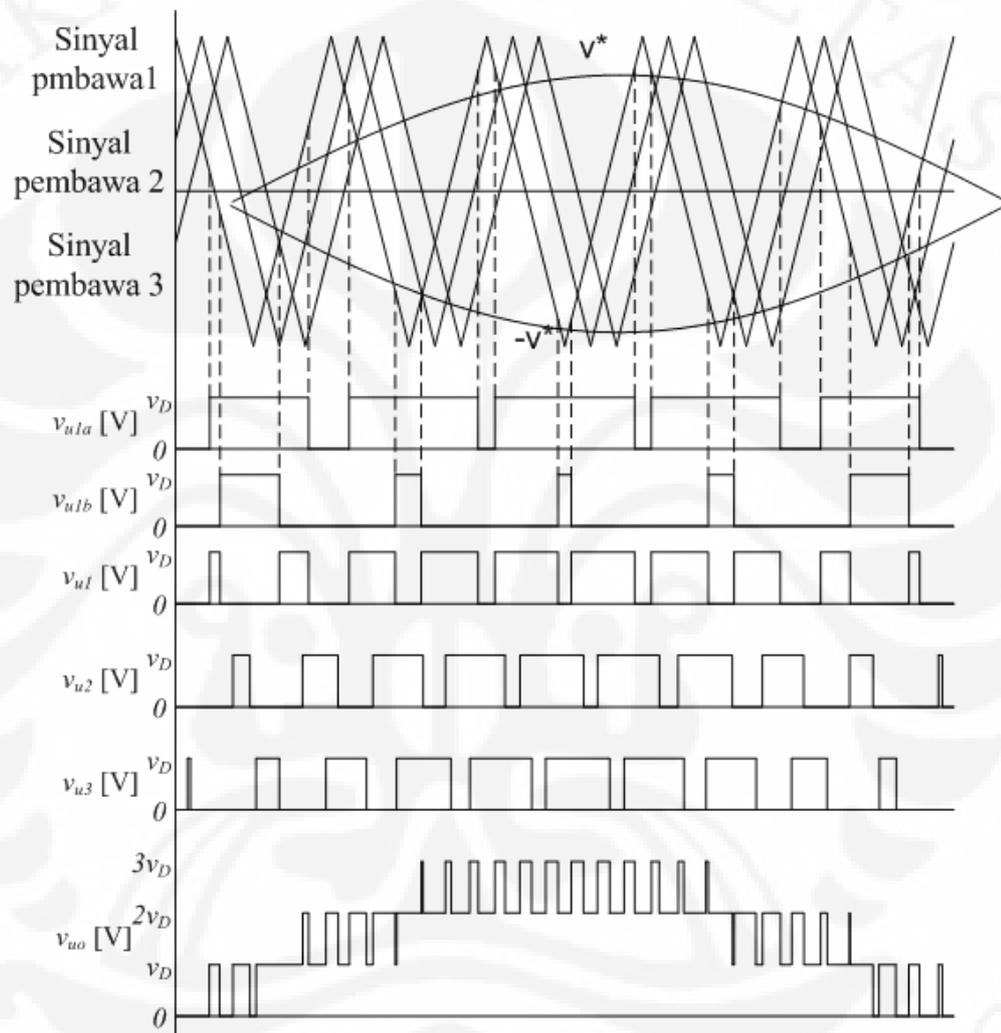
Gambar 3.14 Blok Pengendalian Penyeimbangan Individu

$m$  : penomoran sel pada tiap fasa

### 3.2.3 PWM Pergeseran Fasa Sinusoidal (Phase-Shift Sinusoidal PWM)

Teknik pengendalian PWM pergeseran fasa sinusoidal atau *phase-shift sinusoidal PWM* merupakan salah satu bagian dari teknik modulasi lebar pulsa (PWM). Teknik ini digunakan pada penyaklaran H-bridge konverter dikarenakan faktor *modularity* yang dimiliki oleh rangkaian *multilevel* STATCOM.

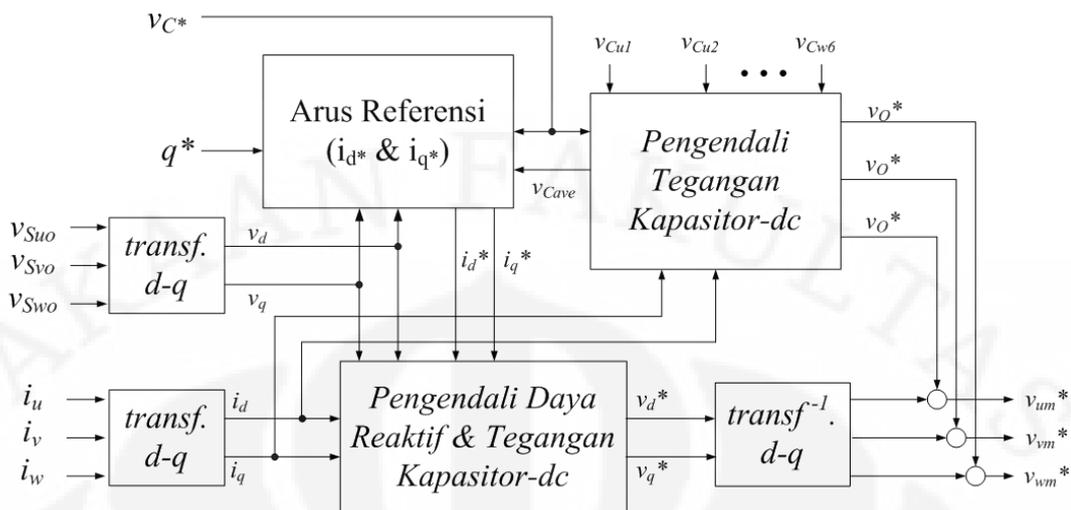
Dalam metode ini digunakan metode perbandingan antara sinyal pembawa dengan sinyal referensi hasil dari teknik pengendalian. Perbedaan sinyal pembawa antara satu sel dengan sel yang lain dalam fasa yang sama, tergeser sebesar  $30^\circ$  ( $180^\circ/N$ ). Hal inilah yang kemudian mampu menjadikan tegangan keluaran dari H-bridge konverter memiliki tegangan sinusoidal anak tangga.



Gambar 3.15 PWM Pergeseran Fasa Konfigurasi 3-sel 1-fasa

### 3.3 Diagram Pengendalian

Dari penjabaran di atas tentang metode pengendalian *multilevel* STATCOM, maka dapat digambarkan alur pengendalian *multilevel* STATCOM seperti gambar 3.16.



Gambar 3.16 Blok Diagram Pengendalian *Multilevel* STATCOM

Dari gambar tersebut, dapat terlihat alur pengendalian yang diterapkan pada rangkaian *multilevel* STATCOM. Terdapat 5 parameter yang digunakan sebagai masukan dalam proses pengendalian yang terdiri dari tegangan kapasitor referensi ( $v_c^*$ ), daya reaktif referensi ( $q^*$ ), tegangan sistem ( $v_s$ ), arus sistem ( $i$ ), dan tegangan kapasitor ( $v_c$ ).

Nilai daya reaktif referensi dan tegangan kapasitor referensi digunakan untuk mendapatkan nilai arus referensi ( $i_d^*$  dan  $i_q^*$ ). Nilai arus referensi ini kemudian dipadu dengan nilai tegangan sistem dan arus sistem untuk pengendalian daya reaktif dan tegangan kapasitor sesuai untuk mendapatkan nilai tegangan referensi ( $v_d^*$  dan  $v_q^*$ ).

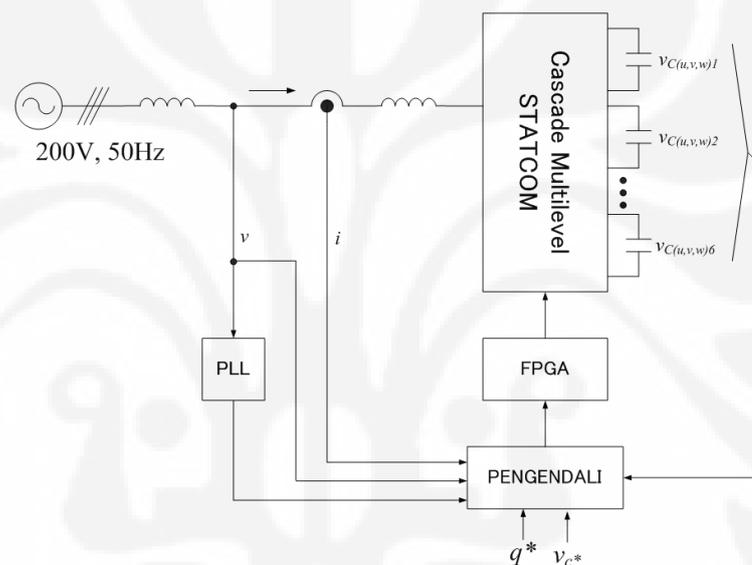
Sementara itu, nilai tegangan kapasitor referensi juga digunakan sebagai masukan dalam pengendalian tegangan kapasitor bersama dengan nilai tegangan kapasitor dari sistem. Nilai ini digunakan dalam pengendalian tegangan kapasitor individual dan pengendalian tegangan kapasitor antar fasa. Kemudian hasil ini akan dipadu dengan nilai tegangan referensi hasil dari pengendalian daya reaktif dan tegangan kapasitor yang kemudian digunakan sebagai sinyal referensi pada metode PWM.

Pada bagian PWM ini, sinyal referensi akan dibandingkan terhadap sinyal pembawa. Dari sini akan didapatkan kondisi untuk mengaktifkan atau mematikan

komponen IGBT yang digunakan sebagai saklar. Sehingga dengan proses ini dapat diatur jumlah daya aktif yang akan digunakan untuk pengisian tegangan kapasitor dan pengaturan tegangan *multilevel* STATCOM dalam pengaturan daya reaktif.

### 3. 4 Sistem Pengendalian

Berikut ini merupakan bagan sistem pengendalian *multilevel* STATCOM dengan konfigurasi H-bridge 6-sel pada rangkaian 3-fasa yang digunakan dalam skripsi kali ini.



Gambar 3.17 Sistem Pengendalian *Multilevel* STATCOM 6-sel

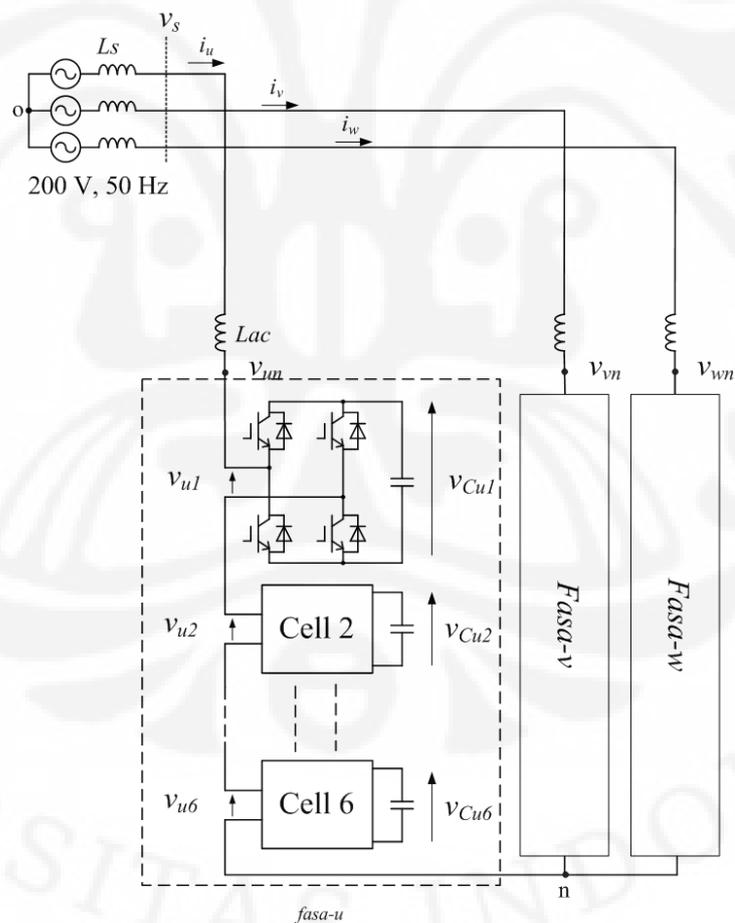
Sistem pengendalian STATCOM didukung dengan penerapan pengendalian Phase *Phase-Locked-Loop* (PLL) dan *Field-Programmable Gate Arrays* (FPGA). Penggunaan PLL dalam rangkaian bertujuan untuk menjaga besarnya sudut yang digunakan dalam proses pengendalian. Hal ini sangat berguna ketika sumber mengalami gangguan sehingga dapat mengakibatkan perubahan pada sudut pengendalian. Sementara FPGA digunakan dalam mengatur pengendalian kerja penyaklaran konverter (IGBT). Penggunaan PLL dan FPGA ini menjadi salah satu bagian penting dalam kegiatan percobaan.

## BAB 4

### SIMULASI OPERASI MULTILEVEL STATCOM

#### 4.1 Rangkaian Simulasi

Secara umum, rangkaian *multilevel* STATCOM dapat tersusun dalam 2 konfigurasi, yaitu konfigurasi bintang dan delta. Sudah terdapat beberapa bahasan mengenai 2 konfigurasi ini ditinjau dari beberapa sisi konfigurasi, komponen dan keunggulan yang dimiliki. Pada skripsi ini dipilih konfigurasi bintang pada *multilevel* STATCOM terkait dengan faktor – faktor yang mendukung kegiatan dan proses pengerjaan skripsi.



Gambar 4.18 Rangkaian Simulasi Multilevel STATCOM, 200V, 15-kVAR

Rangkaian simulasi tersusun dari sumber tegangan yang dihubungkan langsung dengan rangkaian STATCOM. Sementara pada hubungan antara sumber dan STATCOM terdapat komponen induktor yang berfungsi sebagai filter terhadap keluaran STATCOM. Selain itu, komponen ini juga memiliki fungsi untuk menghasilkan perbedaan fasa antara sumber dan STATCOM.

Pada sisi konfigurasi, rangkaian terdiri dari 6-sel yang tersusun secara bertingkat pada tiap fasanya. Tiap sel tersusun dari rangkaian H-bridge konverter yang berfungsi sebagai pengubah sinyal AC ke DC dan dari DC ke AC serta komponen penyimpan energi. Rangkaian H-bridge konverter disusun oleh 4 buah IGBT yang dipasang paralel dengan dioda, sementara kapasitor dipilih sebagai komponen penyimpan energi.

Parameter rangkaian yang digunakan dalam simulasi terdapat pada tabel 4.1

Rating Daya Reaktif (max)	Q	15kVAR
Tegangan Sumber (fasa-fasa & rms)	$V_S$	200V
Induktansi Sumber	$L_S$	48 $\mu$ H (0.8%)
Induktansi AC	$L_{AC}$	0.42 mH (5%)
Resistor start-up	R	3 $\Omega$
Tegangan Referensi Kapasitor	$V_C^*$	30V
Kapasitansi Kapasitor	C	47000 $\mu$ F
<i>Unit Capacitance Constant</i>	H	25.5 ms
Frekuensi Pembawa pada PWM		1 kHz
<i>Dead Time</i> pada Konverter		4 $\mu$ s
<i>Low Pass Filter Time Constant</i>	T	11 ms

Tabel 4.1 Parameter Rangkaian Simulasi

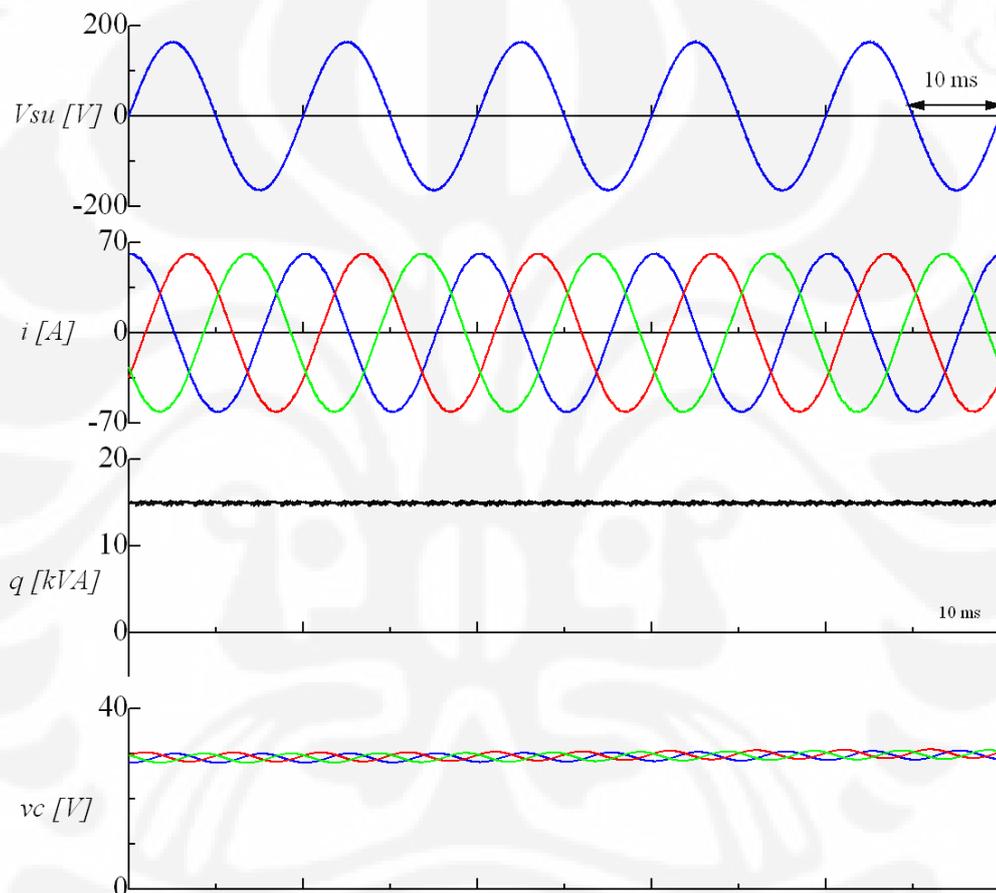
#### 4.2 Simulasi Operasi Multilevel STATCOM

Terdapat beberapa simulasi yang dilakukan dalam penyusunan skripsi ini. Simulasi ini berfungsi untuk mengetahui kemampuan perancangan dan metode pengendalian yang diterapkan pada rangkaian *multilevel* STATCOM. Simulasi ini dilakukan dengan variasi mode operasi STATCOM dan faktor gangguan tegangan kedip yang muncul.

### 4.2.1 Simulasi Kondisi Normal Operasi

Simulasi pada bagian ini bertujuan untuk melihat kemampuan STATCOM untuk bekerja pada kondisi normal operasi. Kondisi ini terdiri dari mode kapasitif, mode induktif, dan mode perpindahan (dari induktif ke kapasitif).

#### 4.2.1.1 Simulasi Operasi Mode Kapasitif ( $q^* = 15\text{kVAR}$ )



Gambar 4.19 Grafik Hasil Operasi Mode Kapasitif,  $q^* = 15\text{kVAR}$ ,  $v_C = 30\text{V}$

Pada grafik hasil simulasi, terlihat arus  $i_u$  yang mendahului (leading) terhadap tegangan  $v_u$ . Hal ini menandakan STATCOM beroperasi dalam mode kapasitif dan nilai  $v_S$  lebih besar dari  $v_C$ . Pada bagian daya reaktif, besarnya nilai daya reaktif yang bekerja pada STATCOM mampu mengikuti atau bernilai sama dengan nilai daya reaktif referensi ( $q^*$ ) sebesar 15kVAR. Hal ini menandakan STATCOM mampu beroperasi baik dalam pengaturan nilai daya reaktif.

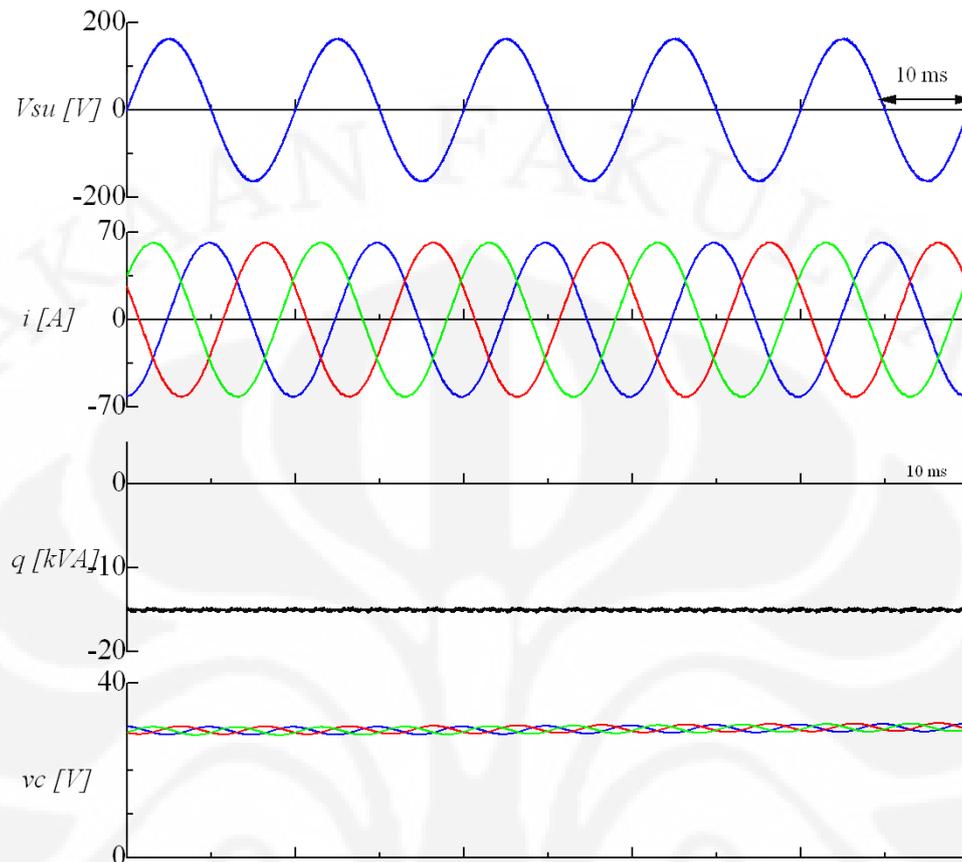
Bagian lain yang perlu dilihat adalah bagian gelombang tegangan kapasitor. Dari grafik terlihat, tegangan kapasitor mengalami nilai yang naik-turun. dengan frekuensi 100 Hz. Kondisi ini disebabkan sifat operasi kerja kapasitor yang pada setengah siklus melakukan proses pengisian (charging) dan setengah siklus lainnya untuk proses pelepasan (discharging).

Dari grafik terlihat bahwa tegangan kapasitor antara fasa yang satu dengan fasa yang lain memiliki kondisi yang seimbang. Dari hasil ini apabila kita ambil nilai rata – rata tegangan kapasitor maka didapatkan tegangan yang stabil sesuai dengan nilai referensi tegangan kapasitor,  $v_C$  sebesar 30 V. Sehingga dari hasil ini dapat dikatakan pengendalian tegangan kapasitor mampu berjalan baik.

#### 4.2.1.2 Simulasi Operasi Mode Induktif ( $q^* = -15\text{kVAR}$ )

Pada grafik hasil simulasi, terlihat arus  $i_u$  yang tertinggal (lagging) terhadap tegangan  $v_u$ . Hal ini menandakan kondisi STATCOM beroperasi dalam mode induktif dan nilai  $v_S$  lebih kecil dari  $v_C$ . Pada bagian daya reaktif, nilai daya reaktif yang bekerja pada STATCOM mampu mengikuti atau sama nilainya dengan nilai referensi daya reaktif ( $q^*$ ) sebesar -15kVAR. Hal ini menandakan bahwa STATCOM mampu beroperasi baik dalam pengaturan nilai daya reaktif.

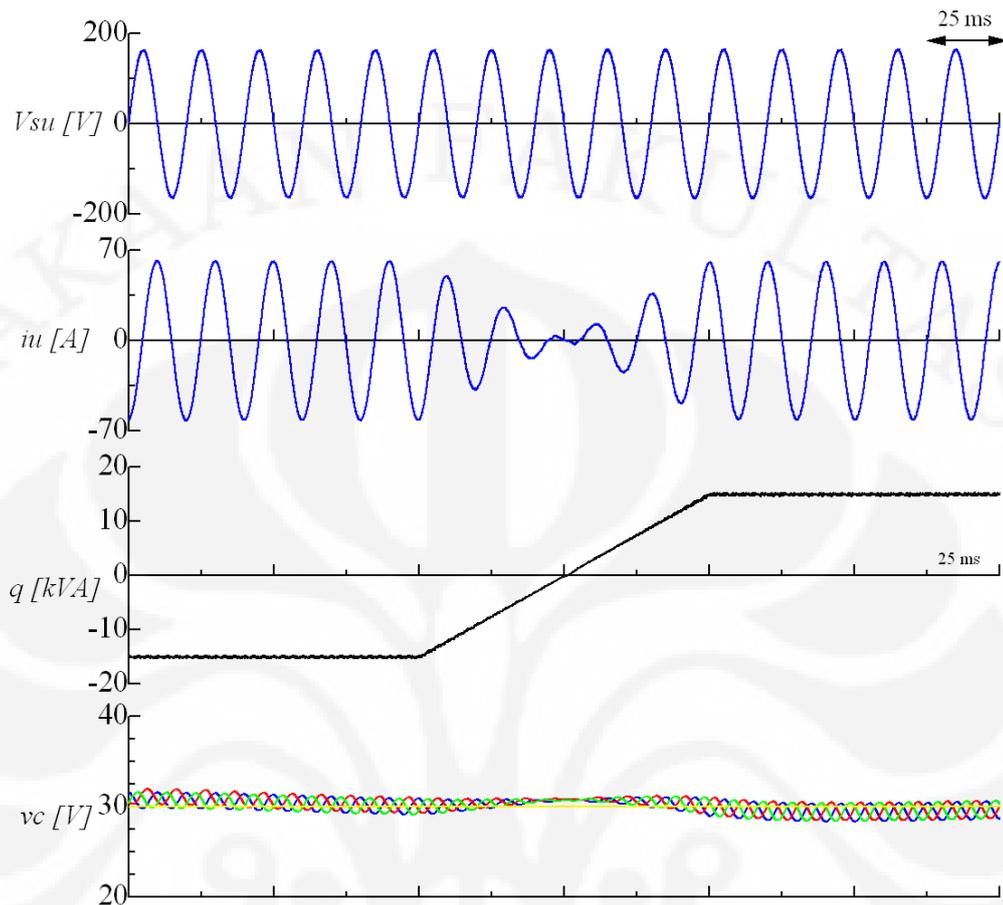
Untuk bagian tegangan kapasitor, tampak tegangan masing – masing kapasitor berada sesuai dengan nilai tegangan kapasitor referensi sebesar 30V. Selain itu tegangan kapasitor antara fasa yang satu dengan fasa yang lain memiliki kondisi yang seimbang. Sehingga dari sini dapat dikatakan, pengendalian tegangan kapasitor mampu berjalan baik.



Gambar 4.20 Grafik Hasil Operasi Mode Induktif,  $q^* = -15\text{kVAR}$ ,  $v_C = 30\text{V}$

#### 4.2.1.3 Simulasi Operasi Keadaan Perpindahan (Induktif – Kapasitif)

Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui pengendalian STATCOM pada kondisi perpindahan dari mode induktif ke kapasitif atau sebaliknya dari mode kapasitif ke induktif. Kemampuan ini sangat penting mengingat STATCOM akan menghadapi kondisi beban yang dinamis sehingga menuntut kehandalan perpindahan dari satu mode kerja ke mode yang lain.



Gambar 4.21 Grafik Hasil Operasi Keadaan Perpindahan dari Induktif ke Kapasitif,  $q^* = -15\text{kVAR}$  ke  $15\text{ kVAR}$ ,  $v_C = 30\text{V}$

Proses perpindahan dari mode operasi induktif ke kapasitif ditetapkan berlangsung selama 100 ms. Gelombang arus pada saat operasi mode induktif menunjukkan bahwa  $i_u$  tertinggal terhadap tegangan, akan tetapi pada operasi mode kapasitif, gelombang  $i_u$  mendahului tegangan. Perubahan ini menunjukkan kemampuan *multilevel* STATCOM melakukan perubahan mode operasi dari induktif ke kapasitif.

Dari grafik, besarnya nilai daya reaktif yang bekerja pada sistem mampu mengikuti perubahan daya reaktif dari induktif ke kapasitif. Sementara pada grafik tegangan kapasitor, terlihat tegangan antar fasa memiliki nilai yang seimbang. Hal ini menunjukkan STATCOM mampu beroperasi dengan baik dalam keadaan perpindahan. Selain itu metode pengendalian yang diterapkan dapat berjalan

sesuai dengan yang diharapkan dalam pengaturan daya reaktif dan juga keseimbangan tegangan kapasitor.

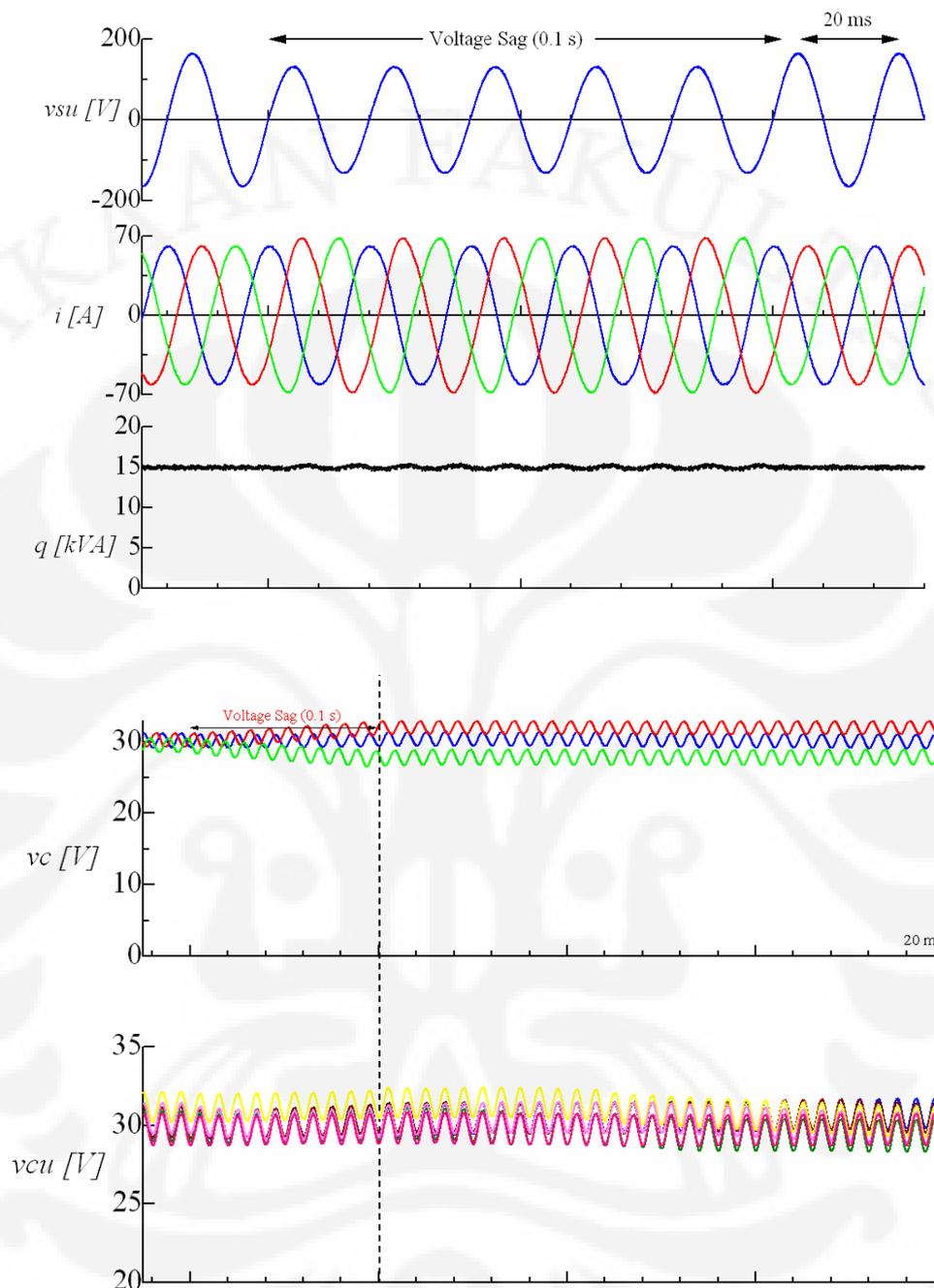
#### **4.2.2 Simulasi Kondisi Munculnya Tegangan Kedip**

Tegangan kedip atau yang umum dikenal *voltage sags* menjadi salah satu permasalahan yang menjadi perhatian untuk diatasi. Dengan frekuensi muncul yang relatif kerap terjadi dan dampak yang ditimbulkan terhadap jaringan serta peralatan, maka kemampuan peralatan untuk bertahan dari tegangan kedip menjadi faktor penting. Hal ini pula yang harus diperhatikan pada STATCOM.

Kemampuan *multilevel* STATCOM dalam menghadapi kondisi tegangan kedip menuntut sistem pengendalian yang handal. Pada bagian ini, akan dilakukan simulasi untuk melihat kondisi dan kemampuan STATCOM dalam menghadapi masalah tegangan kedip. Untuk memberi perbedaan, simulasi akan dilakukan pada rangkaian dengan menggunakan dan tanpa menggunakan teknik pengendalian yang telah dirancang. Selain itu, simulasi juga bertujuan untuk mengamati level tertinggi tegangan kedip yang masih bisa diatasi oleh rangkaian.

##### **4.2.2.1 Simulasi Tanpa Pengendali Penyeimbangan Tegangan Kapasitor**

Pada simulasi ini, STATCOM mengalami gejala tegangan kedip pada fasa-*u* selama periode tertentu. Tegangan kedip dengan nilai 20% dari nilai normal akan berlangsung selama 100 ms dan setelah itu sumber akan kembali dalam kondisi normal. Pada simulasi ini pengendalian untuk tegangan kapasitor dimatikan sehingga hanya menyisakan pngendali daya reaktif dan tegangan kapasitor yang aktif. Untuk hasil dari simulasi dapat dilihat pada gambar 4.22.



Gambar 4.22 Grafik Kondisi Tegangan Kedip Muncul selama 100ms pada Mode Kapasitif,  $q^* = 15\text{kVAR}$ ,  $v_c = 30\text{V}$

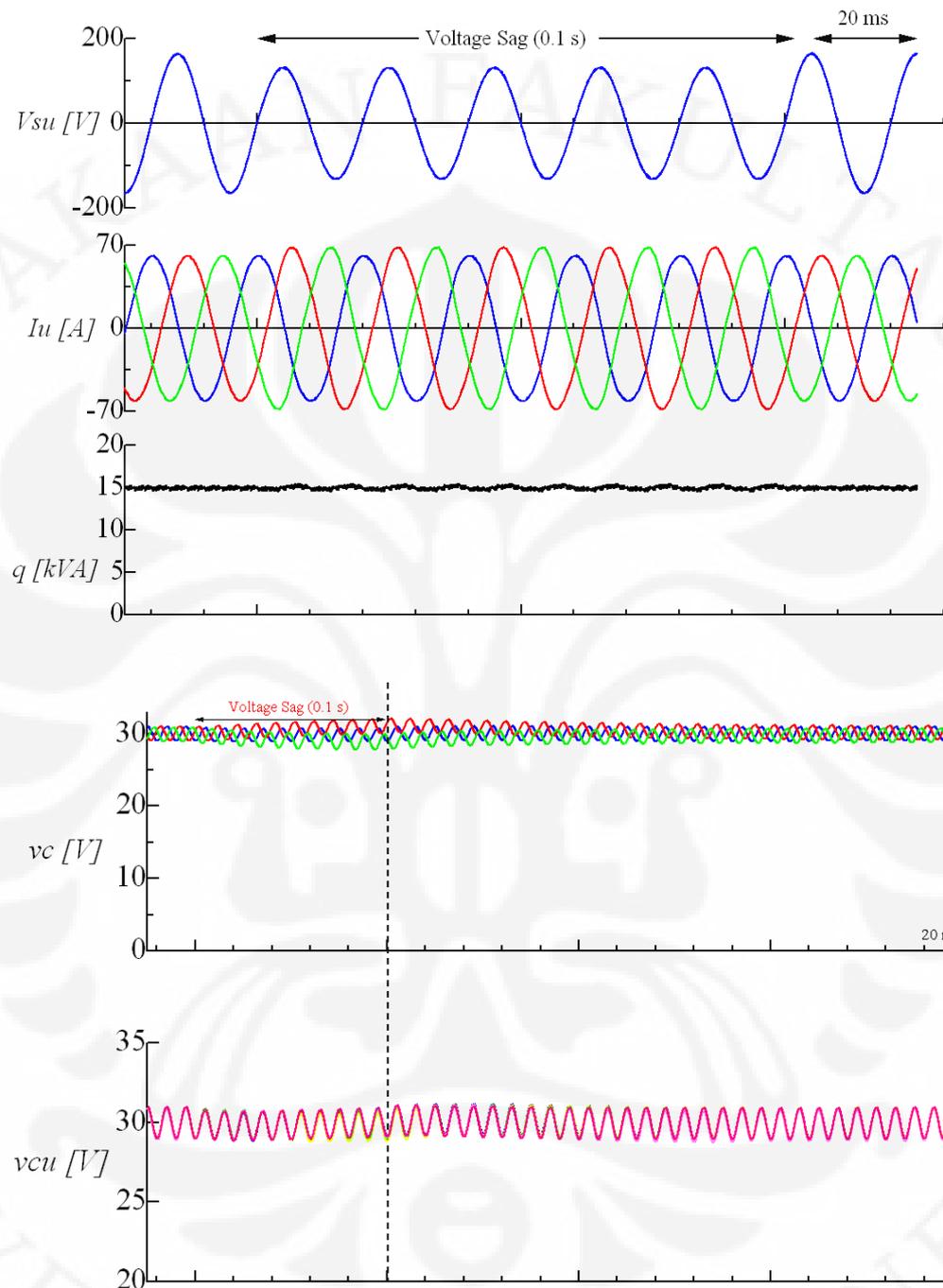
Dari graifk hasil simulasi, terlihat adanya riak (ripple) selama tegangan kedip terjadi. Namun riak tersebut tidak terlalu besar nilainya sehingga STATCOM masih mampu mengikuti nilai daya reaktif referensi yang diberikan. Hal ini menandakan bahwa pengendalian daya reaktif masih bekerja baik. Selain

itu, besarnya tegangan kapasitor sebelum terjadi tegangan kedip pun masih menunjukkan nilai sesuai dengan tegangan referensi, yaitu sebesar 30V. Hal ini menandakan pula, pengendalian tegangan kapasitor masih berjalan normal sebelum tegangan kedip terjadi.

Akan tetapi, pada grafik tegangan kapasitor terlihat jelas bahwa tegangan kedip membawa pengaruh besar terhadap keseimbangan tegangan kapasitor. Pada saat tegangan kedip terjadi, tegangan kapasitor pada fasa- $v$  mengalami kenaikan sementara fasa- $w$  mengalami penurunan. Bahkan setelah tegangan kedip berakhir, tegangan kapasitor tidak kembali kepada posisi semula sehingga menyebabkan ketidakseimbangan.

Pada grafik tegangan kapasitor pada fasa- $u$  terlihat bahwa tegangan kapasitor antar sel yang terdapat dalam satu fasa yang sama memiliki nilai yang tidak sama. Hal ini menyebabkan ketidakseimbangan yang terjadi pada fasa- $u$ . Sementara untuk fasa- $v$  dan fasa- $w$  juga mengalami kondisi yang sama dengan yang dialami fasa- $u$ .

#### 4.2.2.2 Simulasi Kondisi Tegangan Kedip 20%



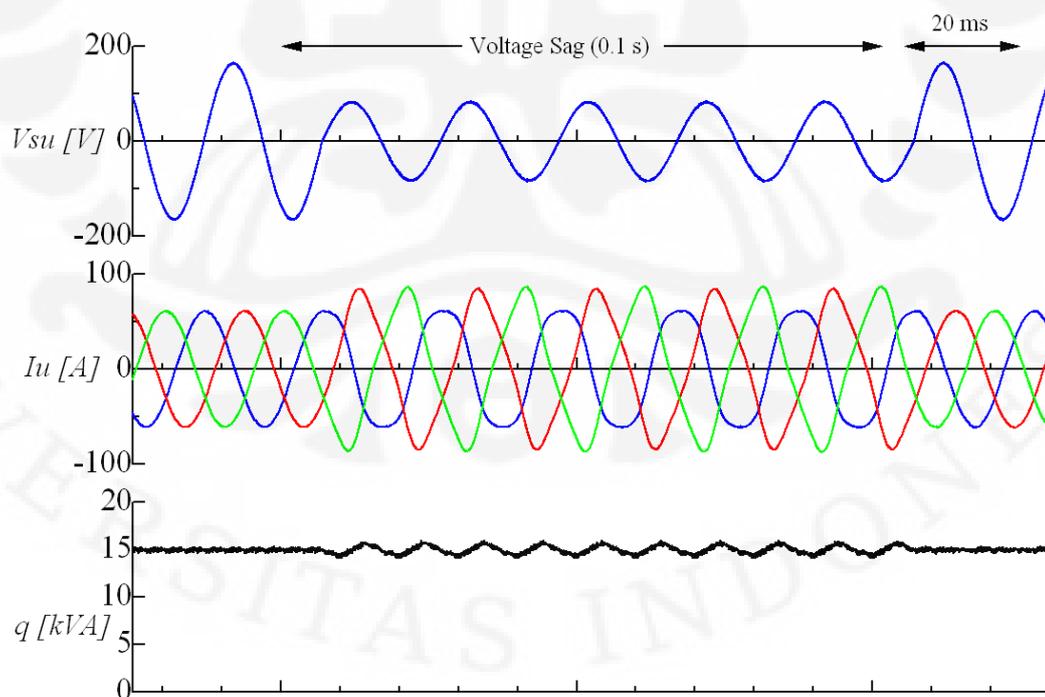
Gambar 4.23 Grafik Kondisi Tegangan Kedip 20% selama 100ms, Mode Kapasitif,  $q^* = 15\text{kVAR}$ ,  $v_C = 30\text{V}$

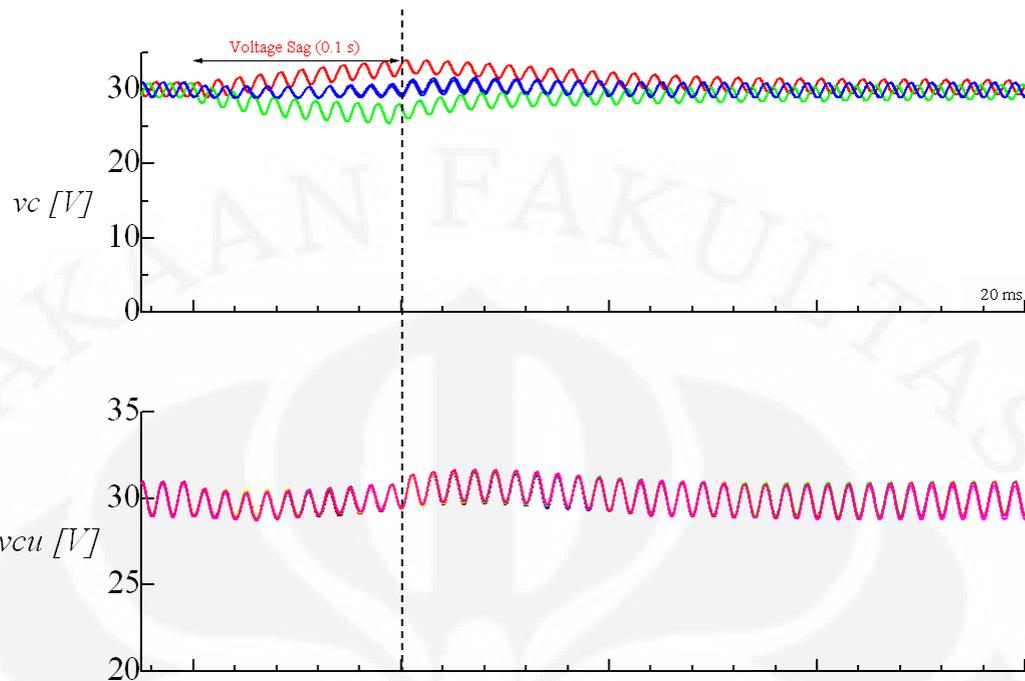
Pada keadaan ini terlihat tegangan pada fasa- $u$  mengalami gangguan tegangan kedip selama 5 siklus (100 ms). Hal ini menjadikan sistem tidak

seimbang sehingga mengakibatkan nilai arus yang mengalir pada fasa- $v$  dan fasa- $w$  mengalami kenaikan.

Adanya riak pada bagian daya reaktif menunjukkan adanya pengaruh tegangan kedip dalam pengaturan daya reaktif. Akan tetapi, dari simulasi terlihat besarnya nilai daya reaktif tetap konstan yang menandakan STATCOM masih mampu mengatur nilai daya reaktif yang bekerja. Sementara untuk nilai tegangan kapasitor, terlihat adanya perubahan nilai tegangan antar fasa yang sebelumnya seimbang menjadi tidak seimbang. Nilai untuk fasa- $v$  mengalami kenaikan sementara untuk fasa- $w$  mengalami penurunan selama tegangan kedip terjadi. Nilai maksimum yang dicapai oleh fasa- $u$  adalah 32 V sementara nilai minimum yang dicapai oleh fasa- $w$  adalah 28V selama tegangan kedip terjadi. Nilai ini menandakan adanya selisih sebesar 1 V dari nilai normal operasi (29-31 V). Akan tetapi, setelah tegangan kedip berhenti, tegangan kapasitor berangsur kembali seimbang. Hal ini menunjukkan kemampuan metode pengendalian yang diterapkan untuk mengatasi masalah tegangan kedip sebesar 20%.

#### 4.2.2.2 Simulasi Pada Kondisi Tegangan Kedip 50%





Gambar 4.24 Grafik Pada Kondisi Tegangan Kedip Muncul selama 100ms pada Mode Kapasitif,,  $q^* = 15\text{kVAR}$ ,  $v_C = 30\text{V}$

Pada keadaan ini tegangan pada fasa- $u$  mengalami gangguan tegangan kedip selama 5 siklus (100 ms). Hal ini menjadikan sistem tidak seimbang sehingga mengakibatkan kenaikan arus yang mengalir pada fasa- $v$  dan fasa- $w$ .

Adanya riak pada kurva daya reaktif menunjukkan adanya pengaruh tegangan kedip dalam pengaturan daya reaktif. Akan tetapi, besarnya nilai daya reaktif tetap konstan, yang menandakan STATCOM masih mampu mengatur nilai daya reaktif. Sementara nilai tegangan kapasitor memiliki nilai yang tidak seimbang. Nilai untuk fasa- $v$  mengalami kenaikan sementara untuk fasa- $w$  mengalami penurunan selama tegangan kedip terjadi. Akan tetapi, setelah tegangan kedip telah selesai, tegangan kapasitor berangsur kembali seimbang. Hal ini menunjukkan kemampuan metode pengendalian untuk mengatasi masalah tegangan kedip.

Pada level tegangan kedip sebesar 50% ini, terlihat pengaruh yang cukup signifikan pada parameter arus dan tegangan kapasitor selama tegangan kedip terjadi. Nilai arus pada fasa- $v$  dan fasa- $w$  memiliki nilai tertinggi hingga 84 A atau

35% lebih tinggi dari nilai normalnya. Sementara untuk nilai tegangan kapasitor didapatkan nilai tertinggi pada fasa-v adalah sebesar 34V sementara pada fasa-w didapatkan nilai minimum sebesar 25V.

Walaupun batas nilai untuk arus dan tegangan kapasitor sangat bergantung terhadap komponen yang digunakan, hasil ini mampu digunakan sebagai batas dalam penentuan besarnya tegangan kedip pada STATCOM. Sehingga batas untuk penerapan tegangan kedip ditetapkan hingga level ini.

## BAB 5

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa maka dapat diambil beberapa simpulan terkait penyusunan skripsi ini, yaitu :

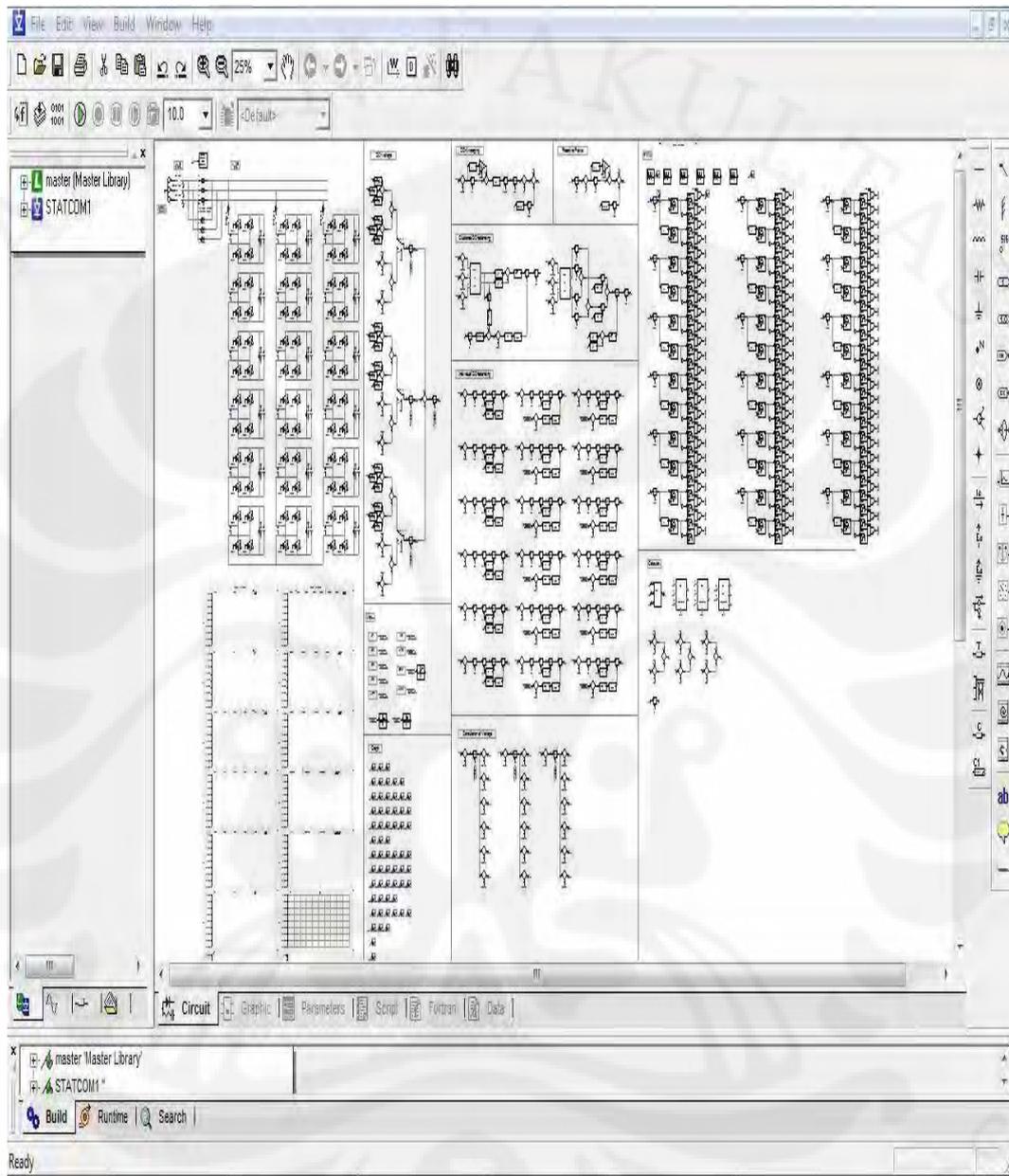
1. Pengendalian *Multilevel* STATCOM mampu mengendalikan daya reaktif sesuai dengan nilai referensi yang diberikan dalam mode operasi kapasitif, induktif, dan perpindahan.
2. Pengendalian penyeimbangan tegangan kapasitor berhasil berjalan dengan baik mampu menyeimbangkan tegangan kapasitor antar individu dan antar fasa selama STATCOM bekerja.
3. Multilevel STATCOM tanpa pengendalian tegangan kapasitor menjadikan tegangan kapasitor mengalami ketidakseimbangan apabila tegangan kedip terjadi.
4. Pengendalian tegangan kapasitor mampu menjaga tegangan kapasitor kembali kembali ke dalam kondisi normal setelah tegangan kedip terjadi sehingga menjadi *multilevel* STATCOM mampu mengurangi dampak gangguan tegangan kedip

## DAFTAR REFERENSI

- [1] B.Singh, R.Saha, A.Chandra,dan K.Al-Haddad, "Static Synchronous Compensator : A Review", IET Power Electronics, January.2008
- [2] N. G. Hingorani,dan L. Gyugyi, "Understanding FACTS; Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems," *IEEE Press book*, 2000.
- [3] J.Rodriguez, J.S.Lai,dan F.Z.Peng, "Multilevel Inverter : A Survey Topologies, Controls, and Applications," *IEEE Trans.Ind.Elec.*, vol.49, no.4, August.2002.
- [4] A. Nabae, I.Takahashi, dan H.Akagi, "A new neutral-point clamped PWM inverter," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. IA-17,pp.518-523, Sept./Oct. 1981.
- [5] H. Masdi, N.Mariun, S.M Bashi, A.Mohamed,dan S. Yusuf, "Construction of a Prototype D-STATCOM for Voltage Sags Mitigation", *Euro Journal of Scientific Research*, 2009.
- [6] T.Yoshii, S.Inoue,dan H.Akagi,"Control and Performance of Medium-Voltage Transformerless PWM STATCOM with Star-Configuration", *IEEE*,2006.
- [7] T.J Miller, "Reactive Power Control in Electric System", John Willey & Sons, 1982.
- [8] J. Dixon, L.Moran, J.Rodriguez, dan R.Dunke,"Reactive Power Compensation Technologies, State-of-the-Art Review", *IEEE*. 2005
- [9] A. Hammad,dan B.Roesle,"New Roles for STATIC VAR Compensators in Transmission System," *Brown Boveri Reviw*, Vol. 73 pp.314-320,Juni 1986.
- [10] N.Grudinin,dan I.Roytelman,"Heading off Emergencies in Large Electric Grids," *IEEE Spectrum*, Vol.34,no.4, April 1997.
- [11] M.Hagiwara,dan H.Akagi, "Control and Experiment of Pulsewidth-Modulated Modular Multilevel Converters," *IEEE Trans*,Vol.24,No.7,July 2009.
- [12] Sankaran,C. "Power Quality", CRC Press, Florida, 2002.
- [13] Dugan, C.Rugar., McGranaghan, Mark.F., Santoso, Surya., dan Beaty,H.Wayne., "Electrical Power System Quality", McGraw-Hill, 2004.

- [14] W.E. Reid, "Power Quality Issues – Standards and Guidelines", Proc IEEE Industry Applications, Vol. 32, No. 3, May/Jun 1996, pp. 625-632
- [15] Yoshii, Tsurugi. Master Thesis. Tokyo Institute of Technology. 2006
- [16] Maharjan, Laxma. Doctor Thesis. Tokyo Institute of Technology. 2010.
- [17] Manitoba HVDC Research Centre Inc. www. pscad.com
- [18] Xu Xiang-lian, Zou Yun-ping, Ding Kai, Wang Cheng-zhi, dan Jin Hong-yuan, "Research on d multilevel inverter and its application in STATCOM", Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China, hal 390-395, 2006.
- [19] R.E. Betz, T.Summers, dan T.Furney, "Symmetry Compensation using a H-Bridge Multilevel STATCOM with Zero Sequence Injection", IEEE.
- [20] Akagi,H, Kanazawa,Y, dan Nabae, A, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components", Vol IA-20, hal 625-630, IEEE Transactions on Industry Applications, 1984.

## LAMPIRAN



Gambar Rangkaian Simulasi Pada Perangkat Lunak PSCAD/EMTDC

**RECEIVED**

By Perpustakaan FTUI at 12:30 pm, Nov 23, 2010

Universitas Indonesia