



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**ESTIMASI TEGANGAN KAPASITOR DC PADA CASCADED  
H-BRIDGE MULTILEVEL CONVERTER PADA SISTEM  
PHOTOVOLTAIC**

Maisita Eka Listianingrum  
NRP 2213100002

Dosen Pembimbing  
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.  
Vita Lystianingrum B., ST., M.Sc., Ph.D.

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**  
**Fakultas Teknologi Elektro**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2017**



**FINAL PROJECT - TE 141599**

**DC CAPACITOR VOLTAGE ESTIMATION IN CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL CONVERTER IN PHOTOVOLTAIC SYSTEM**

Maisita Eka Listianingrum  
NRP 2213100002

Advisor  
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.  
Vita Lystianingrum B., ST., M.Sc., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT  
Faculty Of Electrical Technology  
Sepuluh Nopember Institute Of Technology  
Surabaya 2017

## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Estimasi Tegangan Kapasitor DC Pada Cascaded H-Bridge Multilevel Converter Pada Sistem Photovoltaic**” adalah benar-benar karya intelektual mandiri dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 10 April 2017

Maisita Eka Listianingrum  
NRP. 2213100002

# ESTIMASI TEGANGAN KAPASITOR DC PADA CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL CONVERTER PADA SISTEM PHOTOVOLTAIC

## TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Eri Surveatmojo, ST., MT., Ph.D.  
NIP : 198006032006041003

Dosen Pembimbing II

20.7.2017

Vita Lystianingrum B., ST., M.Sc., Ph.D.  
NIP : 198208292006042001



# **ESTIMASI TEGANGAN KAPASITOR DC PADA CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL CONVERTER PADA SISTEM PHOTOVOLTAIC**

Nama : Maisita Eka Listianingrum

NRP : 2213100002

Dosen Pembimbing 1 : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

Dosen Pembimbing 2 : Vita Lystianingrum B., ST., M.Sc., Ph.D.

## **ABSTRAK**

*Photovoltaic System (PV)* merupakan salah satu aplikasi energi baru dan terbarukan yang memanfaatkan energi matahari. Dalam proses konversi ini, tegangan output dc yang dihasilkan kecil sehingga perlu dilakukan upaya untuk menghasilkan energi dalam jumlah yang besar yaitu dengan menaikkan tegangan output dc menggunakan konverter. *Cascade H-Bridge Multilevel Converter (CHB-MC)* merupakan salah satu jenis converter yang mampu membangkitkan tegangan ke tingkat yang lebih tinggi. Di dalam CHB-MC, terdapat sensor untuk tegangan dc dan arus dc. Dengan bertambahnya jumlah tingkat/level, maka akan membutuhkan sensor dc yang lebih banyak pula. Akibatnya desain hardware menjadi lebih besar dan kurang ekonomis. Oleh Karena itu, di dalam tugas akhir ini akan dibahas tentang eliminasi sensor tegangan dan arus di sisi dc. Kemudian digantikan dengan sensor tegangan tunggal di sisi ac yang digunakan untuk memperkirakan besarnya tegangan tiap-tiap kapasitor. Hasilnya, estimasi tegangan kapasitor dc akan sama dengan tegangan pengukuran kapasitor dc. Selanjutnya dari tugas akhir ini, dapat dilihat karakteristik topologi *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* pada *Photovoltaic System (PV)* dan kemampuan kerja estimasi tegangan kapasitor (*Capacitor Voltage Estimation*).

Kata kunci : *Cascade H-Bridge (CHB) Converter, PS-PWM, Capacitor Voltage Estimation.*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **DC CAPACITOR VOLTAGE ESTIMATION IN CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL CONVERTER IN PHOTOVOLTAIC SYSTEM**

Name : Maisita Eka Listianingrum

NRP : 2213100002

Counsellor Lecturer 1 : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

Counsellor Lecturer 2 : Vita Lystianingrum B., ST., M.Sc., Ph.D.

## **ABSTRACT**

Photovoltaic System (PV) is one of the new and renewable energy applications that utilize solar energy. In this conversion process, the dc output voltage is small, so it is necessary to attempt to generate large amounts of energy by increasing the dc output voltage using a converter. Cascade H-Bridge Multilevel Converter (CHB-MC) is one type of converter that can generate voltage to a higher level. In conventional CHB-MC, there are sensors for dc voltage and dc currents. With increasing number of levels, it will required more dc sensors. As a result the hardware design becomes larger and less economical. Therefore, in this final project will be discussed about the elimination of voltage and current sensors on the dc side. Then replaced with a single voltage sensor on the ac side that is used to estimate voltage of each capacitor. As a result, the dc capacitor voltage estimation will be equal to the dc capacitor voltage measurement. Furthermore, from this final project, we can see the topology characteristics of Cascade H-Bridge Multilevel Converter on Photovoltaic System (PV) and Capacitor Voltage Estimation Capacitor (Capacitor Voltage Estimation).

Keywords : Cascade H-Bridge (CHB) Converter, Capacitor Voltage Estimation

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir dengan judul “Estimasi Tegangan Kapasitor DC Pada *Cascaded H Bridge Multilevel Converter* Pada Sistem *Photovoltaic*” dapat terselesaikan dengan baik.

Tugas akhir ini, merupakan salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar Sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik, Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Keluarga; Ibu saya Karmini, Ayah saya Dwi Ujud Margo Utomo, dan dua adik saya Shabrina Fajriyanti dan Revanda Septriana Utami yang telah memberikan motivasi serta dukungan moral sehingga penulis mampu bertahan menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D. dan Ibu Vita Lystianingrum B., ST., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan serta arahan sehingga buku tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
3. Yohan Prakoso, Putra Trimardian, Dian Akbar, Indra Dilianto, Wahyu Tri Wibowo, Mas Alief, dan Mas Jabbar yang telah meluangkan waktu untuk membantu memberikan solusi penyelesaian masalah di dalam penggerjaan tugas akhir ini
4. Adik-adik kos TMB 73 yang telah memberi dukungan moril serta membantu hal-hal teknis
5. Teman-teman e53 yang telah menjadi keluarga terdekat selama perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih belum sempurna, sehingga penulis memohon maaf atas segala kekurangan yang ada pada Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, saran dan masukan sangat diperlukan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan mahasiswa Teknik Elektro ITS.

Surabaya, Juni 2017

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

**HALAMAN JUDUL**  
**PERNYATAAN KEASLIAN**  
**HALAMAN PENGESAHAN**

<b>ABSTRAK .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vii</b>
<b>TABLE OF CONTENTS.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xiii</b>

### **BAB 1 PENDAHULUAN**

1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah .....	2
1.5 Metodologi.....	2
1.6 Sistematika Penulisan .....	3
1.7 Relevansi .....	4

### **BAB 2 CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL CONVERTER PADA SISTEM PHOTOVOLTAIC**

2.1 <i>Cascade H-Bridge Multilevel Converter (CHB-MC) Pada Sistem Photovoltaic.....</i>	<i>5</i>
2.1.1 Topologi CHB-MC Pada Sistem Photovoltaic.....	5
2.1.2 Teknik Pensaklaran .....	6
2.1.3 PS-PWM .....	8
2.1.4 Output Tegangan Cascade H-Bridge Multilevel Converter.....	10
2.2 Karakteristik Photovoltaic (PV).....	11
2.2.1 Rangkaian Ekivalen Sel Surya Ideal.....	11
2.2.2 Kurva I-V dan P-V .....	12
2.3 Filter.....	13

### **BAB 3 ESTIMASI TEGANGAN KAPASITOR DC PADA CASCADE H-BRIDGE MULTILEVEL CONVERTER PADA SISTEM PHOTOVOLTAIC**

3.1 Konfigurasi Sistem <i>Cascade H-Bridge Multilevel Converter</i> Pada Sistem PV .....	15
3.2 Parameter <i>Cascade H-bridge Multilevel Converter</i> Pada Sistem <i>Photovoltaic</i> .....	17
3.3 Desain Panel Surya/ <i>Photovoltaic</i> (PV) .....	19
3.4 Pengujian Panel Surya ( <i>Photovoltaic</i> ) .....	20
3.5 <i>Phase Shift</i> (PS) PWM.....	22
3.6 Kontrol PS-PWM .....	24
3.7 <i>Capacitors Voltages Estimation Module</i> (CVEM).....	26

### **BAB 4 HASIL SIMULASI SISTEM DAN ANALISIS DATA**

4.1 Karakteristik Kerja <i>Cascade H-Bridge Multilevel Converter</i> .	32
4.1.1 Analisis <i>Phase-Shifted PWM</i> .....	32
4.1.2 Tegangan Output Inverter .....	34
4.2 Kemampuan CVEM Dalam Menentukan Tegangan Estimasi Kapasitor Dc-Link .....	35
4.2.1 Estimasi Kapasitor Dengan Nilai Iradiasi Berubah...	37
4.2.2 Estimasi Kapasitor Dengan Nilai Beban Berubah ....	39

### **BAB 5 PENUTUP**

5.1 Kesimpulan .....	43
5.2 Saran .....	43

**DAFTAR PUSTAKA .....** 45

**LAMPIRAN .....** 47

**RIWAYAT HIDUP .....** 53

## TABLE OF CONTENTS

### TITLE PAGE

### STATEMENT OF AUTHENTICITY SHEET

### APPROVAL SHEET

ABSTRACT (IND).....	i
ABSTRACT (ENG) .....	iii
PREFACE.....	v
TABLE OF CONTENTS (BAHASA).....	vii
TABLE OF CONTENTS .....	ix
ILLUSTRATIONS.....	xi
TABLES.....	xiii

### CHAPTER 1 INTRODUCTION

1.1 Background of Problem .....	1
1.2 Problems .....	2
1.3 Objectives .....	2
1.4 Limitations .....	2
1.5 Methodology .....	2
1.6 Writing Systematics.....	3
1.7 Relevance.....	4

### CHAPTER 2 CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL CONVERTER IN PHOTOVOLTAIC SYSTEM

2.1 Cascade H-Bridge Multilevel Converter (CHB-MC) In Photovoltaic System.....	5
2.1.1 Topology of CHB-MC in Photovoltaic System.....	5
2.1.2 Switching Technique .....	6
2.1.3 PS-PWM.....	8
2.1.4 Output Voltage of Cascade H-Bridge Multilevel Converter .....	10
2.2 Characteristic of Photovoltaic (PV) .....	11
2.2.1 Equivalen Circuit of Ideal PV .....	11
2.2.2 I-V and P-V Curve .....	12
2.3 Filter.....	13

## **CHAPTER 3 DC CAPACITOR VOLTAGE ESTIMATION IN CASCADE H-BRIDGE MULTILEVEL CONVERTER IN PHOTOVOLTAIC SYSTEM**

3.1	Configuration System of Cascade H-Bridge Multilevel Converter in PV System.....	15
3.2	Parameter of Cascade H-Bridge Multilevel Converter In PV System .....	17
3.3	Design of Photovoltaic (PV) .....	19
3.4	Photovoltaic Testing.....	20
3.5	Phase Shift (PS) PWM.....	22
3.6	PS-PWM Control .....	24
3.7	Capacitors Voltages Estimation Module (CVEM) .....	26

## **CHAPTER 4 SIMULATION RESULT AND DATA ANALYSIS**

4.1	Working Characteristic of Cascade H-Bridge Multilevel Converter .....	32
4.1.1	Phase-Shifted PWM Analysis .....	32
4.1.2	Output Voltage of Inverter .....	34
4.2	Capability of CVEM to Determine the Voltage Estimation Dc-Link Capacitors .....	35
4.2.1	Capacitor Estimation With Changing of Irradiation .	37
4.2.2	Capacitor Estimation With Changing of Load.....	39

## **CHAPTER 5 CLOSING**

5.1	Conclusion .....	43
5.2	Advice.....	43

<b>REFERENCE.....</b>	<b>45</b>
-----------------------	-----------

<b>ENCLOSURE.....</b>	<b>47</b>
-----------------------	-----------

<b>BIOGRAPHY.....</b>	<b>53</b>
-----------------------	-----------

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Topologi <i>Cascade H-Bridge Multilevel Converter</i> .....	5
Gambar 2.2	Diagram inverter full bridge .....	6
Gambar 2.3	Unipolar SPWM.....	7
Gambar 2.4	Bipolar SPWM.....	7
Gambar 2.5	Bipolar SPWM.....	7
Gambar 2.6	Unipolar SPWM.....	8
Gambar 2.7	Multicarrier PWM pada multilevel inverter.....	8
Gambar 2.8	Diagram kontrol PS-PWM.....	9
Gambar 2.9	<i>Multicarrier</i> untuk 5 level CHB dengan PS-PWM.....	10
Gambar 2.10	Perbandingan bentuk tegangan output: (a) dua level, (b) tiga level, (c) sembilan level .....	10
Gambar 2.11	Prinsip kerja PV .....	11
Gambar 2.12	<i>Cell, modul, panel, array</i> pada panel surya.....	11
Gambar 2.13	(a) primer, (b) sederhana.....	12
Gambar 2.14	(a) Karakteristik I-V, (b) Karakteristik P-V .....	13
Gambar 3.1	Konfigurasi sistem <i>cascade h-bridge multilevel converter</i> pada sistem <i>photovoltaic</i> .....	15
Gambar 3.2	Konfigurasi estimasi tegangan kapasitor dc pada <i>cascade hbridge multilevel converter</i> pada sistem <i>photovoltaic</i> . 16	16
Gambar 3.3	Kurva karakteristik arus terhadap tegangan (V-I) PV... 21	21
Gambar 3.4	Kurva karakteristik daya terhadap tegangan (V-P) PV. 22	22
Gambar 3.5	Rangkaian switching <i>cascade H-bridge multilevel</i> inverter untuk 2 <i>H-bridge</i> (5 level) .....	23
Gambar 3.6	Kontrol PS-PWM <i>cascade H-bridge multilevel</i> inverter untuk 2 <i>H-bridge</i> (5 level) .....	24
Gambar 3.8	Blok diagram kontrol tegangan ( <i>voltage controller</i> ).... 28	28
Gambar 4.1	Sinyal carrier dengan beda fasa 90°, $f_c = 500\text{Hz}$ , $t = 0.01\text{s}$ .....	32
Gambar 4.2	Sinyal modulasi dan <i>carrier</i> untuk 5 level .....	33
Gambar 4.3	Output PS-PWM .....	33
Gambar 4.4	Pola <i>switching</i> pada H-bridge 1.....	34
Gambar 4.5	Tegangan output <i>cascade H-bridge</i> multilevel inverter 34	34
Gambar 4.6	Level tegangan output .....	35
Gambar 4.7	Perbandingan tegangan estimasi kapasitor 1 dan tegangan pengukuran kapasitor 1.....	36
Gambar 4.8	Perbandingan tegangan estimasi kapasitor 2 dan tegangan pengukuran kapasitor 2.....	36

Gambar 4.9	Tegangan estimasi dan tegangan kapasitor dengan kondisi iradiasi terus menurun.....	37
Gambar 4.10	Tegangan estimasi dan tegangan kapasitor dengan kondisi iradiasi naik-turun.....	38
Gambar 4.11	Tegangan estimasi dan tegangan kapasitor dengan $R=21,5\Omega$ dan iradiasi berubah.....	40
Gambar 4.12	Tegangan estimasi dan tegangan kapasitor dengan $R=30\Omega$ dan iradiasi berubah.....	40
Gambar 4.13	Tegangan estimasi dan tegangan kapasitor dengan $R=44,34\Omega$ dan iradiasi berubah .....	41

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter <i>sensorless cascade H-bridge multilevel converter</i> pada sistem <i>photovoltaic</i> .....	18
Tabel 3.2	Spesifikasi panel surya <i>viridian solar PV 15</i> .....	19
Tabel 3.3	Spesifikasi PV <i>array</i> masing-masing <i>H-bridge</i> .....	20
Tabel 3.4	Daya referensi untuk 2 PV <i>array</i> (10 PV) pada perubahan iradiasi.....	21
Tabel 3.5	Tabel penyaklaran untuk 5 level .....	23
Tabel 3.6	Keadaan penyaklaran untuk 5 level <i>cascade H-bridge multilevel</i> inverter .....	23
Tabel 3.7	Parameter PS-PWM .....	26
Tabel 3.8	Prinsip kerja fungsi switching.....	28
Tabel 4.1	Perbandingan tegangan output inverter dengan tegangan dc .....	35
Tabel 4.2	Nilai Tegangan Estimasi dan Tegangan Pengukuran Pada iradiasi 1000W/m <sup>2</sup> .....	36
Tabel 4.3	Nilai Tegangan Estimasi dan Tegangan Pengukuran Pada Iradiasi yang Terus Menurun.....	37
Tabel 4.4	Nilai Tegangan Estimasi dan Tegangan Pengukuran Pada Iradiasi yang naik-turun.....	38
Tabel 4.5	Nilai Tegangan Estimasi dan Tegangan Pengukuran Pada beban dan Iradiasi berbeda .....	39

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Seiring meningkatnya konsumsi energi global, berbagai upaya pengembangan teknologi energi baru dan terbarukan telah dilakukan. *Photovoltaic System (PV)* merupakan salah satu aplikasi energi baru dan terbarukan yang memanfaatkan energi matahari. Prinsip kerja PV adalah mengubah atau mengonversi energi panas menjadi energi listrik. Dalam proses konversi ini, tegangan output dc yang dihasilkan kecil sehingga dilakukan upaya untuk menghasilkan energi dalam jumlah yang besar yaitu dengan menaikkan tegangan output dc menggunakan konverter. Setelah itu, barulah diubah menjadi tegangan ac melalui inverter[1].

*Cascade H-Bridge Multilevel Converter* merupakan salah satu jenis converter yang mampu membangkitkan tegangan ke tingkat yang lebih tinggi. Dalam *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* konvensional, terdapat sensor untuk tegangan dc dan arus dc. Sensor tegangan dc ini diarahkan menuju MPPT sedangkan sensor arus akan diarahkan ke sistem kontrol tegangan kapasitor dan pulsedwidth modulation (PWM). Dengan bertambahnya jumlah tingkat/level dalam *Cascade H-Bridge Multilevel Converter*, maka akan membutuhkan sensor dc yang lebih banyak pula. Akibatnya desain hardware menjadi lebih besar, kompleks dan membutuhkan biaya yang lebih besar [2].

Penelitian tentang aplikasi dari *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* pada *Photovoltaic System (PV)* sudah banyak dilakukan. Namun masih sedikit yang membahas eliminasi sensor di sisi dc. Beberapa paper hanya menjelaskan tentang pengurangan jumlah sensor di tegangan sisi dc. Eliminasi sensor tegangan dc ini digantikan dengan sensor tunggal di sisi ac dengan berbasis *static synchronous compensator (STATCOM)*. Hasilnya, frekwensi sampling untuk pengukuran tegangan kapasitor rendah dan bervariasi. Padahal seharusnya frekwensi sampling dijaga konstan yaitu dua kali frekwensi switching [2]. Selain itu pada [3], sensor tegangan kapasitor digantikan dengan sebuah pengamat. Namun, karena lambatnya dinamika pengamat membuat metode ini tidak cocok untuk switching PWM.

Oleh Karena itu, di dalam tugas akhir ini akan dibahas tentang eliminasi sensor tegangan dan arus di sisi dc. Kemudian digantikan dengan sensor tunggal di sisi ac. Selanjutnya dari tugas akhir ini, dapat

dilihat estimasi tegangan kapasitor dc dan karakteristik dari topologi *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* pada *Photovoltaic System (PV)*.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Dengan adanya banyak sensor, menyebabkan design dan dimensi dari *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* kompleks dan kurang ekonomis. Oleh karena itu, di dalam tugas akhir ini akan dibahas:

1. Model dan simulasi dari rangkaian *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* pada *Photovoltaic System (PV)*.
2. Menganalisa dan membandingkan hasil estimasi tegangan kapasitor dc dan tegangan pengukuran kapasitor dc pada system *Cascade H-Bridge Multilevel Converter*

## **1.3 Tujuan**

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah:

1. Merancang model dan simulasi dari rangkaian *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* pada *Photovoltaic System (PV)*.
2. Menganalisa dan membandingkan hasil estimasi tegangan kapasitor dc dan tegangan pengukuran kapasitor dc pada system *Cascade H-Bridge Multilevel Converter*

## **1.4 Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. Pada penelitian ini, beban yang digunakan berupa beban resistif ( $R$ ).
2. Analisis dilakukan dengan mengamati kerja *Phase Shift (PS-PWM)* dan *Capasitor Voltage Estimation Module (CVEM)*.

## **1.5 Metodologi**

Metode yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

### **1. Studi Literatur**

Merupakan kegiatan mempelajari prinsip kerja dari topologi *Cascade H-Bridge Multilevel Converter*. Beberapa hal yang perlu dipelajari diantaranya metode switching, diperlukan teknik *Phase Shifted (PS)-PWM* untuk membangkitkan sinyal switching tiap H-Bridge, *Capacitor Voltage Estimation* untuk memperkirakan nilai tegangan tiap-tiap kapasitor untuk topologi *Cascade H-Bridge Multilevel Converter*.

## **2. Identifikasi dan Perancangan Sistem**

Pada tahap ini akan dilakukan identifikasi serta perancangan sistem yang akan dibuat. Topologi yang akan digunakan pada tugas akhir ini adalah *Cascade H-Bridge Multilevel Converter*. Kemudian menentukan parameter-parameter pada sistem yang akan digunakan seperti tegangan output, jumlah level, spesifikasi PV, dan lain-lain. Selanjutnya menentukan skema estimasi tegangan kapasitor.

## **3. Simulasi Sistem**

Tahap ini adalah mensimulasikan sistem secara keseluruhan. Dimana setelah menentukan nilai-nilai komponen dan merancang sistem, hasil dari perancangan tersebut dapat digunakan pada tahap simulasi. Simulasi akan dilakukan dengan menggunakan software PSIM. Data yang diperoleh saat tahap identifikasi dan perancangan sistem akan dimasukkan ke tiap komponen sistem yang ada pada software, dan setelah itu simulasi dapat dilakukan.

## **4. Analisis Data**

Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap hasil simulasi yang telah dilakukan. Analisa yang dilakukan meliputi bentuk sinyal *switching* pada *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* dari metode PS-PWM dan kerja CVEM.

## **5. Kesimpulan**

Kesimpulan didapatkan berdasarkan hasil analisa yang diperoleh dari simulasi dan perhitungan *Cascade H-Bridge Multilevel Converter*.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini terbagi atas lima bagian sebagai berikut:

## **BAB 1 Pendahuluan**

Bab 1 berisi latar belakang penulisan, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi Tugas Akhir ini.

## **BAB 2 Dasar Teori**

Bab ini berisi teori penunjang tentang topologi *Cascade H-Bridge Multilevel Converter*, teknik penyaklaran untuk *Cascade H-Bridge Multilevel Converter*, dan estimasi tegangan kapasitor (*capacitor voltage estimation*).

## **BAB 3 Perancangan Sistem**

Bab ini berisi perancangan *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* Pada Sistem PV secara matematis, perancangan *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* Pada Sistem PV menggunakan software PSIM, dan modul estimasi tegangan kapasitor (*capacitor voltage estimation module*).

## **BAB 4 Pengujian Sistem Dan Analisis Data**

Bab ini berisi pengujian dan analisis hasil simulasi. Pengujian dan analisis ini dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi tegangan estimasi dan tegangan pengukuran kapasitor dc dari sistem *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* Pada Sistem PV.

## **BAB 5 Kesimpulan Dan Saran**

Bab ini berisi kesimpulan dari analisis yang telah dilakukan. Selain itu juga berisi saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

### **1.7 Relevansi**

Hasil dari pelaksanaan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, antara lain:

1. Menjadi referensi untuk penelitian dan pengembangan topologi *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* Pada Sistem PV
2. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang hendak mengambil tugas akhir dengan masalah serupa.

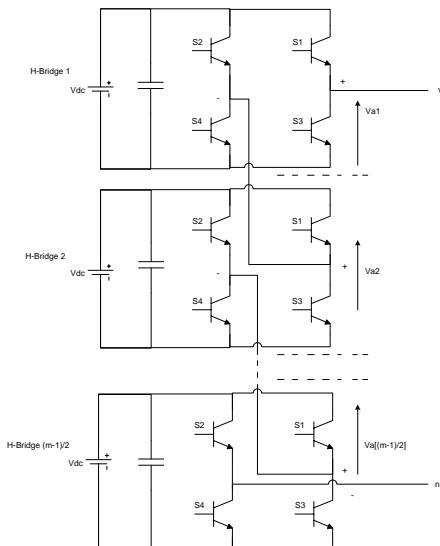
## BAB II

### **CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL CONVERTER PADA SISTEM PHOTOVOLTAIC**

#### **2.1 Cascade H-Bridge Multilevel Converter (CHB-MC) Pada Sistem Photovoltaic**

##### **2.1.1 Topologi CHB-MC Pada Sistem Photovoltaic**

Topologi *cascade multilevel converter* terdiri dari N H-Bridge (1 fasa, *full bridge*) konverter yang dihubungkan secara seri. Tujuan dari bentuk *cascade* (bertingkat) adalah untuk menaikkan tegangan output. Jumlah level bertambah berdasarkan jumlah H-bridge yang terhubung seri [4]. Masing-masing H-bridge terhubung dengan sebuah dc-link kapasitor yang menjadi tempat penyimpanan energi dari sumber *photovoltaic* (PV). Selain itu, tiap H-bridge juga mampu menghasilkan tegangan output  $+V_{dc}$ ,  $0$ ,  $-V_{dc}$ , tergantung dari mode penyaklaran (*switching*) [5].



**Gambar 2.1 Topologi Cascade H-Bridge Multilevel Converter**

Untuk menghasilkan  $+V_{dc}$ , maka switch S1 dan S4 dinyalakan “ON”. Untuk menghasilkan  $-V_{dc}$ , maka switch S2 dan S3 dinyalakan

“ON”. Sedangkan dengan menyalakan switch S1 dan S2 atau S3 dan S4 maka tegangan output sama dengan nol “0”. Output AC dari *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* merupakan penjumlahan dari output inverter masing-masing H-bridge yang dihubungkan secara seri.

$$V_{an} = V_a 1 + V_a 2 + V_a [(n - 1/2)] \quad (2.1)$$

Jumlah level tegangan (n) dari *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* diperoleh dari:

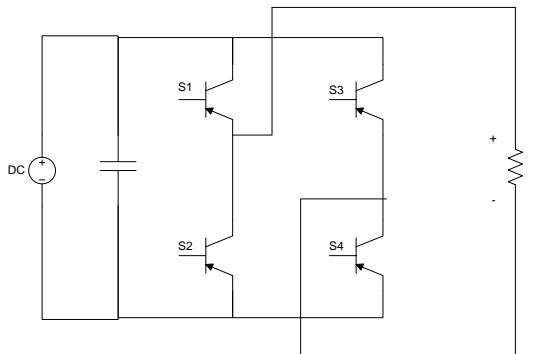
$$n = 2N + 1 \quad (2.2)$$

dimana N adalah jumlah H-bridge. Sehingga untuk 1 *cell* (H-bridge) mampu membangkitkan 3 level output tegangan.

*Cascade multilevel converter* biasanya diaplikasikan pada *static var generation*, sumber energi terbarukan (*renewable energy source*), untuk baterai [6].

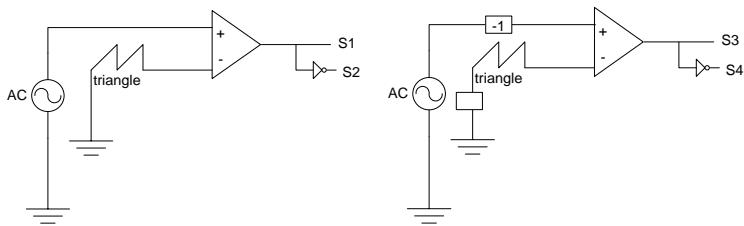
### 2.1.2 Teknik Pensaklaran

SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*) adalah modulasi yang paling umum digunakan untuk mengontrol komponen semikonduktor pada inverter. SPWM diperoleh dengan membandingkan gelombang sinus dengan gelombang *carrier* yang berupa gelombang segitiga. Berikut rangkaian pembangkit SPWM.

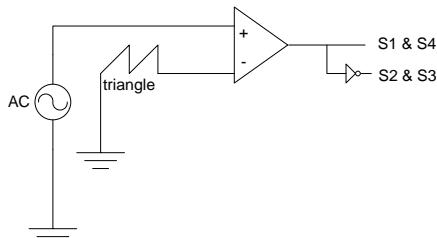


**Gambar 2.2** Diagram inverter full bridge

Berikut merupakan rangkaian pembangkitan SPWM:

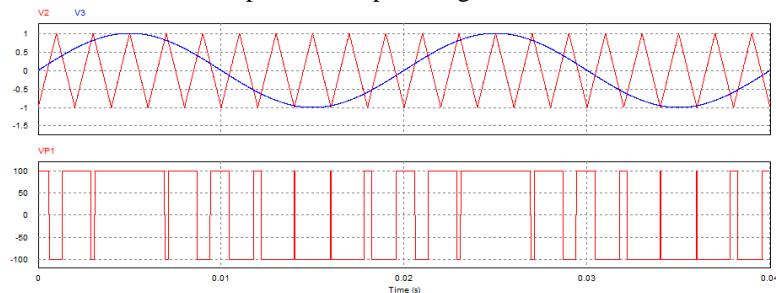


**Gambar 2.3** Unipolar SPWM

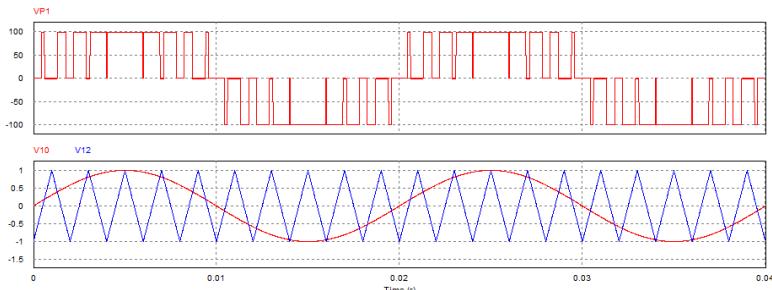


**Gambar 2.4** Bipolar SPWM

Berikut merupakan hasil pembangkitan SPWM:



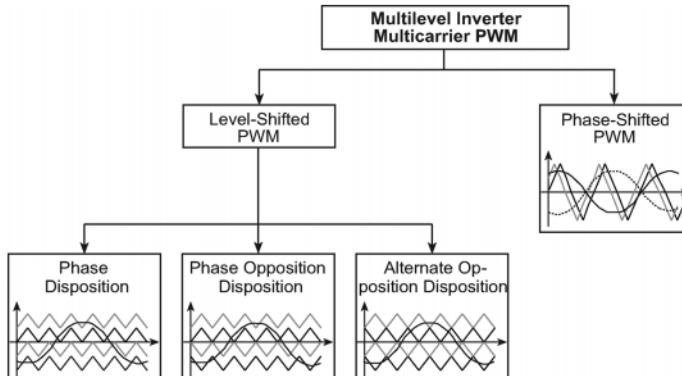
**Gambar 2.5** Bipolar SPWM



**Gambar 2.6** Unipolar SPWM

Teknik pensaklaran komponen semikonduktor pada inverter multilevel berbeda dengan inverter konvensional. Pengaturan inverter multilevel sedikit lebih kompleks dari teknik SPWM biasa. Tujuannya agar diperoleh gelombang output yang lebih mendekati gelombang sinus, dan untuk mencegah kerusakan pada komponen semikonduktor tersebut.

Teknik pensaklaran untuk multilevel inverter terbagi menjadi dua macam yaitu *level shifted* (LS-PWM) yang juga dikenal sebagai *phase disposition* (PD-PWM) dan *phase shifted* (PS-PWM). Berikut diagram pembagian jenis pensaklaran untuk multilevel inverter dapat dilihat pada gambar 2.7.



**Gambar 2.7** Multicarrier PWM pada multilevel inverter [7].

### 2.1.3 PS-PWM

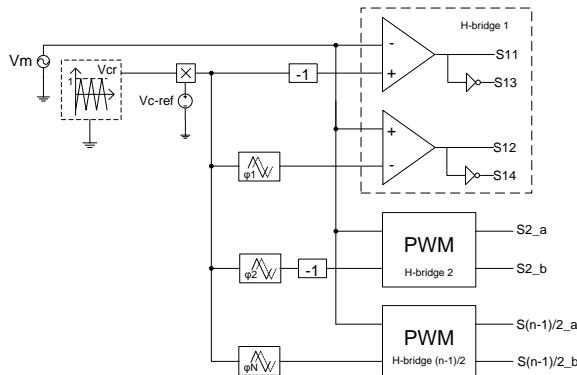
Teknik pensaklaran (modulasi) yang biasanya digunakan untuk inverter dengan topologi *Cascade H-Bridge Multilevel* adalah PS-PWM.

Modulasi dilakukan terpisah (pada masing-masing H-bridge) menggunakan sinusoidal unipolar PWM. Pergeseran fasa sinyal ( $\varphi$ ) *carrier* pada CHB-MC dirumuskan dengan:

$$\varphi = \frac{180}{N} \quad (2.3)$$

dimana N adalah jumlah *cell* (H-bridge) [7].

Diagram kontrol PS-PWM dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut:



**Gambar 2.8** Diagram kontrol PS-PWM

Besarnya amplitudo indeks modulasi [8]:

$$m_a = \frac{A_m}{(n-1)A_c} \quad (2.4)$$

dimana;

$A_m$  = Amplitudo sinyal modulasi

$A_c$  = Amplitudo sinyal *carrier*

n = Level tegangan

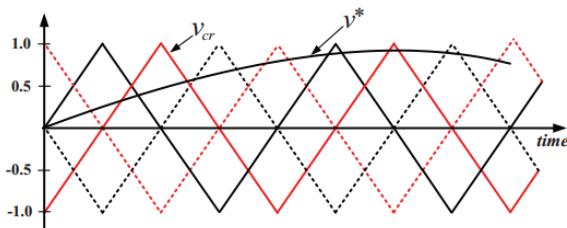
Besarnya indeks modulasi frekwensi [8]:

$$m_f = \frac{f_c}{f_m} \quad (2.5)$$

dimana;

$f_c$  = frekwensi *carrier*

$f_m$  = frekwensi modulasi

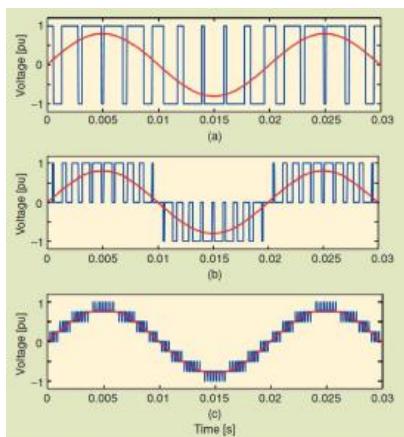


**Gambar 2.9** Multicarrier untuk 5 level CHB dengan PS-PWM [9]

Gambar 2.9 merupakan multicarrier untuk 5 level CHB. Sehingga berdasarkan persamaan 2.2, dapat diketahui bahwa terdapat 2 H-bridge. Selanjutnya diperlukan 2 sinyal *carrier* ( $V_{cr}$ ) seperti sinyal segitiga berwarna merah dan hitam diatas yang kemudian dimodulasi dengan sinyal sinusoidal. Untuk pergeseran fasa antar sinyal *carrier* dapat diperoleh melalui persamaan 2.3, sehingga pada gambar 2.9 bisa diperoleh  $\phi = 90^\circ$ .

#### 2.1.4 Output Tegangan *Cascade H-Bridge Multilevel Converter*

Dengan bertambahnya jumlah level tegangan, maka bentuk tegangan output CHB juga bertambah. Berikut perbandingan bentuk tegangan output CHB dengan level tegangan yang berbeda:

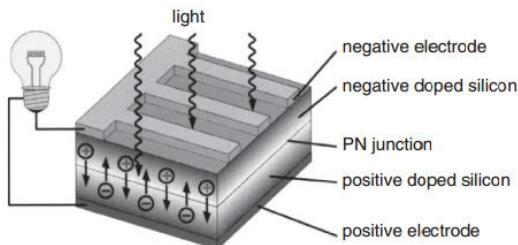


**Gambar 2.10** Perbandingan bentuk tegangan output: (a) dua level, (b) tiga level, (c) sembilan level

Dari gambar tersebut, terlihat bahwa jumlah level dapat dihitung dari banyaknya tingkat yang berbentuk tangga dalam waktu  $\pi$ . Kemudian sesuai persamaan 2.2, dapat diperoleh jumlah level.

## 2.2 Karakteristik Photovoltaic (PV)

Panel surya (PV) terbuat dari bahan semikonduktor sehingga memungkinkan menjadi bersifat konduktif saat mendapat panas dan cahaya. Beberapa hal yang mempengaruhi output PV adalah temperatur, debu dan kotoran, awan, dan konversi AC-DC.

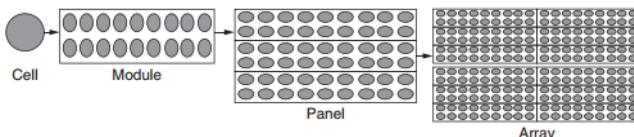


Gambar 2.11 Prinsip kerja PV [6].

Gambar 2.11 menunjukkan prinsip kerja panel surya. Saat p-n junction dari dioda tersebut terpapar cahaya, maka yang terjadi selanjutnya adalah konversi energi dari cahaya menjadi listrik, dimana energi dari photon cukup untuk melepaskan ikatan electron terluar dari material tersebut. Aliran arus kemudian akan terjadi saat sel surya dihubungkan dengan sebuah beban

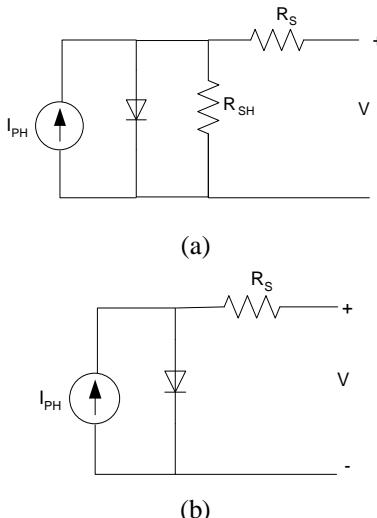
### 2.2.1 Rangkaian Ekivalen Sel Surya Ideal

PV modul adalah gabungan dari banyak sel surya yang dihubungkan baik secara seri maupun parallel, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Cell, modul, panel, array pada panel surya [6].

Sebuah sel surya yang ideal dibentuk dengan cara menghubungkan sebuah sumber arus yang anti paralel dengan dioda. Karakteristik untuk sel surya selalu tidak ideal, sehingga pada praktiknya perlu ditambahkan dengan komponen resistansi seri dan resistansi parallel. Berikut rangkaian ekivalen PV.



**Gambar 2.13** (a) primer, (b) sederhana

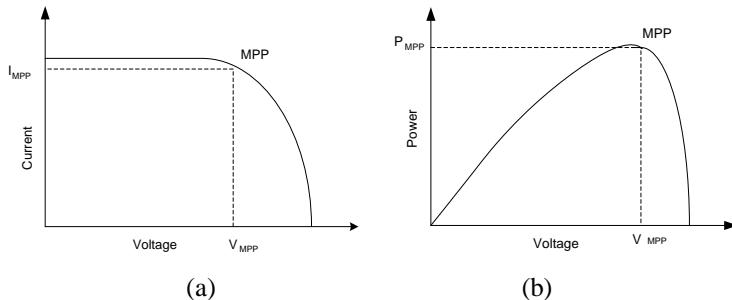
Pada rangkaian primer, dalam keadaan normal, nilai  $R_s$  kecil dan  $R_{sh}$  relatif besar. Kondisi ideal untuk sel surya yaitu temperatur  $25^\circ\text{C}$  dan *irradiance*  $1000 \text{ W/m}^2$ .

### 2.2.2 Kurva I-V dan P-V

Sebelum panel PV dihubungkan dengan beban, sebuah PV akan menghasilkan tegangan sirkuit terbuka ( $V_{oc}$ ), namun tanpa adanya arus yang mengalir. Sedangkan apabila ujung terminal PV dihubung singkatkan, maka akan mengalir arus sirkuit hubung singkat ( $I_{sc}$ ), tetapi dengan nilai tegangan nol. Pada kedua kasus tersebut, tidak ada daya yang diproduksi maupun yang diterima beban.

Saat beban sebenarnya dihubungkan, maka akan menghasilkan daya yang terjadi akibat kombinasi dari arus dan tegangan, dimana nilainya didasarkan pada karakteristik kurva I-V. Nilai daya maksimal

(MPP) adalah titik tikung di ujung kurva I-V dimana merupakan hasil dari perkalian arus maksimal dan tegangan maksimal ( $I_m$  dan  $V_m$ ), dimana pada kasus umum disebut dengan VR dan IR (tegangan *rated* dan arus *rated*)



**Gambar 2.14** (a) Karakteristik I-V, (b) Karakteristik P-V

### 2.3 Filter

Filter yang dipasang pada keluaran inverter, berfungsi untuk menyaring frekwensi sehingga diperoleh frekwensi yang diinginkan. Arus dan tegangan pada sisi luaran inverter merupakan gelombang (*Alternating Current*) AC yaitu berupa gelombang sinusoidal. Gelombang ini membutuhkan waktu tertentu untuk menempuh satu gelombang. Banyaknya gelombang dalam waktu satu detik itulah yang dinamakan frekwensi. Itulah penyebab gelombang AC dikatakan memiliki frekwensi.

Filter frekwensi sendiri dibagi menjadi dua yaitu filter aktif dan filter pasif. Filter aktif adalah filter yang menggunakan komponen-komponen elektronik pasif dan aktif seperti *operational amplifier* (OP-AMP), transistor dan komponen lainnya. Filter pasif adalah rangkaian filter yang menggunakan komponen pasif saja seperti resistor, kapasitor, dan induktor. Perbedaan komponen aktif dan pasif adalah, pada komponen aktif membutuhkan sumber lagi agar dapat bekerja, sedangkan pada komponen pasif tidak membutuhkan sumber lagi untuk bekerja.

Terdapat beberapa filter frekwensi pasif, *low pass filter* (LPF) yaitu filter yang hanya melewaskan frekwensi rendah, *high pass filter* (HPF) yaitu filter yang hanya melewaskan frekwensi tinggi, *band stop filter* (BSF) yaitu filter yang memilih frekwensi tertentu untuk tidak

dilewatkan dan melewatkannya frekwensi lain, *band pass filter* (BPF) yaitu filter yang melewatkannya frekwensi tertentu dan tidak melewatkannya frekwensi lain (kebalikan BSF), dan *all pass filter* (APF) yaitu filter yang melewatkannya semua frekwensi (fungsinya hanya mengubah fase input).

Pada tugas akhir ini, yang digunakan adalah LPF filter. Filter LPF yang digunakan nantinya adalah L filter. Filter ini dipasang seri dengan line. Berikut persamaan nilai L [10]:

$$X_L = R \quad (2.6)$$

$$2\pi f_C = \frac{R}{L} \quad (2.7)$$

$$L = \frac{R}{2\pi f_C} \quad (2.8)$$

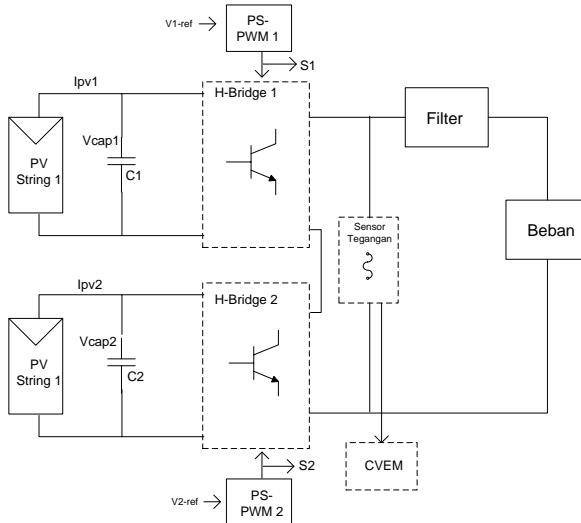
### BAB III

## ESTIMASI TEGANGAN KAPASITOR DC PADA CASCADE H-BRIDGE MULTILEVEL CONVERTER PADA SISTEM PHOTOVOLTAIC

Pada bab 3 ini, akan dibahas proses perancangan *estimasi tegangan kapasitor dc pada cascade h-bridge multilevel converter* pada sistem *photovoltaic*. Perancangan ini akan dijabarkan dalam bentuk perhitungan matematis serta gambar konfigurasi sistem. Selanjutnya, hasil dari perancangn ini akan digunakan sebagai bahan simulasi dan analisa pada bab selanjutnya.

### 3.1 Konfigurasi Sistem *Cascade H-Bridge Multilevel Converter* Pada Sistem PV

Konfigurasi sistem *cascade H-bridge multilevel converter* pada sistem *photovoltaic* dapat dilihat pada gambar 3.1 dibawah.

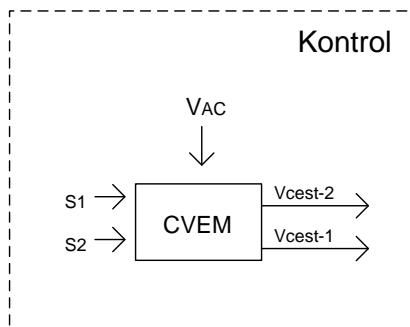


**Gambar 3.1** Konfigurasi sistem *cascade h-bridge multilevel converter* pada sistem *photovoltaic*.

Skema pada gambar 3.1 terdiri dari pemodelan *photovoltaic* (PV), *H-bridge* inverter, *phase shift* (PS)-*PWM*, sensor tegangan output,

blok control, filter LC, dan beban resistif. Sistem integrasi pada penelitian ini tidak terhubung grid sehingga tidak dilakukan kontrol terhadap arus dan tegangan akibat perubahan beban.

Pada konfigurasi *cascade h-bridge multilevel converter* pada sistem *photovoltaic*, sinyal *switching* inverter dibangkitkan dengan metode *phase shift* (PS)-PWM. Output dari *cascade* inverter ini berupa gelombang AC satu fasa dengan n-level. Kemudian dengan memanfaatkan output tegangan inverter sebelum dan setelah *switching*, dapat diperkirakan nilai tegangan kapasitor tiap *H-bridge*. Sehingga pada penelitian ini, hanya digunakan satu sensor untuk memperkirakan nilai tegangan kapasitor ( $V_{cest-i}$ ).



**Gambar 3.2** Konfigurasi estimasi tegangan kapasitor dc pada *cascade h-bridge multilevel converter* pada sistem *photovoltaic*

Gambar 3.2 merupakan konfigurasi estimasi tegangan kapasitor dc pada *cascade h-bridge multilevel converter* pada sistem *photovoltaic*. Sistem kontrol ini terdiri dari *capacitors voltage estimation module* (CVEM).

Mekanisme kerja blok kontrol ini dimulai dari *sensing* tegangan output inverter. Tegangan output inverter ini akan menjadi input dari *capacitors voltage estimation module* (CVEM). CVEM ini merupakan modul untuk memperkirakan nilai tegangan kapasitor dc-links. Output dari CVEM ini adalah tegangan estimasi ( $V_{cest-i}$ ) masing-masing kapasitor.

### 3.2 Parameter Cascade H-Bridge Multilevel Converter Pada Sistem Photovoltaic

Pada penelitian ini, jumlah cascade (*H-bridge*) yang digunakan adalah 2 (N=2). Sehingga berdasarkan persamaan (2.2), dapat diperoleh jumlah tingkat/*level* (n) yaitu:

$$n = 2N + 1$$

$$n = 5 \text{ level}$$

Selanjutnya, untuk menentukan parameter yang lainnya, mulai mula perlu diketahui output tegangan yang dibutuhkan, barulah bisa menentukan besar tegangan input, jumlah PV, beban, filter, dll.

Pada penelitian ini, output tegangan inverter yang dibutuhkan adalah 220 V. Karena nantinya akan menggunakan sistem dengan 2 *cascade (H-bridge)*, sehingga berdasarkan persamaan 2.1, tegangan output tiap *cascade (H-bridge)* sebesar:

$$V_{AC-i} = \frac{V_{o rms}}{N} \quad (3.1)$$

$$V_{AC-i} = \frac{220}{2} = 110 \text{ V}$$

dimana;

$V_{o rms}$  = tegangan output total rms dari cascade inverter

N = jumlah *cascade H-bridge*

Kemudian untuk tegangan input inverter minimal harus lebih besar dari tegangan puncak ( $V_p$ ).  $V_p$  dapat dicari melalui persamaan berikut:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_p \sin \omega t)^2 d(\omega t)} \quad (3.2)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_0^T V_p^2 \sin^2 \omega t d\omega t} \quad (3.3)$$

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

$$V_p = V_{rms} \sqrt{2} \quad (3.5)$$

Sehingga nilai tegangan input minimal sebesar:

$$V_{in} = 110\sqrt{2} = 155,56 V$$

Karena metode penyaklaran yang digunakan adalah *phase shift* (PS) PWM, maka persamaan dari tegangan rms keluaran inverter adalah sebagai berikut:

$$V_{AC-irms} = \frac{A_{ref}}{A_{tri}\sqrt{2}} V_{dc-i} \quad (3.6)$$

Dimana;

$A_{ref}$  = amplitudo sinyal referensi

$A_{tri}$  = amplitudo sinyal carrier

Pada penelitian ini indeks modulasi ( $m$ ) tiap H-bridge ditetapkan sebesar 1, dimana indeks modulasi merupakan perbandingan antara amplitudo sinyal referensi dan amplitudo sinyal segitiga. Sehingga;

$$m = \frac{A_{ref}}{A_{tri}} \quad (3.7)$$

Sehingga, berdasarkan persamaan (3.6), besarnya tegangan input inverter tiap *H-bridge* adalah:

$$V_{dc-i} = \frac{V_{AC-irms} \sqrt{2}}{m}$$

$$V_{dc-i} = \frac{110\sqrt{2}}{0,9} = 172,8 V$$

**Tabel 3.1** Parameter *sensorless cascade H-bridge multilevel converter* pada sistem *photovoltaic*

Parameter	Nilai	Satuan
Jumlah <i>H-bridge</i> (N)	2	
Jumlah level (n)	5	
$V_{out}$	220	V

Tabel 3.1 merupakan parameter dasar *sensorless cascade H-bridge multilevel converter* pada sistem *photovoltaic*.

### 3.3 Desain Panel Surya/*Photovoltaic* (PV)

Panel surya yang digunakan adalah merk *Viridian Solar PV 15* dengan daya 225 Wp (Wattpeak). *Datasheet* panel surya yang digunakan, ditunjukkan pada tabel 3.2 berikut:

**Tabel 3.2 Spesifikasi panel surya *viridian solar PV 15***

Spesifikasi	Nilai	Satuan
Daya maksimum	225	Watt
Jumlah sel surya	63 ( 7 x 9 )	
Tegangan daya maksimum ( $V_{mpp}$ )	30.8	V
Arus daya maksimum ( $I_{mpp}$ )	7.3	A
Tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ )	38.9	V
Arus hubung singkat ( $I_{sc}$ )	8	A
Tipe sel surya	Monocrystalline Silicon	
Koefisien suhu daya	-0.509	%/°C
Koefisien suhu $V_{oc}$	-0.337	%/°C
Koefisien suhu arus $I_{oc}$	0.043	%/°C
Tes Uji Standar		
Intensitas cahaya ( <i>irradiation</i> )	1000	W/m <sup>2</sup>
Suhu	25	°C

Sementara itu, untuk menghasilkan tegangan output inverter sebesar 110 V, tegangan input inverter sebesar 155,56 V, dengan spesifikasi tegangan output saat daya maksimal tiap PV adalah sebesar 30,8 V, tegangan output tiap PV saat open circuit 38,9 V, maka jumlah PV yang disusun seri tiap H-bridge adalah :

$$\text{Jumlah PV} = \frac{V_{dc-i}}{V_{1PV}} \quad (3.8)$$

$$\text{Jumlah PV (saat } P_{max}) = \frac{172,8}{30,8} = 5,6$$

$$\text{Jumlah PV (saat open circuit)} = \frac{172,8}{38,9} = 4,4$$

Maka dipilih 5 PV. Sehingga tegangan output satu string PV menjadi :

$$V_{PV1} = 5 \times V_{1PV} \quad (3.9)$$

$$V_{PV1}(\text{saat } P_{max}) = 5 \times 30,8 = 154 \text{ V}$$

$$V_{PV1}(\text{saat open circuit}) = 5 \times 38,9 = 194,5 \text{ V}$$

Penyusunan PV yang dihubungkan seri sebanyak 5 modul tiap *H-bridge*, akan mengubah spesifikasi PV menjadi PV *array* pada kondisi standar (STC) sebagai berikut:

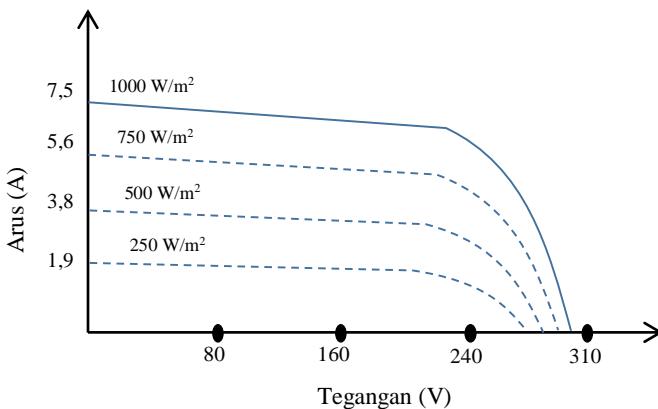
**Tabel 3.3** Spesifikasi PV *array* masing-masing *H-bridge*

Spesifikasi	Nilai	Satuan
Daya maksimum x 5	1125	Watt
Jumlah sel surya x 5	315	
Tegangan daya maksimum ( $V_{mpp}$ ) x 5	154	V
Tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ) x 5	194,5	V

### 3.4 Pengujian Panel Surya (*Photovoltaic*)

Pengujian panel surya dilakukan pada kondisi suhu tetap yaitu 25°C (STC) dan nilai intansitas cahaya (iradiasi) matahari berbeda-beda yaitu 1000 W/m<sup>2</sup>, 750 W/m<sup>2</sup>, 500 W/m<sup>2</sup>, dan 250 W/m<sup>2</sup>. Pengujian ini dilakukan dengan mengubah-ubah nilai beban, mulai dari minimum hingga maksimum. Sehingga dapat diperoleh grafik karakteristik arus terhadap tegangan (kurva V-I) dan grafik karakteristik daya terhadap tegangan (kurva V-P).

Gambar 3.4 menunjukkan hasil pengujian PV dengan iradian yang berbeda-beda dan mengubah-ubah nilai resistansi beban mulai dari minimum hingga maksimum.



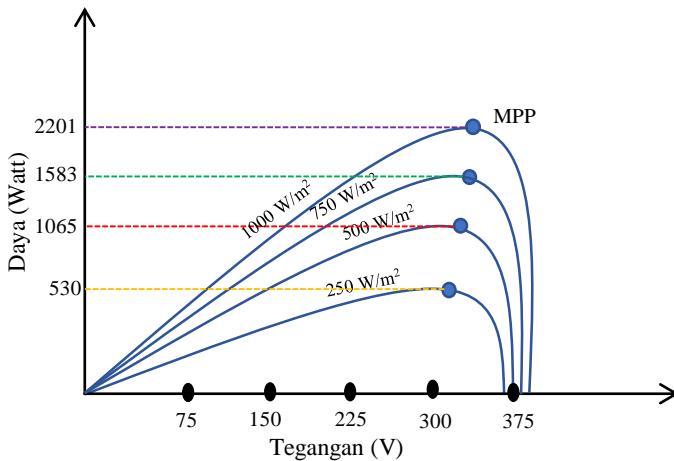
**Gambar 3.3** Kurva karakteristik arus terhadap tegangan (V-I) PV

Berikut data hasil pengujian daya referensi PV pada setiap nilai iradiasi yang berbeda:

**Tabel 3.4** Daya referensi untuk 2 PV array (10 PV) pada perubahan iradiasi

Iradiasi ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Tegangan optimum (V)	Daya maksimum (W)
1000	304	2201
750	303	1583
500	303	1065
250	288	530

Dari tabel tersebut, dapat dibuat kurva V-P sebagai hasil perubahan iradiasi. Berikut kurva V-P pada gambar 3.4



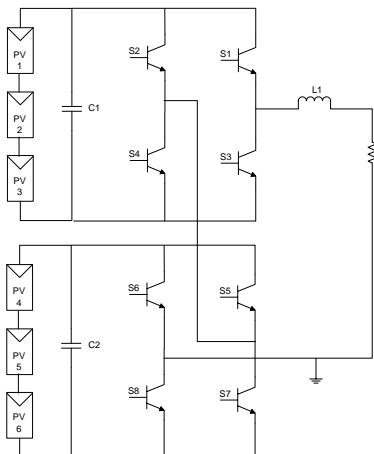
**Gambar 3.4** Kurva karakteristik daya terhadap tegangan (V-P) PV

Dari kurva karakteristik daya terhadap tegangan (V-P) PV tersebut hasil pengujian pada PV, dapat diketahui rentang nilai tegangan operasi saat daya maksimum.

### 3.5 Phase Shift (PS) PWM

Pada *cascade H-bridge multilevel inverter* 5 level, terdiri dari 2 sumber dc yang terpisah dan memiliki 5 level tegangan output yaitu  $+2V_{dc}$ ,  $+V_{dc}$ , 0,  $-V_{dc}$ , dan  $-2V_{dc}$ . Karena modulasi dilakukan pada masing-masing *H-bridge*, sehingga diperlukan 2 rangkaian PS-PWM.

Berikut rangkaian *cascade H-bridge multilevel inverter* inverter untuk 5 level dapat dilihat pada gambar 3.5 dan mekanisme penyaklaran untuk *cascade H-bridge multilevel inverter* 5 level pada tabel 3.5.



**Gambar 3.5** Rangkaian switching *cascade H-bridge multilevel* inverter untuk 2 *H-bridge* (5 level)

**Tabel 3.5** Tabel penyaklaran untuk 5 level

Saklar (Switch) ON	Level Tegangan
S1, S4, S5, S8	$2 V_{dc}$
S1, S4	$V_{dc}$
S3, D4, S7, D8	0
S2, S3	$-V_{dc}$
S2, S3, S6, S7	$-2 V_{dc}$

Selanjutnya, tabel 3.6 menampilkan keadaan lengkap penyaklaran pada *cascade H-bridge multilevel* inverter 5 level. Untuk urutan penamaan switch, sesuai dengan gambar 3.5.

**Tabel 3.6** Keadaan penyaklaran untuk 5 level *cascade H-bridge multilevel* inverter

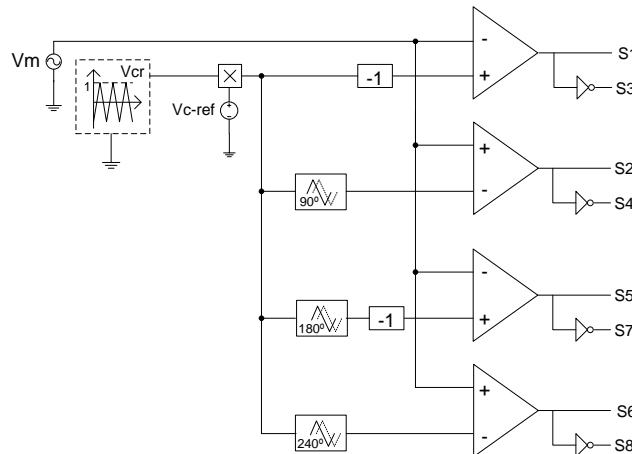
<i>H-bridge A</i>				<i>H-bridge B</i>				$V_{out}$
S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	
1	0	0	1	1	0	0	1	$+2V_{dc}$
1	0	0	1	0	0	1	1	$+V_{dc}$
1	0	0	1	1	1	0	0	$+V_{dc}$

**Tabel 3.6** [lanjutan]

0	0	1	1	1	0	0	1	+V <sub>dc</sub>
1	1	0	0	1	0	0	1	+V <sub>dc</sub>
0	0	1	1	0	0	1	1	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0
1	1	0	0	0	0	1	1	0
1	1	0	0	1	1	0	0	0
1	0	0	1	0	1	1	0	0
1	1	1	0	1	0	0	1	0
0	0	1	1	1	1	1	0	-V <sub>dc</sub>
1	1	0	0	0	1	1	1	-V <sub>dc</sub>
1	1	1	0	0	0	1	1	-V <sub>dc</sub>
0	1	1	0	1	1	0	0	-V <sub>dc</sub>
0	1	1	0	0	1	1	0	-2V <sub>dc</sub>

### 3.6 Kontrol PS-PWM

Gambar 3.6 merupakan kontrol PS-PWM yang digunakan pada penelitian ini. Terlihat bahwa, untuk membangkitkan sinyal *switching* diperlukan dua sinyal yang dibangkitkan. Yaitu sinyal referensi dan sinyal *carrier*.



**Gambar 3.6** Kontrol PS-PWM *cascade H-bridge multilevel inverter* untuk 2 *H-bridge* (5 level)

Pada kontrol PS-PWM, yang dibuat berbeda adalah perbedaan sudut fasa pada sinyal *carrier* (segitiga), sedangkan sinyal referensi dibuat sama. Berdasarkan persamaan (2.3), dapat diperoleh perbedaan sudut fasa ( $\phi$ ) yaitu:

$$\phi = \frac{180}{N}$$

$$\phi = \frac{180}{2} = 90^\circ$$

$V_{dc}$  sebagai pengali sinyal carrier ini nantinya berasal dari  $V_{c-ref}$  pada masing-masing kapasitor. Nilai  $V_{c-ref}$  dapat diperoleh setelah mengestimasi nilai tegangan kapasitor. Penjelasan mengenai estimasi nilai tagangan kapasitor dibahas lebih detail pada subbab *Capacitors Voltages Estimation Module* (CVEM).

Untuk mengatur indeks modulasi ( $m$ ), dapat dilakukan dengan mengubah-ubah amplitudo sinyal referensi. Perlu diperhatikan bahwa besarnya indeks modulasi adalah  $m \leq 1$ . Sehingga nilai  $m$  ditentukan terlebih dahulu:

$$m_a = 0,25$$

Berdasarkan persamaan (2.4), dapat diperoleh amplitudo sinyal referensi sebagai berikut:

$$m_a = \frac{A_m}{(n-1)A_c}$$

$$m_a = \frac{A_m}{(5-1)2}$$

$$A_m = m_a \times 8$$

$$A_m = 2$$

Selanjutnya mengatur indeks frekwensi modulasi yaitu dengan menggunakan persamaan (2.5). Dengan ditentukan nilai frekwensi sinyal

referensi sebesar 50 Hz dan frekwensi sinyal *carrier* sebesar 500 Hz, maka diperoleh hasil sebagai berikut:

$$m_f = \frac{f_c}{f_m}$$

$$m_f = \frac{500}{50} = 10$$

Dari perhitungan parameter kontrol PS-PWM tersebut, dapat diperoleh parameter-parameter kontrol dalam metode penyaklaran PS-PWM sebagai berikut:

**Tabel 3.7** Parameter PS-PWM

Parameter	Nilai
Perbedaan sudut fasa ( $\phi$ ) sinyal <i>carrier</i>	90°
Indeks modulasi ( $m_a$ )	0,25
Amplitudo sinyal modulasi ( $A_m$ )	2 V
Amplitudo sinyal <i>carrier</i>	2 V
Indeks frekwensi modulasi ( $m_f$ )	10
Frekwensi sinyal modulasi ( $f_m$ )	50 Hz
Frekwensi sinyal <i>carrier</i>	500 Hz

### 3.7 Capacitors Voltages Estimation Module (CVEM)

*Capacitors Voltages Estimation Module* (CVEM) pada sistem *cascade H-bridge multilevel converter*, merupakan sebuah alat yang digunakan untuk memperkirakan nilai tegangan kapasitor sebagai ganti dari eliminasi jumlah sensor. Nilai tegangan kapasitor perlu diketahui guna memaksimalkan daya output PV dalam berbagai keadaan lingkungan.

Pada sistem *cascade H-bridge multilevel converter*, terdapat sensor arus dan tegangan pada sisi dc yang digunakan sebagai input MPPT. Sedangkan pada penelitian ini, jumlah sensor akan dikurangi dengan mengeliminasi sensor-sensor dc tersebut dan menggantikannya dengan sebuah sensor tunggal di sisi AC.

Prinsip dasar dari estimasi tegangan kapasitor (CVEM) adalah nilai tegangan output fasa inverter sama dengan jumlah dari tegangan output inverter tiap-tiap cascade (*H-bridge*). Berdasarkan persamaan 2.1, maka persamaan tegangan output untuk 5 level CHB inverter adalah sebagai berikut:

$$V_{aj} = V_a1 + V_a2$$

Nilai dari tegangan output inverter tiap-tiap *H-bridge* dapat dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$V_{aj} = SW_j \cdot V_{cj} \quad (3.10)$$

Dimana;

$SW_j$  = fungsi switching

$V_{cj}$  = tegangan dc pada kapasitor pada *H-bridge* j

Dari persamaan tersebut, estimasi tegangan kapasitor dapat diperoleh setelah transisi/perubahan *switching*.

$$V_{cj} = |V' - V''| \quad (3.11)$$

Dimana;

$V'$  = tegangan output AC sebelum transisi *switching*

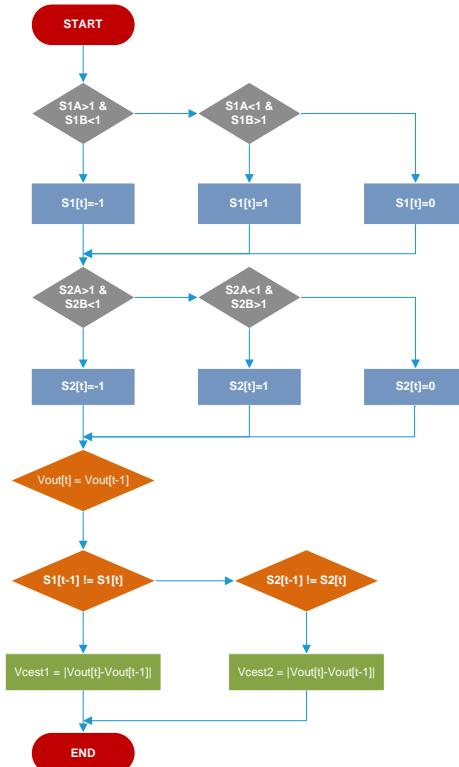
$V''$  = tegangan output AC setelah transisi *switching*

Untuk menentukan estimasi  $V_{cj}$ , perlu diketahui prinsip kerja dari fungsi switching tersebut. Karena dalam proses switching dengan urutan penomoran saklar seperti gambar 3.5 dan kontrol PWM seperti gambar 3.6, maka saklar 1-3 maupun 2-4 akan selalu berlawanan. Sehingga yang bisa dibandingkan adalah saklar 1 dan 2 mewakili *H-bridge* 1, saklar 5 dan 6 mewakili *H-bridge* 2. Berikut tabel 3.8 menampilkan keadaan *switching* ( $S_j$ ), fungsi switching ( $SW_j$ ), dan tegangan output *H-bridge* j ( $V_{aj}$ ) yang menjelaskan prinsip kerja fungsi switching tersebut.

**Tabel 3.8** Prinsip kerja fungsi switching

$S_{1j}$	$S_{2j}$	$SW_j$	$V_{aj}$
0	0	0	0
0	1	-1	-1
1	0	1	1
1	1	0	0

Dari tabel 3.8, dapat dibuat kode untuk program CVEM, dengan menggunakan C-block pada software PSIM [kode program terlampir]. Berikut flowchart untuk CVEM 5 level *cascade multilevel H-bridge inverter*:



**Gambar 3.7** Flowchart CVEM

Pada rangkaian CVEM tersebut, perlu dibuat sebuah rangkaian penyaklaran kedua sebagai ganti penyaklaran pada inverter. Tujuannya untuk melihat kerja dari switching inverter. Input dari CVEM ini adalah switching inverter dan tegangan output fasa cascade *H-bridge* multilevel inverter. Sedangkan output dari dari CVEM ini ada 2 yaitu estimasi tegangan kapasitor 1 dan 2. [rangkaian CVEM terlampir].

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB IV**

### **HASIL SIMULASI SISTEM DAN ANALISIS DATA**

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil simulasi dan analisa dari estimasi tegangan kapasitor dc pada sistem *cascade H-bridge multilevel converter* pada sistem *photovoltaic*. Secara umum, simulasi dari sistem ini bertujuan untuk mengetahui performa dari estimasi tegangan kapasitor dc pada sistem *cascade H-bridge multilevel converter* pada sistem *photovoltaic*. Pada penelitian ini, sistem akan disimulasikan melalui program PSIM.

Terdapat dua pengujian pada penelitian ini, yaitu:

1. Pengujian dengan nilai intensitas cahaya matahari (iradiasi) berubah yaitu  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $750 \text{ W/m}^2$ ,  $500 \text{ W/m}^2$ , dan  $250 \text{ W/m}^2$ .
2. Pengujian dengan beban berubah.

Seluruh pengujian diatas dilakukan dengan kondisi suhu tetap yaitu  $25^\circ\text{C}$ . Dan simulasi dilakukan pada nilai time step  $5\mu\text{s}$ .

Terdapat beberapa pembahasan terkait analisis data yang diperoleh dari hasil simulasi. Analisis tersebut meliputi:

1. Karakteristik *cascade H-bridge multilevel inverter* dengan menampilkan kerja (*Phase Shifted*) PS-PWM dan tegangan output inverter.
2. Kemampuan (*Capasitor Voltage Estimation Module*) CVEM dalam menentukan tegangan estimasi kapasitor dc-link dengan nilai iradiasi berubah
3. Kemampuan (*Capasitor Voltage Estimation Module*) CVEM dalam menentukan tegangan estimasi

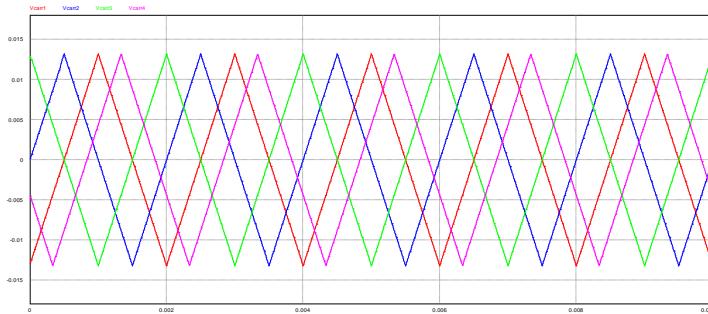
## 4.1 Karakteristik Kerja *Cascade H-Bridge Multilevel Converter*

Topologi *cascade H-bridge multilevel* konverter memiliki karakteristik tersendiri dalam pengoperasiannya. Pada penelitian ini, proses penyaklaran (*switching*) dilakukan dengan merekonstruksi SPWM menjadi PS-PWM, sehingga *cascade H-bridge* dapat membangkitkan sinyal output dengan level tegangan sebesar  $2N+1$  yaitu 5 level. Pada proses *switching*, indeks modulasi untuk topologi ini dapat diatur dengan mengubah-ubah besarnya amplitudo sinyal modulasi ( $A_m$ ) dengan amplitudo sinyal *carrier* ( $A_c$ ). Dengan mengatur besarnya indeks modulasi PS-PWM ini, maka besar tegangan output inverter juga dapat diatur. Besarnya tegangan output *cascade H-bridge multilevel* inverter, merupakan penjumlahan dari tegangan output inverter tiap-tiap *H-bridge*.

Pada penelitian ini, *cascade H-bridge multilevel* inverter dibuat *sensorless* pada sisi dc. Sehingga tidak diperlukan sensor arus dan tegangan pada sisi dc. Sensor ini digantikan dengan sensor tunggal di sisi output inverter yang kemudian digunakan untuk mengestimasi besarnya tegangan kapasitor dc-link.

### 4.1.1 Analisis *Phase-Shifted PWM*

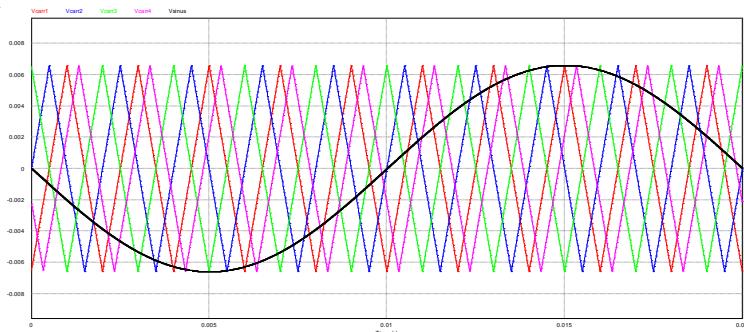
Pada penelitian ini, proses penyaklaran inverter dengan menggunakan metode PS-PWM, modulasi dilakukan pada masing-masing H-bridge dengan pergeseran fasa ( $\varphi$ ) sinyal *carrier* sebesar  $90^\circ$ . Sehingga diperoleh perbedaan fasa sinyal *carrier* pada saklar yang bekerja secara bergantian sebesar  $90^\circ$ . Berikut hasil simulasi dari pembangkitan sinyal *carrier* dengan perbedaan fasa  $\varphi=90^\circ$ , frekwensi *carrier*  $f_c=500\text{Hz}$  dijelaskan pada gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Sinyal *carrier* dengan beda fasa  $90^\circ$ ,  $f_c = 500\text{Hz}$ ,  $t = 0.01\text{s}$

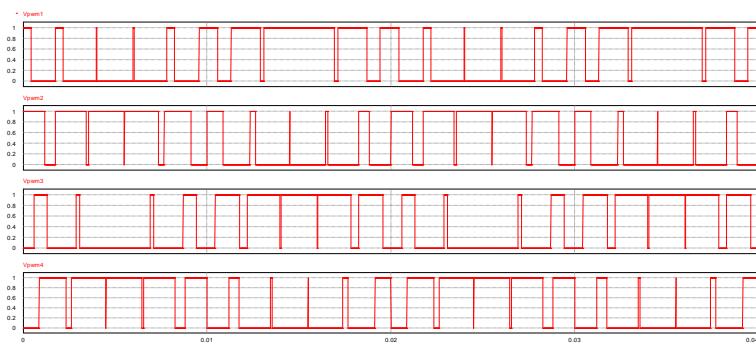
Pada gambar 4.1 tersebut, terdapat 4 buah sinyal *carrier* yang diperlukan dalam *switching* H-bridge inverter 5 level. Hal ini dikarenakan mekanisme kerja *switching* nantinya bersilangan, sehingga terdapat 4 pasang pola *switching*.

Kemudian sinyal carrier pada gambar 4.1 akan dibandingkan dengan sinyal sinusoida dengan besarnya indeks modulasi amplitudo sebesar  $m_a=0,25$ , frekwensi sinyal referensi  $f_m=50\text{Hz}$ , dan indeks modulasi frekwensi  $m_f=500/50$ . Sehingga menghasilkan output PWM seperti gambar 4.2.



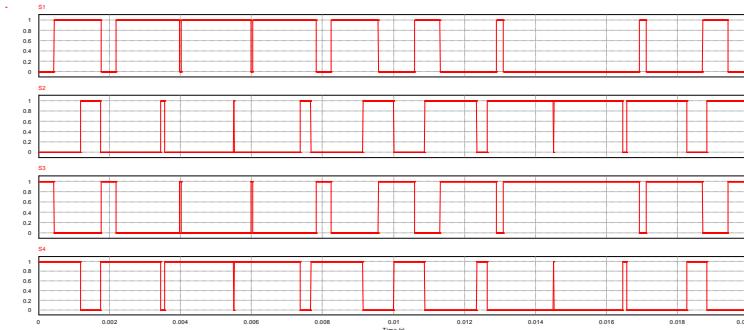
**Gambar 4.2** Sinyal modulasi dan *carrier* untuk 5 level

Dengan teknik modulasi seperti gambar 4.2 diatas, maka diperoleh output PS-PWM seperti gambar 4.3.



**Gambar 4.3** Output PS-PWM\*

Kemudian sinyal PWM tersebut akan diproses oleh *on-off controller* untuk membuat kerja *switch* yang bersilangan. Sehingga diperoleh urutan *switching* inverter seperti pada gambar 4.4.

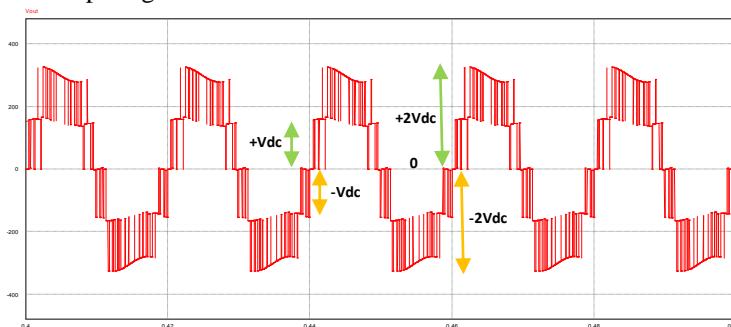


**Gambar 4.4** pola *switching* pada H-bridge 1

Dari pola penyaklaran pada gambar 4.4 diatas, terlihat bahwa saat S1 bernilai “1” maka S3 akan bernilai “0”. Begitu pula dengan S2 dan S4. Ketika S2 bernilai “1” maka S1 bernilai “0”.

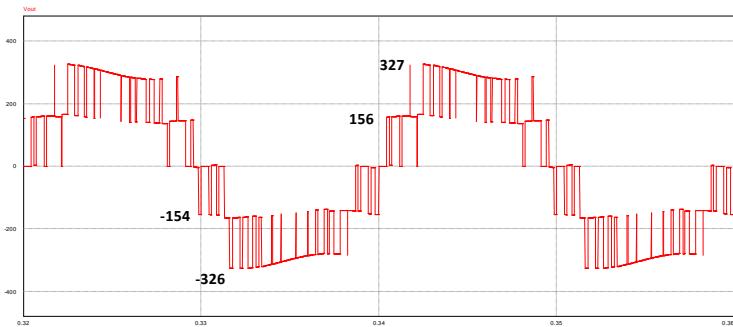
#### 4.1.2 Tegangan Output Inverter

Dari pola *switching* gambar 4.4, menghasilkan tegangan output inverter seperti gambar 4.5 berikut:



**Gambar 4.5** Tegangan output *cascade H-bridge* multilevel inverter

Pada tegangan output inverter seperti gambar 4.5 diatas, tampak hasil tegangan yang beringkat. Tingkat tegangan tersebut menunjukkan tegangan output dari masing-masing *H-bridge*. Karena pada penelitian ini menggunakan 2 *H-bridge* yang disusun seri, maka sesuai dengan persamaan (2.2), terdapat 5 level tegangan yaitu +2Vdc, +Vdc, 0, -Vdc, dan -2Vdc. Hasil simulasi menunjukkan nilai kelima level tegangan sebagai berikut:



**Gambar 4.6** Level tegangan output

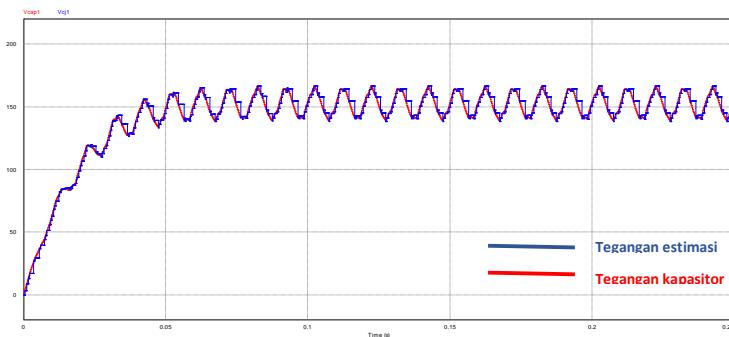
Dari hasil tersebut, jika dibandingkan dengan tegangan dc pada kapasitor dc-link yaitu mendekati nilai yang sama. Hal ini dikarenakan, pada output inverter terdapat ripple. Berikut tabel 4.1 menampilkan hasil perbandingan tegangan output inverter pada tiap tingkat dengan Vdc.

**Tabel 4.1** Perbandingan tegangan output inverter dengan tegangan dc

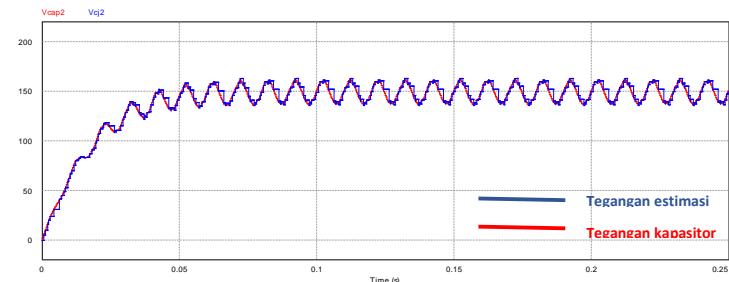
Tegangan	+2Vdc	+Vdc	0	-Vdc	-2Vdc
Vout	327	156	0	-154	-326
Vdc	308	154	0	-154	-308

## 4.2 Kemampuan CVEM Dalam Menentukan Tegangan Estimasi Kapasitor Dc-Link

Untuk topologi sensorless cascade H-bridge multilevel inverter, diperlukan CVEM untuk mengestimasi tegangan kapasitor dc-link. Estimasi dilakukan dengan mengukur selisih antara tegangan output inverter sebelum dan sesudah switching. Berikut gambar 4.7 dan gambar 4.8 menampilkan output tegangan estimasi kapasitor dc-link dan tegangan pengukuran kapasitor dc-link.



**Gambar 4.7** Perbandingan tegangan estimasi kapasitor 1 dan tegangan pengukuran kapasitor 1



**Gambar 4.8** Perbandingan tegangan estimasi kapasitor 2 dan tegangan pengukuran kapasitor 2

Berdasarkan hasil simulasi pada gambar 4.7 dan 4.8, terlihat bahwa CVEM mampu menentukan estimasi tegangan kapasitor dc link. Simulasi ini dilakukan pada nilai iradiasi  $1000\text{W/m}^2$ , suhu  $25^\circ\text{C}$ , total time 0-0.25 sekon, maka diperoleh perbandingan nilai tegangan seperti pada tabel 4.2 berikut.

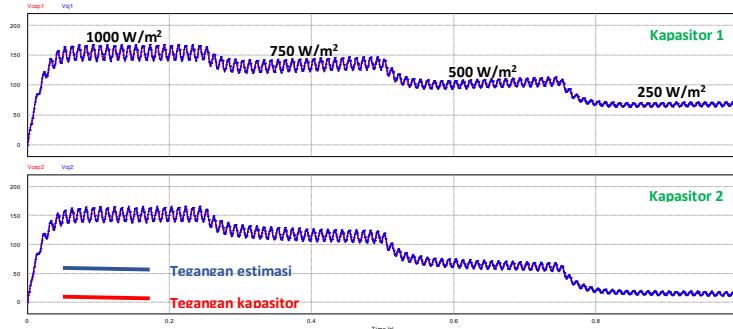
**Tabel 4.2** Nilai Tegangan Estimasi dan Tegangan Pengukuran Pada iradiasi  $1000\text{W/m}^2$

$1000\text{W/m}^2$	V pengukuran	V estimasi
Kapasitor 1	145	146
Kapasitor 2	142	143

Dari tabel 4.2, terlihat bahwa nilai tegangan estimasi hampir sama dengan tegangan pengukuran kapasitor dc-link. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa CVEM sudah dapat mengestimasi nilai tegangan kapasitor dc-link. Namun, perlu dilakukan pengujian jika keadaan iradiasi berubah dan beban berubah agar dapat melihat kemampuan CVEM dalam kondisi iradiasi dan beban berubah seperti yang dijelaskan pada subbab selanjutnya.

#### 4.2.1 Estimasi Kapasitor Dengan Nilai Iradiasi Berubah

Berikut ini gambar 4.9 menampilkan hasil simulasi dari estimasi tegangan kapasitor dc-link dan tegangan capasitor dc-link hasil pengukuran dengan mengubah-ubah ubah nilai iradiasi mulai  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $750 \text{ W/m}^2$ ,  $500 \text{ W/m}^2$ , dan  $250 \text{ W/m}^2$ .



**Gambar 4.9** Tegangan estimasi dan tegangan kapasitor dengan kondisi iradiasi terus menurun

Dari gambar 4.9 diatas, terlihat bahwa dengan berubahnya iradiasi matahari, tegangan estimasi kapasitor juga ikut berubah sesuai dengan tegangan kapasitor. Berikut ini tabel perbandingan nilai hasil estimasi kapasitor dc-link dengan pengukuran kapasitor dc-link dengan perubahan iradiasi.

**Tabel 4.3** Nilai Tegangan Estimasi dan Tegangan Pengukuran Pada Iradiasi yang Terus Menurun

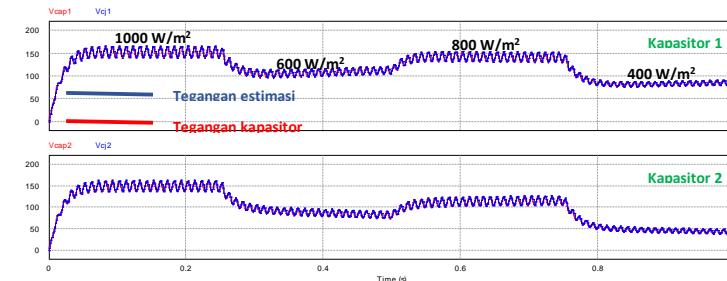
Iradiasi	Vcap 1	Vcj 1	Vcap 2	Vcj 2
$1000 \text{ W/m}^2$	153	154	150	151
$750 \text{ W/m}^2$	132	133	111	112

**Tabel 4.3** [lanjutan]

500 W/m <sup>2</sup>	102	103	61	62
250 W/m <sup>2</sup>	67	67	14	15

Terlihat bahwa, nilai tegangan estimasi kapasitor hampir sama dengan tegangan pengukuran kapasitor, sesuai dengan perubahan nilai iradiasi yang terus menurun. Meskipun nilai tegangan antara kapasitor 1 dan kapasitor 2 berbeda, nilai tegangan estimasi kapasitor juga ikut turun sesuai dengan nilai tegangan kapasitor. Namun, hal ini bukan masalah dalam fokuskan CVEM, sebab CVEM masih dapat menghasilkan nilai tegangan estimasi yang sama dengan tegangan pengukuran kapasitor dc-link.

Selanjutnya adalah melihat kemampuan CVEM dengan perubahan iradiasi yang tiba-tiba naik-turun, sebesar 1000 W/m<sup>2</sup>, 600 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup>, 400 W/m<sup>2</sup>. Berikut hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.10 dan nilainya dapat dilihat pada tabel 4.4.



**Gambar 4.10** Tegangan estimasi dan tegangan kapasitor dengan kondisi iradiasi naik-turun

**Tabel 4.4** Nilai Tegangan Estimasi dan Tegangan Pengukuran Pada Iradiasi yang naik-turun

Iradiasi	Vcap 1	Vcj 1	Vcap 2	Vcj 2
1000 W/m <sup>2</sup>	153	154	150	151
600 W/m <sup>2</sup>	109	110	86	87
800 W/m <sup>2</sup>	142	143	115	116
400 W/m <sup>2</sup>	84	85	46	47

Berdasarkan gambar 4.10 dan tabel 4.4, terlihat bahwa meskipun iradiasi berubah naik-turun, nilai tegangan estimasi kapasitor juga

mengikuti perubahan iradiasi. Dan nilai dari tegangan estimasi maupun tegangan pengukuran hampir sama. Sehingga dapat disimpulkan bahwa CVEM mampu mengestimasi tegangan kapasitor dengan kondisi iradiasi berubah-ubah.

#### 4.2.2 Estimasi Kapasitor Dengan Nilai Beban Berubah

Selanjutnya, pengujian CVEM dilakukan dengan mengubah-ubah nilai beban. Berikut hasil pengujian CVEM dengan mengubah-ubah nilai beban:

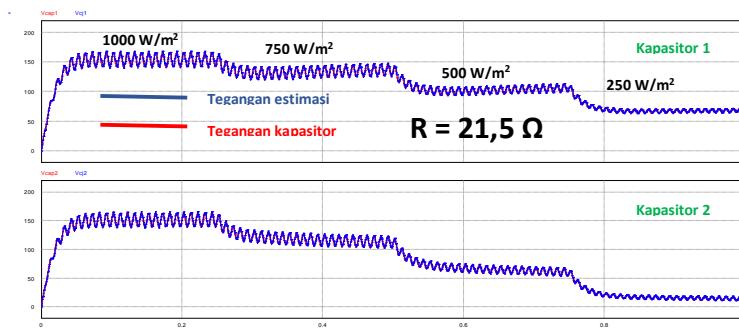
**Tabel 4.5** Nilai Tegangan Estimasi dan Tegangan Pengukuran Pada beban dan Iradiasi berbeda

Iradiasi	R ( $\Omega$ )	Vcap 1	Vcj 1	Error (%)	Vcap 2	Vcj 2	Error (%)
1000 W/m <sup>2</sup>	21,5	153	154	0,65	150	151	0,66
	30	167	168	0,60	166	167	0,60
	44,34	175	176	0,57	176	175	0,57
750 W/m <sup>2</sup>	21,5	132	133	0,75	111	112	0,89
	30	153	154	0,65	151	152	0,66
	44,34	167	168	0,60	167	168	0,60
500 W/m <sup>2</sup>	21,5	102	103	0,97	62	62	0
	30	115	116	0,86	102	102	0
	44,34	143	144	0,69	140	141	0,71
250 W/m <sup>2</sup>	21,5	67	67	0	15	15	0
	30	67	67	0	42	42	0
	44,34	78	78	0	70	70	0

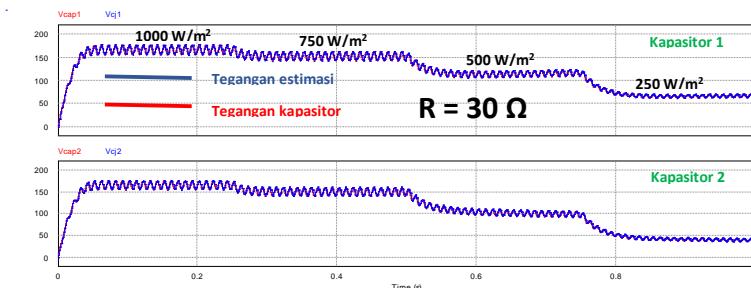
Berdasarkan data hasil simulasi dengan beban yang diubah-ubah, maka terlihat bahwa semakin tinggi nilai beban, maka tegangan kapasitor juga semakin naik. Hal ini sudah sesuai dengan teori bahwa tegangan sebanding dengan hambatan. Kemudian jika dianalisa error antara tegangan estimasi dan tegangan pengukuran, selisih antara keduanya sangat kecil, yaitu kurang dari 1%. Ini menunjukkan bahwa nilai estimasi sangat mendekati nilai pengukuran sebenarnya.

Selanjutnya pada gambar 4.11 hingga 4.13 menampilkan gambar dari keadaan tegangan estimasi kapasitor dan tegangan kapasitor, dengan beban dan iradiasi berubah. Dari data perubahan tegangan estimasi dan gambar keadaan tegangan estimasi ketika beban berubah dan iradiasi

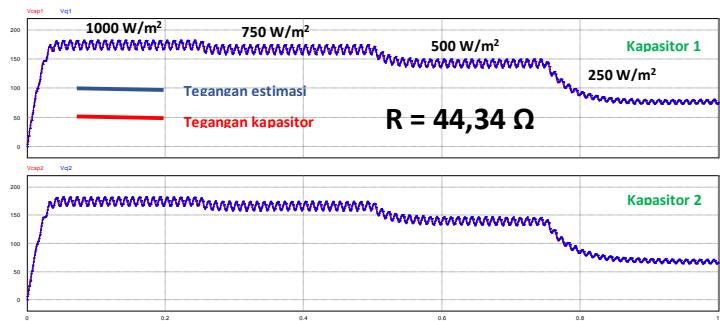
berubah yang sudah sesuai dengan teori, dapat disimpulkan bahwa CVEM mampu mengestimasi tegangan kapasitor meskipun nilai beban dan iradiasi berubah.



**Gambar 4.11** Tegangan estimasi dan tegangan kapasitor dengan  $R=21,5\Omega$  dan iradiasi berubah



**Gambar 4.12** Tegangan estimasi dan tegangan kapasitor dengan  $R=30\Omega$  dan iradiasi berubah



**Gambar 4.13** Tegangan estimasi dan tegangan kapasitor dengan  $R=44,34\Omega$  dan iradiasi berubah

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari pengujian sistem dan analisis data yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka dapat disimpulkan:

1. Penggunaan topologi *cascade H-bridge Multilevel Inverter* pada sistem PV tidak memerlukan sensor arus dan tegangan dc, sebagai gantinya diperlukan sebuah sensor tegangan di sisi AC yang digunakan sebagai estimasi tegangan kapasitor (CVEM).
2. Estimasi tegangan kapasitor sisi dc, dilakukan dengan prinsip selisih tegangan sebelum dan setelah *switching* (pergantian *switching*).
3. *Phase Shifted (PS)-PWM* merupakan teknik modulasi yang cocok digunakan untuk topologi *cascade H-Bridge Multilevel Inverter*, dimana modulasi dilakukan pada masing-masing *H-bridge* dengan pergeseran sudut fasa sinyal *carrier* sebesar ( $180^\circ/N$ ).

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk selanjutnya bisa dikembangkan dengan mengganti beban dengan *grid connection* dan mendesain sistem kontrol sehingga performa sistem menjadi lebih baik.
2. Untuk *grid connection* perlu adanya kontrol arus dan *phase lock loop* (PLL).
3. Untuk simulasi selanjutnya akan lebih baik apabila dilakukan pada software MATLAB, karena pada PSIM memiliki keterbatasan dalam sistem kontrol yang sederhana. Namun, PSIM memiliki keunggulan karena lebih praktis dan cepat.

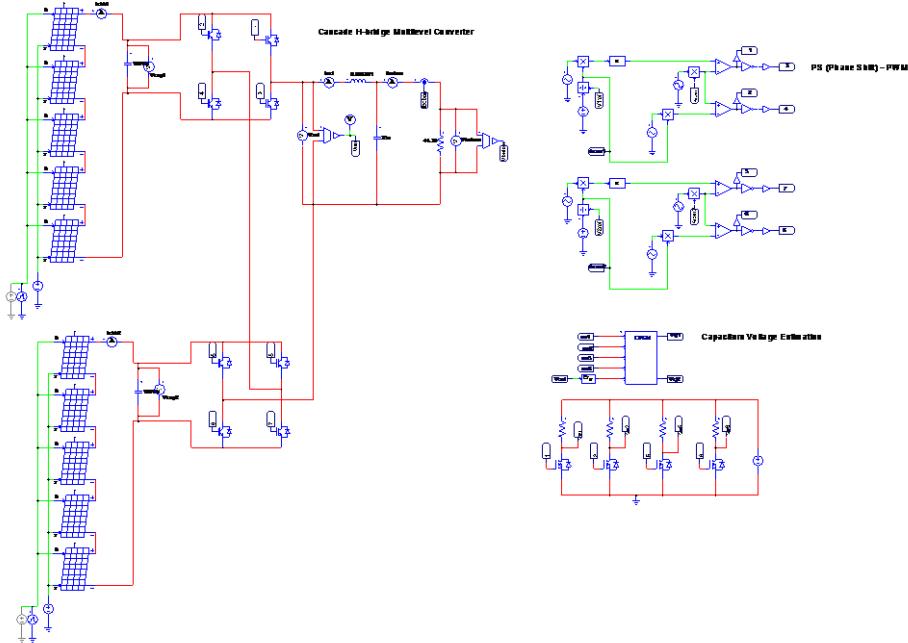
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sreeraj E. S., Kishore Chatterjee, Santanu Bandyopadhyay. “One-Cycle-Controlled Single Stage Single-Phase Voltage-Sensorless Grid-Connected PV System”. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol.60, No.3, March 2013
- [2] Farivar Ghiaz, Branislav Hredzak, Vassilios G. Agelidis. “A DC Side Sensorless Cascaded H-Bridge Multilevel Converter-Based Photovoltaic System”. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol.63, No.7, July 2016
- [3] J. de Leo'n Morales, M.F. Escalante and M.T. Mata-Jime'nez. “Observer for DC voltages in a cascaded H-bridge multilevel STATCOM”. IET Electr. Power Appl., 2007
- [4] Elena Villanueva, Pablo Correa, José Rodríguez, Mario Pacas. “Control of a Single-Phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter for Grid-Connected Photovoltaic Systems”. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol.56, No.11, November 2009
- [5] Samir Kouro and Bin Wu, Álvaro Moya, Elena Villanueva, Pablo Correa and José Rodríguez. “Control of a cascaded H-bridge multilevel converter for grid connection of photovoltaic systems”. IEEE, 2009
- [6] Muhammad H.Rashid, Ph.D. “Power Electronics Handbook Devices, Circuits, And Applications Third Edition”. USA, 2011.
- [7] Samir Kouro, Pablo Lezana, Mauricio Angulo. “Multicarrier PWM With DC-Link Ripple Feedforward Compensation for Multilevel Inverters”. IEEE Transactions On Power Electronics, Vol.23, No.1, January 2008
- [8] Marek Pástor, Marcel Bodor. “Cascade H-bridge Inverter for Photovoltaic System”. Scientific Conference of Young Researchers, 2010
- [9] Indrajit Sarkar and B. G. Fernandes. “Modified Hybrid Multicarrier PWM Technique for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter”. IEEE, 2014
- [10] T. Dear, J. Chang, W. Chow, D. Wai, J. Wang. “Filters”. Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley, 2012
- [11] Prof, Ir., M.Eng., Phd. Mochamad Ashari. “Desain Sistem Konverter AC”. ITS Press, 2015.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN



**Lampiran 1** Keseluruhan Sistem Estimasi Tegangan Kapasitor DC Pada *Cascade H-bridge Multilevel Converter* Pada Sistem *Photovoltaic*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

<sup>1</sup> Subject to a manufacturing tolerance of +/- 5%.

<sup>2</sup> Based on aperture area.

<sup>3</sup> Nominal Operating Cell Temperature

Electrical specification measured under standard test conditions: Irradiation 1 kW/m<sup>2</sup> with light spectrum AM 1.5 and a cell temperature of 25°C.

© Viridian Concepts Ltd. 2011. Not to be reproduced either wholly or in part without the express written permission of Viridian Concepts Ltd.  
Viridian has a policy of continuous improvement, and reserves the right to alter the specifications without notice. Viridian has made every effort to ensure the accuracy of information, but does not accept liability for any errors or omissions.





#### Electrical Specification

Model		PV15	PV20	PV30
Peak Power <sup>1</sup>	Wp	225	300	460
Module Efficiency <sup>2</sup>	%	15.0	14.3	15.3
Number of Cells		63	84	126
Maximum Power Voltage ( $V_{mppt}$ )	V	30.8	41.1	61.7
Maximum Power Current ( $I_{mppt}$ )	A	7.3	7.3	7.5
Open Circuit Voltage ( $V_{oc}$ )	V	38.9	51.9	77.9
Short Circuit Current ( $I_{sc}$ )	A	8.0	8.0	8.0
NOCT <sup>3</sup>	°C	44.6	44.6	44.6
Cell Type		Monocrystalline Silicon		
Maximum System Voltage	$V_{dc}$	1,000		
Power Temperature Coefficient	% / °C	-0.509		
Current Temperature Coefficient	% / °C	0.043		
Voltage Temperature Coefficient	% / °C	-0.337		
Safety Classification		Class II		

Lampiran 2 Data sheet PV

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

```

#define s1A          in[0]
#define s1B          in[1]
#define s2A          in[2]
#define s2B          in[3]
#define v_out        in[4]

#define vcest1      out[0]
#define vcest2      out[1]

static int s1;
static int s2;
static int s1_sebelum;
static int s2_sebelum;
static int v_out_sebelum;

if(s1A > 1 && s1B < 1) s1 = -1;
else if(s1A < 1 && s1B > 1) s1 = 1;
else s1 = 0;

if(s2A > 1 && s2B > 1) s2 = -1;
else if(s2A < 1 && s2B < 1) s2 = 1;
else s2 = 0;

if(v_out != v_out_sebelum)
{
    if(s1_sebelum != s1) vcest1 = abs(v_out - v_out_sebelum);
    else if(s2_sebelum != s2) vcest2 = abs(v_out - v_out_sebelum);
}

s1_sebelum = s1;
s2_sebelum = s2;
v_out_sebelum = v_out;

```

### **Lampiran 3 Kode Program CVEM**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **RIWAYAT HIDUP PENULIS**



**Maisita Eka Listianingrum**, akrab dipanggil dengan Ningrum, dilahirkan di Lumajang, pada tanggal 30 Mei 1995. Penulis adalah putri pertama dari Dwi Ujud Margo Utomo dan Karmini. Penulis memiliki 2 saudari kandung yang bernama Shabrina Fajriyanti dan Revanda Septriana Utami. Penulis mulai menempuh jenjang pendidikan di SDN 02 Talawi Hilir Sumatera Barat, SMPN 1 Sukodono Lumajang, SMAN 2 Lumajang. Dan kemudian penulis melanjutkan studi S1 Teknik Elektro ITS hingga sekarang. Selama masa perkuliahan penulis aktif di bidang organisasi kemahasiswaan yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATEKTR) ITS periode 2014/2015, anggota kemuslimahan Kalam periode 2014/2016, ketua Kemuslimahan Kalam periode 2015/2016.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*