

# **PLTS *Transformerless* Tegangan 20 kV menggunakan *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter***

**ANGGARA BRAJAMUSTHI, SRI UTAMI, DJAFAR SODIQ**

Jurusan Teknik Konversi Energi Politeknik Negeri Bandung  
Email: [anggarabrajamusthi@gmail.com](mailto:anggarabrajamusthi@gmail.com)

*Received* 17 Oktober 2017 | *Revised* 15 Desember 2017 | *Accepted* 28 Januari 2018

## **ABSTRAK**

*Aplikasi dari inverter multilevel pada sistem Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat menghilangkan kebutuhan terhadap transformator, sehingga dapat mengurangi biaya investasi, mengurangi kompleksitas instalasi dan menghilangkan rugi-rugi daya transformator. Pada penelitian ini, sebuah inverter dengan topologi Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter dirancang agar mampu mengubah tegangan rendah DC dari beberapa Photovoltaic (PV) array menjadi tegangan fasa-fasa 20 kV AC. Perancangan menghasilkan sebuah inverter 3 fasa 27-level dimana setiap level masing-masing memiliki PV array, DC-DC boost converter, H-bridge inverter, dan keluaran 3 fasa terhubung dengan filter LCL. Setiap komponen dari inverter dan sistem tersebut kemudian dimodelkan pada MATLAB Simulink untuk mensimulasikan kinerja dari setiap komponen dan sistem pada Standard Test Condition (STC) dari modul PV. Pada keadaan STC, daya 3 fasa maksimum yang dapat dihasilkan adalah 1,716 MW atau 68,54% dari daya DC maksimum sebesar 2,5 MWp. Sistem dapat menghasilkan tegangan fasa-fasa keluaran sebesar 20 kV dengan Total Harmonic Distortion (THD) di bawah 5%.*

**Kata kunci :** Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS), photovoltaic, Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter

## **ABSTRACT**

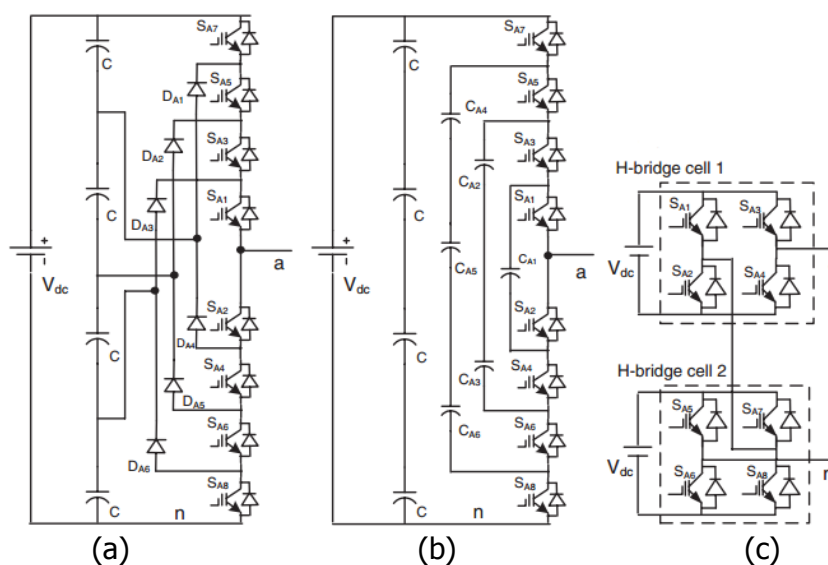
*The application of Multilevel Inverter in a Photovoltaic Solar Power Plant system could eliminate the needs of step-up transformer, which will reduce the system investment cost, simplify the system installation and also eliminate power losses of the transformer. In this paper, an inverter design was proposed with Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter topology that is capable of converting low voltage DC power from several PV arrays into 20 kV AC power. The design resulted a 3 phase 27-level inverter where each level in the inverter has its own photovoltaic array, DC-DC boost converter, H-bridge inverter, and the 3 phase output is connected to LCL filter. Each component of the Inverter and the system were then modelled in MATLAB Simulink to simulate the operation of the components and the system at PV Standard Test Condition (STC). At STC, the maximum 3 phase output power of the system is 1,716 MW or 68,54% of maximum DC power of 2,5 MWp. The system can reach 20 kV of output voltage with less than 5% THD.*

**Keywords:** Photovoltaic Power Plant System, PV, Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter

## 1. PENDAHULUAN

Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) di dunia sedang mengalami pertumbuhan yang pesat, termasuk di Indonesia. Kelebihan dari PLTS adalah instalasi yang relatif mudah dan tidak membutuhkan bahan bakar untuk menghasilkan listrik. Namun di Indonesia saat ini penggunaan PLTS terbatas pada skala kecil untuk keperluan rumah tangga hingga skala beberapa megawatt untuk disuplai ke jaringan. Penyebabnya adalah listrik yang dihasilkan PLTS tidak stabil sepanjang hari (jika tidak menggunakan baterai) serta membutuhkan biaya investasi awal yang relatif tinggi. Penggunaan PLTS yang dihubungkan dengan sistem jaringan dapat menghemat penggunaan bahan bakar pada pembangkit listrik lain karena sebagian beban listrik disuplai oleh PLTS. Untuk menyuplai jaringan, PLTS harus memiliki tegangan keluaran sama dengan tegangan menengah dari jaringan (hingga 20 kV untuk Indonesia). Rujukan **(Advanced-Energy, 2014)** menjelaskan bahwa pada PLTS konvensional, tegangan DC dari *PV array* dibatasi pada 600 V atau 1000 V untuk alasan keselamatan dan tegangan efektif AC keluaran inverter akan lebih rendah dari tegangan DC masukan. Oleh karena itu, PLTS membutuhkan transformator penaik tegangan. Transformator tersebut pada umumnya memiliki dimensi yang besar, berat, mahal, serta memiliki rugi-rugi daya ketika berbeban dan bahkan ketika tanpa beban.

Rabiul Islam, dkk dalam bukunya **(Islam, Guo, & Zhu, 2014)** menjelaskan bahwa dengan perkembangan teknologi semikonduktor, konversi tegangan rendah DC menjadi AC dengan tegangan yang lebih tinggi dapat dilakukan dengan menggunakan *multilevel inverter*. *Multilevel inverter* memiliki beberapa jenis topologi yang dapat diaplikasikan sesuai dengan kebutuhan. Topologi-topologi tersebut diantaranya adalah *Neutral Point Clamped (NPC)*, *Flying Capacitor (FC)*, dan *Cascaded H-bridge Multilevel Inverter (CHMI)*. Topologi-topologi tersebut memiliki kekurangan dan kelebihan tersendiri. Jika dilihat konstruksinya, topologi NPC membutuhkan komponen tambahan seperti kapasitor dan dioda dengan jumlah yang banyak dan akan semakin banyak ketika level inverter bertambah. Untuk topologi FC, jumlah kapasitor akan meningkat secara kuadratis seiring dengan meningkatnya jumlah level. Pada penelitian ini, topologi yang akan digunakan adalah topologi CHMI karena tidak membutuhkan komponen tambahan seperti dioda atau kapasitor. Gambar 1 menunjukkan beberapa rangkaian topologi *multilevel inverter* dengan jumlah level yang sama.

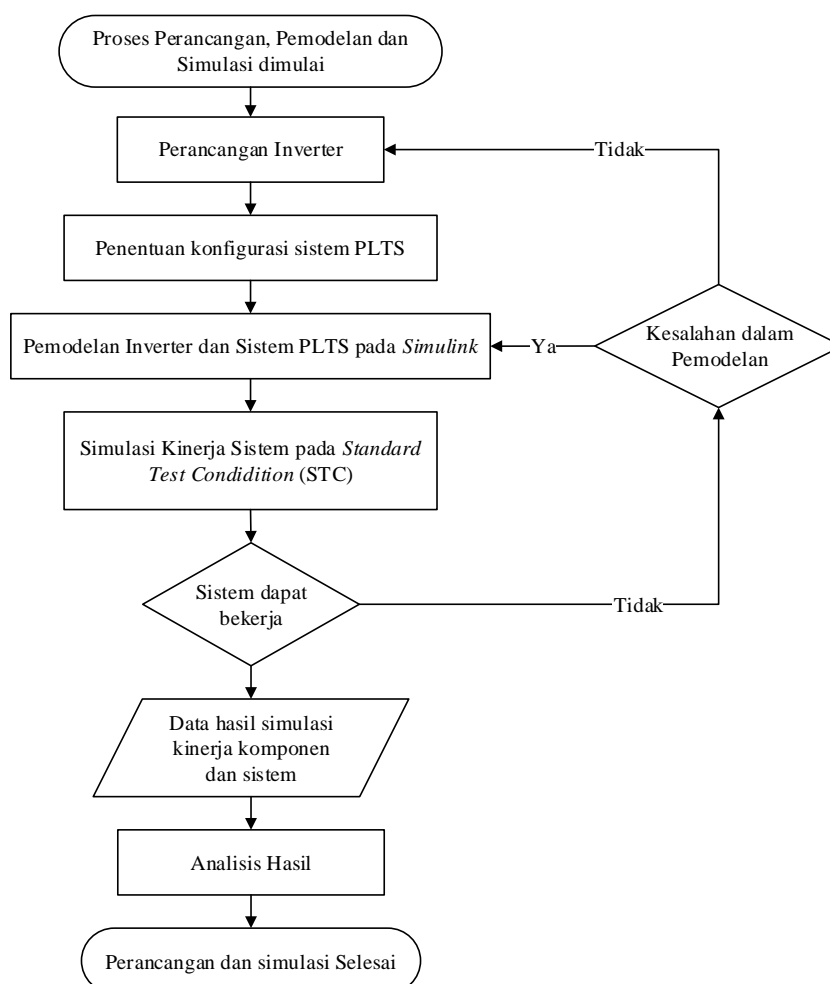


**Gambar 1. Topologi *Neutral Point Clamped* (a), *Flying Capacitor* (b), dan *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter* (c). (Islam, Guo, & Zhu, 2014)**

Sampai saat ini telah ada beberapa penelitian mengenai teknologi konverter berbasis semikonduktor untuk menghasilkan tegangan menengah (6-33 kV) dengan menggunakan inverter multilevel, salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh Md. Rabiul Islam dkk yang dibukukan dalam **(Islam, Guo, & Zhu, 2014)**. Pada penelitian tersebut dilakukan pemodelan dari *modular multilevel inverter* dengan tegangan keluaran 11 dan 33 kV serta pembuatan model *hardware* untuk tegangan keluaran 1 kV. Namun sistem pada penelitian tersebut menggunakan sumber tegangan DC ideal, bukan menggunakan modul PV. Pada penelitian ini, model sistem dibuat dengan menggunakan sumber DC yang berasal dari pemodelan modul PV.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan rancangan *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter* tegangan 20 kV untuk sistem PLTS tanpa transformator, membuat model sistem PLTS dengan *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter* pada *MATLAB Simulink*, dan melakukan simulasi dan analisis kinerja sistem pada kondisi *Standard Test Condition* (STC).

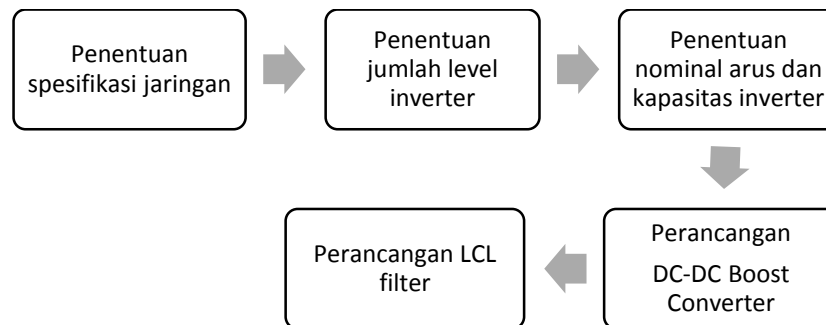
## 2. METODOLOGI PENELITIAN



**Gambar 2. Tahapan Perancangan, Pemodelan dan Simulasi dari *Inverter* dan Sistem**

Penelitian ini dilakukan dengan metoda pemodelan dan simulasi. Penelitian diawali dengan melakukan identifikasi masalah dan studi literatur lalu dilanjutkan dengan perancangan, pemodelan dan simulasi dari *inverter* dan sistem, tahapan tersebut ditunjukkan pada Gambar 2. *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter* yang dirancang terdiri dari beberapa komponen di

dalamnya, yaitu *DC-DC boost converter*, *H-Bridge Inverter*, dan *LCL filter*. Kemudian, setiap komponen dimodelkan pada MATLAB *Simulink* dan dilakukan simulasi sistem pada kondisi *Standard Test Condition* (STC) dimana nilai level iradiasi 1000 W/m<sup>2</sup> dan temperatur PV 25° C. Dari simulasi tersebut akan didapatkan data hasil pengukuran yang terdiri dari tegangan, arus, dan daya keluaran serta nilai THD tegangan dan arus. Perancangan sistem *inverter* dilakukan dengan tahapan pada Gambar 3.



**Gambar 3. Tahapan Perancangan *Inverter***

### 2.1 Penentuan Spesifikasi Jaringan

Spesifikasi jaringan yang dipilih adalah Jaringan Tegangan Menengah (JTM) tegangan fasa-fasa 20 kV dengan frekuensi 50 ±0,5 Hz. Spesifikasi jaringan tersebut adalah parameter yang dibutuhkan untuk perancangan *inverter* dan sistem. Namun perlu diperhatikan bahwa pada penelitian ini tidak dilakukan simulasi operasi sistem PLTS yang dihubungkan dengan jaringan (kerja paralel sinkron). Berdasarkan IEEE 929 dan 519, PLTS harus dapat beroperasi pada rentang tegangan 88% hingga 110% atau 17,6 kV – 22 kV dengan THD yang tidak melebihi 5%.

### 2.2 Penentuan Jumlah Level *Inverter*

Dengan merujuk pada (Islam, Guo, & Zhu, 2014), Penentuan nominal tegangan dan jumlah level *inverter* dilakukan dengan menggunakan Persamaan (1). Jumlah level ( $m$ ) ditentukan dengan mempertimbangkan faktor utilisasi dari *insulated gate bipolar transistor* (IGBT) yang digunakan dengan Persamaan (2), sehingga dilakukan beberapa *trial* untuk mendapatkan jumlah level dan tegangan nominal DC.  $V_{com@100FIT}$  merupakan tegangan komutasi yang diperbolehkan pada IGBT sesuai dengan *datasheet*. Sebagai contoh, IGBT 6,5 kV; 3,3 kV dan 12,5 kV memiliki tegangan komutasi masing-masing 3,6 kV; 1,8 kV dan 1,2 kV.

$$V_{dc(min)} = 1.04 \times \sqrt{2} \frac{V_{l-l}(rms)}{(m - 1)} \quad (1)$$

$$DVUF = \frac{V_{dc(min)}}{V_{com@100FIT}} \quad (2)$$

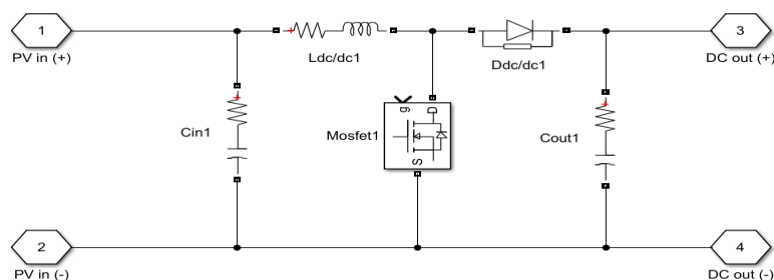
Dimana:

- $V_{dc(min)}$  = Tegangan DC minimum pada sisi masukan *inverter H-bridge* (V)
- $V_{l-l}$  = Tegangan *line* (fasa-fasa) (V)
- $m$  = Jumlah level dari *inverter*
- DVUF = *Device voltage utilization factor*
- $V_{com@100FIT}$  = Tegangan komutasi IGBT untuk kehandalan pada 100 *failures in time* (FIT) (V)

### 2.3 Penentuan Nominal Arus dan Kapasitas *Inverter*

*Inverter* PLTS skala besar pada umumnya memiliki kapasitas daya 0,8 MVA, 1 MVA, 2,5 MVA dan 5 MVA. Satu sistem PLTS dapat terdiri dari beberapa *inverter* yang dihubungkan secara paralel. Penentuan nominal tersebut akan mempengaruhi arus yang akan mengalir pada *inverter* (khususnya pada IGBT) sehingga pemilihan IGBT harus dapat mengakomodasi arus yang mengalir tersebut. Sama seperti penentuan tegangan *inverter*, faktor utilisasi arus dari IGBT harus diperhitungkan. Hasil pemilihan nominal arus dan kapasitas *inverter* ditunjukkan pada Tabel 1.

### 2.4 Perancangan DC-DC Boost Converter



**Gambar 4. Rangkaian Listrik DC-DC *Boost Converter***

DC-DC *boost converter* berfungsi untuk mengkondisikan tegangan keluaran dari modul PV *array*. Texas Instruments dalam (Hauke, 2014) menyebutkan bahwa untuk merancang DC-DC *boost converter* dibutuhkan parameter-parameter: rentang tegangan masukan maksimum dan minimum dari PV *String* ( $V_{dcmax, str}$  dan  $V_{dcmin, str}$ ), tegangan keluaran DC-DC konverter ( $V_{dc(nom)}$ ), dan Arus keluaran nominal ( $I_{dc(nom)}$ ). Tegangan dari suatu PV *array* dipengaruhi oleh temperatur modul PV. Tegangan maksimum akan didapatkan ketika temperatur PV minimum dan tegangan minimum akan terjadi ketika temperatur PV maksimum. Pada penelitian ini, perhitungan tegangan dilakukan dengan menggunakan data temperatur umum untuk Indonesia dengan temperatur lingkungan : 14,4 °C minimum dan 40,3 °C maksimum. Data tersebut didapatkan dari Badan Pusat Statistik (BPS) yang dikeluarkan oleh BMKG (BPS, 2017). Temperatur PV dihitung dengan menggunakan Persamaan (3). Persamaan tersebut digunakan untuk memperkirakan temperatur panel surya berdasarkan *Nominal Operation Cell Temperature* (NOCT) yang terdapat pada artikel ilmiah oleh Garcia & Balenzategui pada tahun 2004 (Garcia & Balenzategui, 2004). NOCT merupakan temperatur kondisi operasi normal yang terdapat pada *datasheet* modul PV yang dipilih.

$$T_{pv} = T_{amb} + (NOCT - 20) \frac{\phi}{800} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3)$$

Dimana:

- $T_{pv}$  = Temperatur PV (K atau °C)
- $T_{amb}$  = Temperatur lingkungan sekitar PV (°C)
- NOCT = *Nominal Operation Cell Temperature* (°C)
- $\phi$  = Intensitas radiasi matahari ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

Temperatur minimum PV ( $T_{pv, min}$ ) untuk penelitian ini diambil sama dengan temperatur lingkungan, yaitu sebesar 14,4 °C. Sementara temperatur maksimum PV ( $T_{pv, max}$ ) dihitung dengan Persamaan (3) dan dihasilkan temperatur PV sebesar 72,8 °C.

Perhitungan tegangan maksimum dan minimum mengacu pada panduan perencanaan generator PV yang dikeluarkan oleh SMA AG, Germany pada tahun 2013 (SMA, 2013). Tegangan dc maksimum dan minimum ditentukan dengan Persamaan (4) s.d (8). Sementara penentuan arus dilakukan menggunakan Persamaan (9) hingga (18). Perlu diperhatikan bahwa

terdapat beberapa parameter koefisien temperatur seperti  $\beta_{Voc}$  dan  $\alpha_{Isc}$  yang didapatkan dari *datasheet* modul PV yang digunakan. Dalam perhitungan parameter-parameter tersebut, juga ditentukan konfigurasi dari modul PV, seperti jumlah modul yang terhubung seri (*string*) dan paralel (*array*) serta jumlah modul PV yang diperlukan. Data-data tersebut dapat membantu dalam perancangan sistem PLTS secara keseluruhan.

$$V_{dcmax,mod} = V_{oc,mod} \times \left( 1 + \frac{\beta_{Voc} \times (T_{pv,min} - T_{ref})}{100\%} \right) \quad (4)$$

$$V_{dcmin,mod} = V_{mpp,mod} \times \left( 1 + \frac{\beta_{Voc} \times (T_{pv,max} - T_{ref})}{100\%} \right) \quad (5)$$

$$n_{pv,str} = \frac{V_{PV,array}(maks)}{V_{dcmax,mod}} \quad (6)$$

$$V_{dcmax,str} = n_{pv,str} \times V_{dcmax,mod} \quad (7)$$

$$V_{dcmin,str} = n_{pv,str} \times V_{dcmin,mod} \quad (8)$$

$$I_{dcmax,str} = I_{sc,mod} \times \left( 1 + \frac{\alpha_{Isc} \times (T_{pv,max} - T_{ref})}{100\%} \right) \quad (9)$$

$$P_{DC} = \frac{P_n(AC)}{\eta} \quad (10)$$

$$n_{pv} = \frac{P_{DC}}{P_{mpp}(modul)} \quad (11)$$

$$s \text{ (setiap fasa)} = \frac{m - 1}{2} \quad (12)$$

$$s \text{ (3 fasa)} = 3 \times s \text{ (setiap fasa)} \quad (13)$$

$$P_{DC,level} = \frac{P_{DC}}{s \text{ (3 fasa)}} \quad (14)$$

$$n_{pv,level} = \frac{P_{DC,level}}{P_{mpp}(modul)} \quad (15)$$

$$n_{str} = \text{floor} \left( \frac{n_{pv,level}}{n_{pv,str}} \right) \quad (16)$$

$$I_{DCmax,arr}(MPP) = n_{str} \times I_{mpp} \quad (17)$$

$$I_{DCmax,arr}(SC) = n_{str} \times I_{sc} \quad (18)$$

Dimana:

$V_{dcmax,mod}$	= Tegangan DC maksimum dari modul (V)
$V_{oc,mod}$	= Tegangan hubung terbuka modul PV (V)
$\beta_{voc}$	= Koefisien temperatur dari tegangan hubung terbuka dari modul %/°C
$T_{pv,min}$	= Temperatur terendah modul PV (°C)
$T_{ref}$	= Temperatur referensi modul PV (°C)
$V_{dcmin,mod}$	= Tegangan DC minimum dari modul (V)
$V_{mpp,mod}$	= Tegangan modul pada MPP (V)
$T_{pv,max}$	= Temperatur tertinggi modul PV (°C)
$n_{pv,str}$	= Jumlah modul PV terhubung seri dalam satu <i>string</i>
$V_{PVarray,maks}$	= Tegangan PV <i>array</i> maksimum untuk masukan <i>inverter</i> (V)
$V_{dcmax,mod}$	= Tegangan DC maksimum dari modul (V)
$V_{dcmax,str}$	= Tegangan DC maksimum dari <i>string</i> (V)
$V_{dcmin,str}$	= Tegangan DC minimum dari <i>string</i> (V)
$I_{dcmax,str}$	= Arus DC maksimum dari string (A)

$I_{sc,mod}$	= Arus hubung singkat modul PV (A)
$\alpha I_{sc}$	= Koefisien temperatur dari arus hubung singkat modul (%/°C)
$P_{DC}$	= Daya DC total (W)
$P_n(AC)$	= Daya nominal AC (W)
$\eta$	= Efisiensi sistem
$n_{pv}$	= Jumlah modul PV total pada satu sistem PLTS
$P_{mpp}(modul)$	= Daya keluaran modul PV pada titik maksimum (W)
$s$	= Jumlah sumber DC yang dibutuhkan
$P_{DC,level}$	= Daya DC setiap level (Wp)
$n_{PV,level}$	= Jumlah modul PV setiap level <i>inverter</i>
$P_{DC,level}$	= Daya DC setiap level (Wp)
$n_{str}$	= Jumlah <i>string</i> setiap <i>array</i>
$I_{DCmax,arr}(MPP)$	= Arus maksimum array pada keadaan MPP (A)
$I_{DCmax,arr}(SC)$	= Arus maksimum array pada keadaan <i>short circuit</i> (A)
$I_{mpp}$	= Arus MPP dari modul (A)
$I_{sc}$	= Arus hubung singkat dari modul PV (A)

Setelah parameter-parameter awal didapatkan, langkah berikutnya adalah perhitungan-perhitungan untuk menentukan spesifikasi dari komponen-komponen konverter diantaranya kapasitor, induktor dan dioda. Pada umumnya *ripple* pada arus dibatasi antara 20-40%, agar tidak terlalu besar maka dipilih 20%. ESR merupakan resistansi seri di dalam kapasitor dengan nilai yang terdapat pada *datasheet* kapasitor yang dipilih. Perhitungan untuk induktor dan kapasitor dilakukan dengan menggunakan Persamaan (19) s.d (23) sesuai dengan perhitungan dasar *boost converter* dari Texas Instruments (**Hauke, 2014**).

$$D_{dc/dc} = 1 - \frac{V_{DCmin,str}}{V_{dc(nom)}} \quad (19)$$

$$\Delta I_{L,dc/dc} = 0,2 \times I_{dc(max)} \times \frac{V_{dc(nom)}}{V_{dcmin,str}} \quad (20)$$

$$L_{dc/dc} = \frac{V_{dcmin,str} \times (V_{dc(nom)} - V_{dcmin,str})}{\Delta I_{L,dc/dc} \times f_{sw,dc/dc} \times V_{dc(nom)}} \quad (21)$$

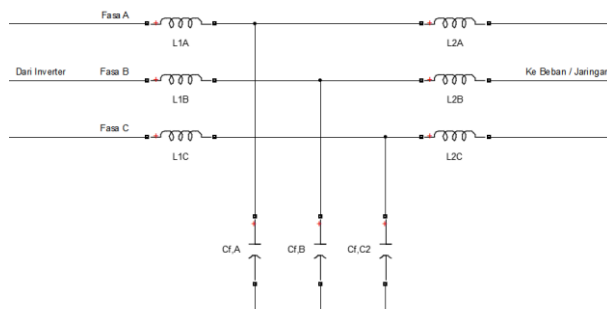
$$\Delta V_{dc/dc} = ESR \times \left( \frac{I_{dc(max)}}{1 - D_{dc/dc}} + \frac{\Delta I_{L,dc/dc}}{2} \right) \quad (22)$$

$$C_{dc/dc} = \frac{I_{dc(max)} \times D_{dc/dc}}{f_{sw,dc/dc} \times \Delta V_{dc/dc}} \quad (23)$$

Dimana:

$D_{dc/dc}$	= <i>Duty cycle</i> konverter DC-DC
$\Delta I_{L,dc/dc}$	= <i>Ripple</i> arus induktor konverter DC-DC (A)
$I_{dc(max)}$	= Arus DC maksimum yang masuk ke <i>Inverter</i> (A)
$V_{dc(nom)}$	= Tegangan DC nominal masukan ke <i>Inverter</i> (V)
$L_{dc/dc}$	= Induktansi induktor konverter DC-DC (H)
$f_{sw,dc/dc}$	= Frekuensi <i>switching</i> dari MOSFET pada konverter DC-DC (Hz), pada penelitian ini diambil 1 MHz.
$ESR$	= <i>Equivalent series resistance</i> dari kapasitor ( $\Omega$ )
$C_{dc/dc}$	= Kapasitansi kapasitor konverter DC-DC (F)

## 2.5 Perancangan Filter LCL



**Gambar 5. Rangkaian Filter LCL**

Filter LCL digunakan untuk memperbaiki kualitas THD tegangan dan arus keluaran *inverter*. LCL filter terdiri dari induktor sisi *inverter*, kapasitor dan induktor sisi jaringan/beban. Pada penelitian ini, perancangan LCL filter merujuk pada penelitian-penelitian yang dilakukan oleh Pandey, dkk pada tahun 2017 (**Pandey, Tripathi, & Hanamoto, 2017**) serta Reznik, dkk pada tahun 2014 (**Reznik, Simoes, Al-Durra, & Muyeen, 2014**) dengan menggunakan Persamaan (24) s.d (29). Rangkaian filter LCL ditunjukkan pada Gambar 5.

$$\Delta I_{l,max} = 0,1 \times I_{l,max} \quad (24)$$

$$Z_b = \frac{V_{l-l}^2}{P_n} \quad (25)$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_g \times Z_b} = \frac{1}{2 \pi \times f_g \times Z_b} \quad (26)$$

$$C_f = 0,15 \times C_b \quad (27)$$

$$L_2 = \frac{V_{l-n}}{2 \sqrt{6} f_s \Delta I_{l,max}} \quad (28)$$

$$L_2 = r L_1 \quad (29)$$

Penentuan nilai dari induktor dan kapasitor harus dapat memenuhi persyaratan batas frekuensi resonansi. Pada penelitian ini frekuensi jaringan dan frekuensi *switching* IGBT masing-masing adalah 50 Hz dan 1500 Hz.

$$10 f_g \ll f_{res} \ll 0,5 f_{sw}$$

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}} = 2 \pi f_{res} \quad (30)$$

Dimana:

- $\Delta I_{l,max}$  = *Ripple* pada arus maksimum keluaran *inverter* (A)
- $Z_b$  = Impedansi basis (*base impedance*) filter LCL ( $\Omega$ )
- $C_b$  = Kapasitansi basis (*base capacitance*) filter LCL (F)
- $C_f$  = Kapasitansi kapasitor filter LCL (F)
- $L_1$  = Induktansi induktor sisi *inverter* untuk filter LCL (H)
- $L_2$  = Induktansi induktor sisi jaringan untuk filter LCL (H)
- $r$  = Rasio antara induktansi induktor sisi jaringan dengan induktansi induktor sisi *inverter*
- $f_g$  = Frekuensi jaringan / grid (Hz)
- $f_{res}$  = Frekuensi resonansi filter LCL (Hz)
- $f_{sw}$  = Frekuensi *switching* dari IGBT (Hz)
- $\omega_{res}$  = Frekuensi angular resonansi (Hz)



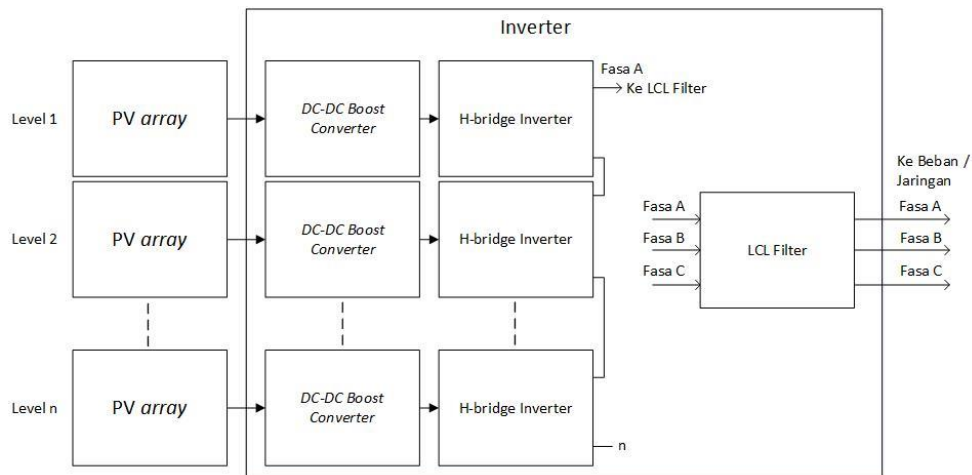
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Hasil Perancangan dan Pemilihan Spesifikasi

**Tabel 1. Parameter Perancangan**

<b>Parameter Hasil Perhitungan Untuk Inverter</b>	
Jumlah level <i>inverter</i> , <i>m</i>	27 level
Jumlah <i>array</i> PV (total), <i>s</i>	39 <i>Array</i>
Tegangan nominal DC, $V_{dc(nom)}$	1131,37 V
Kapasitas maksimum <i>inverter</i> pada $pf=1$	2,5 MVA
Arus nominal	72,17 A
Arus maksimum, $I_{dc(max)}$	102,06 A
<b>Modul PV yang Dipilih untuk Sistem PLTS</b>	
Pembuat modul	Yingli Solar
Tipe	Panda YL300c-30b
Daya keluaran maksimum, $P_{max}$	300 W
Tegangan MPP, $V_{mpp}$	32,7 V
Arus MPP, $I_{mpp}$	9,16 A
Tegangan open-circuit, $V_{oc,mod}$	40,1 V
Arus hubung singkat, $I_{sc}$	9,66 A
Koefisien temperatur dari $V_{oc}$ , $\beta_{voc}$	-0,30 %/°C
Koefisien temperatur dari $I_{sc}$ , $\alpha_{Isc}$	0,04 %/°C
<b>Parameter Jumlah Modul PV</b>	
Jumlah PV terhubung seri dalam satu string, $n_{pv,str}$	24 modul PV
Jumlah <i>string</i> terhubung paralel dalam satu array, $n_{str}$	9 <i>String</i>
Jumlah total modul PV Setiap Level, $n_{pv,level}$	216 modul PV
Jumlah total modul PV, $n_{pv}$	8482 modul PV
<b>Parameter Perhitungan Konverter DC-DC</b>	
Tegangan maksimum PV String, $V_{Dcmax,str}$	993 V
Tegangan minimum PV String, $V_{Dcmin,str}$	672,26 V
Tegangan nominal DC, $V_{dc(nom)}$	1131,37 V
Arus DC masukkan <i>Inverter</i> , $I_{dc(nom)}$	72,17 A
Arus maksimum <i>Inverter</i> , $I_{dc(max)}$	102,06 A
<i>Duty Cycle</i> MOSFET pada konverter DC-DC	0,406
Induktansi Induktor konverter, $L_{dc/dc}$	11,23 $\mu$ H
Kapasitansi kapasitor konverter, $C_{dc/dc}$	57,69 $\mu$ F
<b>Filter LCL</b>	
Arus <i>ripple</i> maksimum, $\Delta I_{l,max}$	10,21 A
Kapasitansi kapasitor, $C_{f,LCL}$	2,98 $\mu$ F
Induktansi induktor sisi jaringan, $L_2$	154 mH
Induktansi induktor sisi <i>inverter</i> , $L_1$	25,30 mH

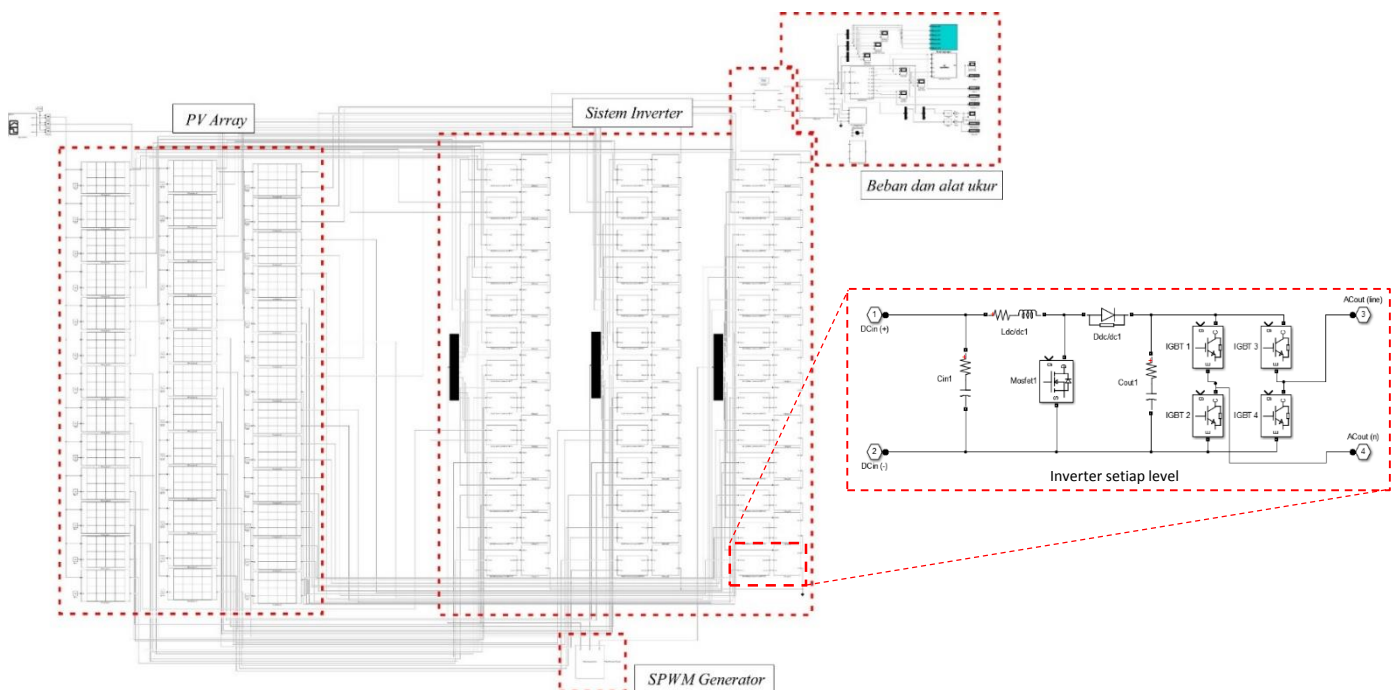
Tabel 1 menunjukkan parameter-parameter hasil perhitungan untuk komponen-komponen pada *inverter*, terkecuali pada bagian modul PV yang merupakan data spesifikasi modul PV yang dikeluarkan oleh pembuat modul PV. Komponen-komponen yang telah dipilih dan dirancang masing-masing kemudian dimodelkan pada MATLAB *Simulink* untuk menjadi satu kesatuan sistem. Gambar 6 menunjukkan diagram dari sistem PLTS yang diusulkan.



**Gambar 6. Diagram Sistem PLTS yang Diusulkan**

### 3.2 Pemodelan Pada MATLAB *Simulink*

Pada MATLAB *Simulink*, semua komponen dimodelkan termasuk di dalamnya PV *array*, DC-DC *boost converter*, *H-bridge inverter*, filter LCL dan beban resistif. Selain itu terdapat pula alat-alat ukur tegangan, arus, daya dan THD keluaran. Model sistem pada MATLAB *Simulink* ditunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 7. Model Rangkaian Sistem PLTS dengan *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter* pada MATLAB *Simulink***

a. PV Array

Pada tahun 2015, Sumathi dkk dalam **(Sumathi, Kumar, & Surekha, 2015)** menjelaskan bahwa model PV *array* dapat dibuat dengan mengimplementasikan Persamaan (31) s.d (35) pada *Simulink*. Blok *Simulink* model PV *array* yang telah dibuat ditunjukkan pada Gambar 8.

$$I_{PV} = I_L - n_p I_2 \tag{31}$$

$$I_2 = I_o \times \left[ \exp \left( \frac{q}{A K T_{pv} n_s n_{pv, str}} (V_{PV} + I_{PV} R_s) \right) - 1 \right] \tag{32}$$

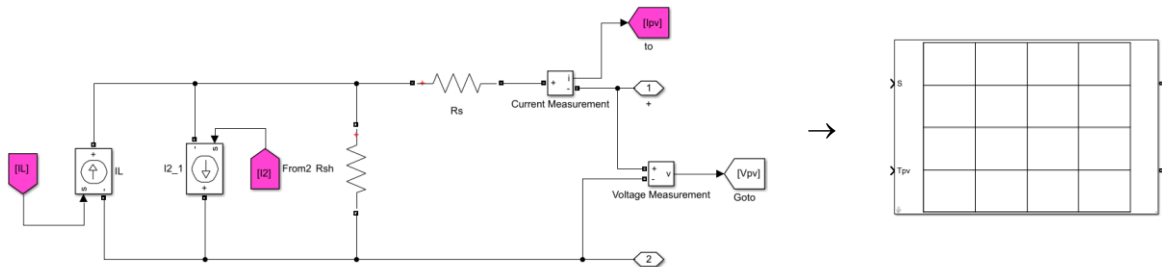
$$I_L = [I_{sc} \cdot n_{str} + K_{I_{sc}} (T_{pv} - T_{pvref})] \times \frac{\phi}{\phi_{ref}} \tag{33}$$

$$I_o = I_{or} \left( \frac{T_{pv}}{T_{pvref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{q E_{GO}}{A \cdot K} \left( \frac{1}{T_{pvref}} - \frac{1}{T_{pv}} \right) \right] \tag{34}$$

$$I_{or} = \frac{I_{sc} \cdot n_{str}}{\left[ \exp \left( \frac{q \cdot V_{oc} \cdot n_{pv, str}}{A K T_{pv} \cdot n_s \cdot n_{pv, str}} \right) - 1 \right]} \tag{35}$$

Dimana:

- $I_{PV}$  = Arus keluaran PV (A)
- $I_L$  = Arus yang dibangkitkan cahaya (A)
- $n_p$  = Jumlah sel PV yang terhubung paralel
- $I_o$  = Arus saturasi PV (A)
- $q$  = Muatan elektron:  $1,60217646e-19$  (C)
- $K$  = Konstanta Boltzmann:  $1,3806503e-19$  (J/K)
- $V_{pv}$  = Tegangan keluaran PV (V)
- $R_s$  = Tahanan seri dalam PV ( $\Omega$ )
- $I_{sc}$  = Arus hubung singkat pada temperatur dan iradiasi referensi (A)
- $K_{I_{sc}}$  = Koefisien temperatur untuk arus hubung singkat PV (A/ $^{\circ}$ C)
- $T_{pv}$  = Temperatur PV (K)
- $T_{pvref}$  = Temperatur referensi PV (K)
- $\phi$  = Intensitas radiasi matahari (W/m $^2$ )
- $\phi_{ref}$  = Intensitas radiasi matahari referensi (W/m $^2$ )
- $I_{or}$  = Arus balik saturasi (*reverse saturation current*) pada temperatur referensi (A)
- $A$  = Faktor idealitas PV (*ideality factor*) = 1,3
- $E_{GO}$  = *Band gap* untuk silikon pada temperatur 25  $^{\circ}$ C = 1,12 (eV)
- $V_{oc}$  = Tegangan rangkaian terbuka PV (V)



**Gambar 8. Blok Model dari PV Array**

b. *Maximum Power Point Tracker* (MPPT)

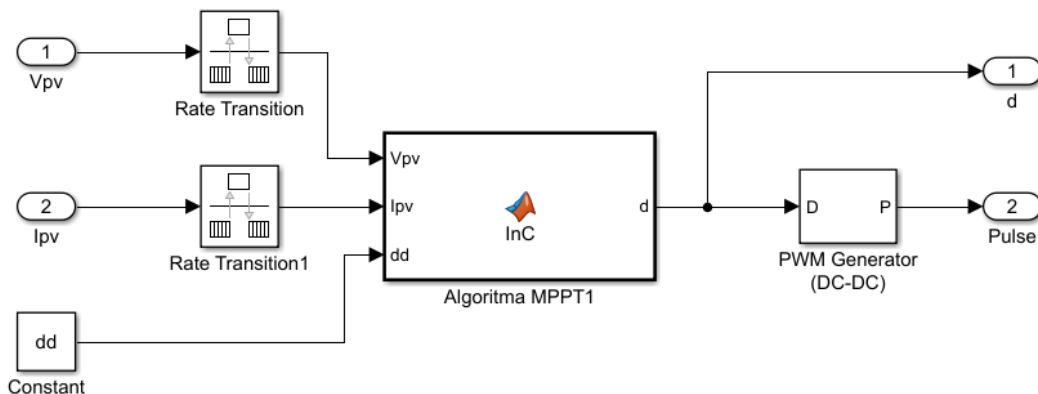
Pada penelitian ini, MOSFET pada DC-DC *boost converter* dioperasikan dengan MPPT menggunakan algoritma *Incremental Conductance* (InC) karena kinerjanya cukup baik dan cukup mudah untuk diimplementasikan. Model blok MPPT dan generator sinyal *pulse width modulation* PWM ditunjukkan pada Gambar 9. Berikut adalah kode algoritma MPPT yang digunakan pada MATLAB *Simulink*.

```
function d = InC(Vpv,Ipv,dd)
dmin = 0.05; %duty cycle minimal
dmax = 0.935; %duty cycle maksimal
dinit = dmin; %duty cycle awalan ketika sistem pertama kali berjalan,
persistent Vpv0 Ipv0 G dG d0
if isempty (Vpv0)
    Vpv0 = 0;
    Ipv0 = 0;
    G = 0;
    dG = 0;
    d0 = dinit;
end
dV = Vpv - Vpv0;
dI = Ipv - Ipv0;
G = Ipv/Vpv;
dG = dI/dV;

if ((G+dG)>0)
    d = d0 - dd;
else
    d = d0 + dd;
end

if (d > dmax)
    d = dmax;
end
if (d < dmin)
    d = dmin;
end

d0 = d;
Vpv0 = Vpv;
Ipv0 = Ipv;
end
```



**Gambar 9. Model MPPT dan generator PWM**

## c. SPWM Generator untuk IGBT

Dengan jumlah level sebanyak 27, maka dibutuhkan 156 buah IGBT untuk *inverter*. IGBT tersebut membutuhkan sinyal *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) untuk dapat bekerja bersama-sama untuk menghasilkan gelombang sinusoidal. SPWM bekerja dengan cara membandingkan gelombang sinusoidal referensi (50 Hz) dengan gelombang segi tiga dengan frekuensi tinggi atau disebut dengan gelombang *carrier* (1500 Hz). Perbandingan antara *amplitude* gelombang referensi dengan *carrier* disebut dengan indeks modulasi (*modulation index,  $M_i$* ).

$$M_i = \frac{A_{ref}}{A_c} \quad (36)$$

Dimana:

$M_i$  = Modulation index SPWM generator inverter  
 $A_{ref}$  = Amplitudo gelombang referensi  
 $A_c$  = Amplitudo gelombang *carrier*

Untuk *inverter* dengan topologi *multilevel*, Jumlah gelombang *carrier* bergantung dari jumlah level dari *inverter*, hubungannya adalah:

$$\text{jumlah carrier} = \frac{m - 1}{2} = \frac{27 - 1}{2} = 13 \text{ carrier}$$

Setiap *carrier* memiliki nilai amplitudo sebesar:

$$A_c (\text{carrier setiap level}) = \frac{A_c}{\text{jumlah carrier}} \quad (37)$$

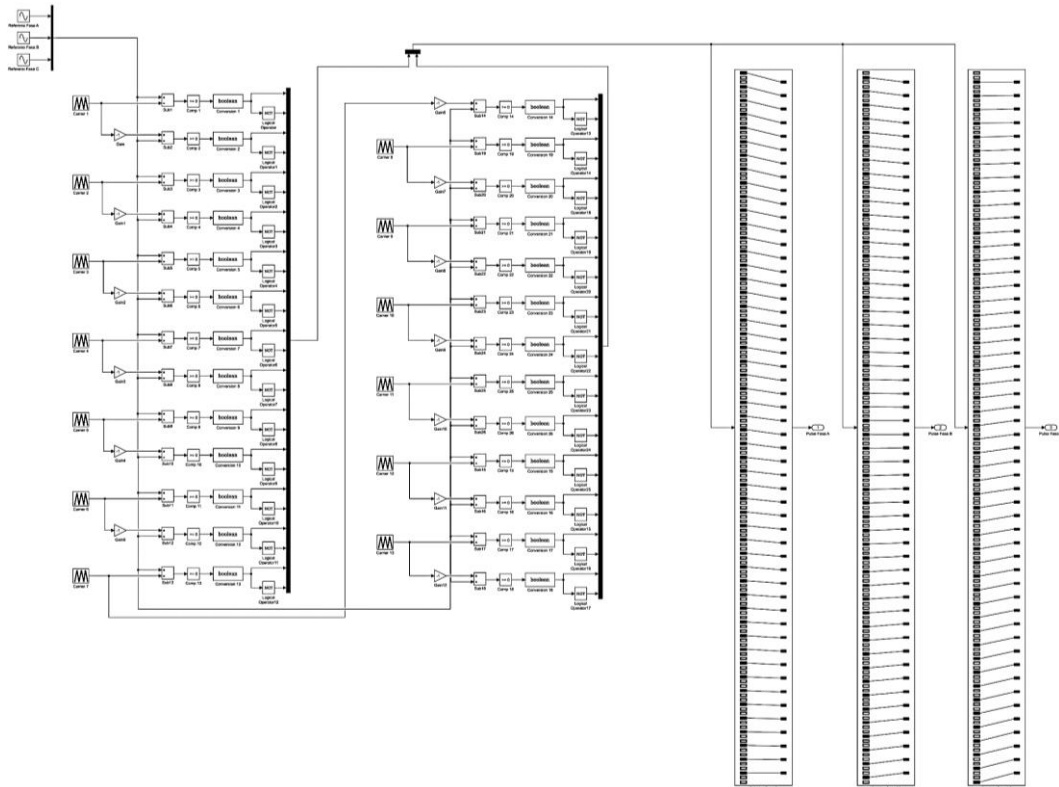
Blok model generator sinyal SPWM untuk 156 buah IGBT ditunjukkan pada Gambar 10.

### 3.3 Pembahasan

Pada simulasi, dilakukan perubahan resistansi beban untuk mengetahui daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh sistem. Tabel 2 menunjukkan data pengamatan yang berisi nilai resistansi, tegangan fasa - fasa, tegangan fasa - netral dan daya 3 fasa yang dihasilkan pada jeda waktu tertentu (dalam milidetik). Simulasi dilakukan dalam orde ms (milidetik) karena simulasi keseluruhan sistem sendiri memerlukan waktu yang cukup lama.

**Tabel 2. Data Hasil Simulasi Sistem Dengan Beban Resistif Variabel**

No	Waktu (ms)			Resistansi (ohm)			Tegangan Fasa-fasa (V)			Tegangan Fasa-netral (V)			Arus (V)			Daya 3 fasa (MW)
	awal	akhir	dT	Ra	Rb	Rc	Maks	RMS	THD (%)	Maks	RMS	Maks	RMS	THD (%)		
1	0	50	50	310	310	310	31850	22670	2,806	19420	13100	62,66	42,25	2,885	1,655	
2	50	60	10	300	300	300	31550	22690	3,186	19380	13110	64,6	42,85	3,326	1,676	
3	60	70	10	290	290	290	31060	22470	3,577	19090	12980	65,98	43,7	3,578	1,691	
4	70	80	10	280	280	280	30570	22150	3,87	18840	12780	67,31	44,52	3,777	1,7	
5	80	90	10	270	270	270	29990	21800	4,098	18600	12580	68,81	45,4	3,941	1,709	
6	90	100	10	260	260	260	29290	21410	4,331	18320	12360	70,47	46,28	4,077	1,712	
7	100	110	10	250	250	250	28830	21000	4,387	18000	12130	72	47,2	4,099	1,711	
8	110	120	10	240	240	240	28260	20610	4,382	17660	11910	73,3	48,19	4,132	1,715	
9	120	130	10	230	230	230	27630	20200	4,439	17200	11660	75,01	49,17	4,139	1,715	
10	130	140	10	220	220	220	27000	19760	4,37	16800	11400	76,49	50,23	4,049	1,713	
11	140	150	10	210	210	210	26180	19290	4,449	16390	11120	77,92	51,25	4,006	1,707	



**Gambar 10. Model *Level-Shifted SPWM Generator* untuk 156 IGBT**

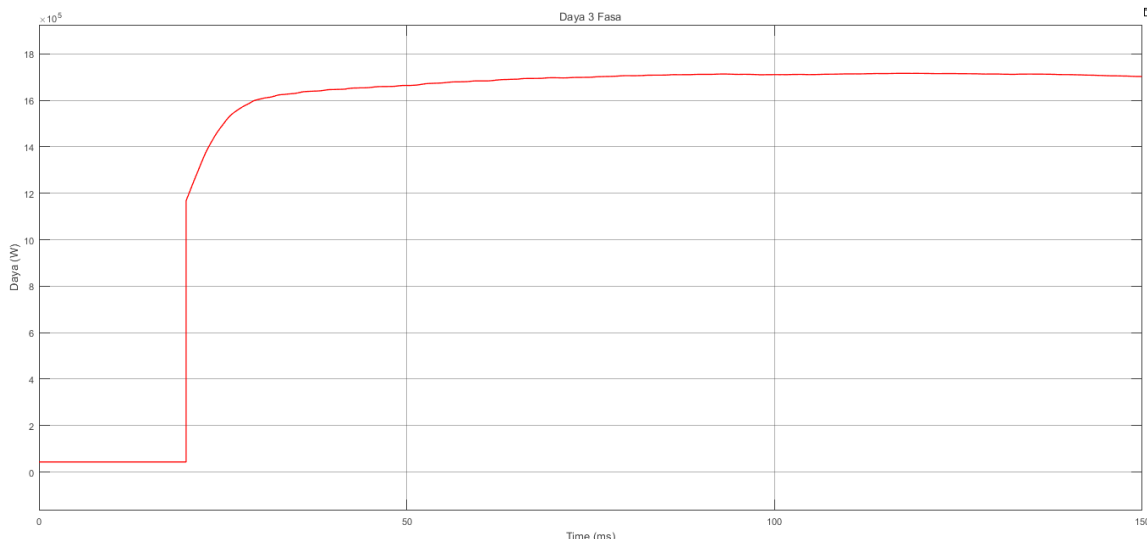
Beban resistif 3 fasa yang diberikan pada sistem merupakan resistor yang dihubungkan bintang / *wye* dan memiliki nilai resistansi yang seimbang di ketiga fasa. Kemudian, nilai resistansi diubah pada waktu yang berbeda untuk jeda waktu tertentu namun tetap memiliki nilai yang seimbang pada semua fasa. Pola umum yang didapatkan ketika resistansi turun adalah tegangan turun (fasa-fasa dan fasa-netral) dan arus naik. THD untuk tegangan dan arus naik ketika resistansi turun. Sementara daya memiliki pola membentuk bukit/ *hill* dengan *slope* yang cukup landai dan memiliki nilai maksimum pada waktu dan nilai resistansi tertentu seperti pada Gambar 11. Variasi resistansi yang diberikan memiliki rentang 100  $\Omega$  dengan penurunan 10  $\Omega$ . Penurunan resistansi sebesar 100  $\Omega$  menyebabkan:

- 1) Penurunan tegangan fasa-fasa RMS sebesar 3.380 V
- 2) Kenaikan THD tegangan sebesar 1,643 %
- 3) Penurunan tegangan fasa-netral RMS sebesar 1.980 V
- 4) Kenaikan Arus fasa RMS sebesar 9 A
- 5) Kenaikan THD arus sebesar 1,121 %
- 6) Fluktuasi daya keluaran dari 1,655 MW naik menjadi daya maksimum sebesar 1,716 MW lalu turun menjadi 1,707 MW pada akhir simulasi.

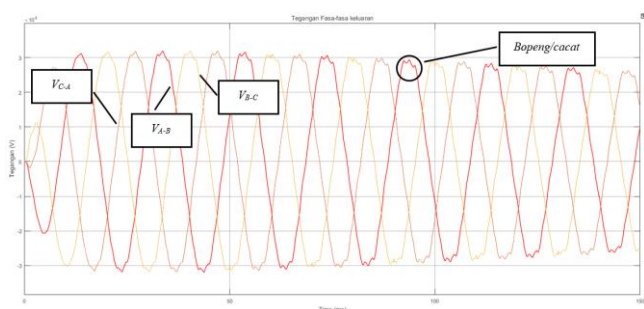
Dari poin 1-6 tersebut, jelas bahwa perubahan resistansi beban menyebabkan perubahan tegangan yang cukup signifikan. Perubahan amplitudo tegangan serta tegangan RMS ditunjukkan pada Gambar 12 dan Gambar 13. Gambar-gambar tersebut menunjukkan kurva-kurva dari parameter hasil pengukuran terhadap waktu simulasi.

Berdasarkan spesifikasi jaringan yang telah dipilih pada perancangan *inverter*, sistem harus beroperasi pada batas tegangan atas 110% dan bawah 88% dari tegangan nominal atau antara 22 kV dan 17,6 kV. Simulasi tidak mencapai tegangan 88% dari nominal, sehingga

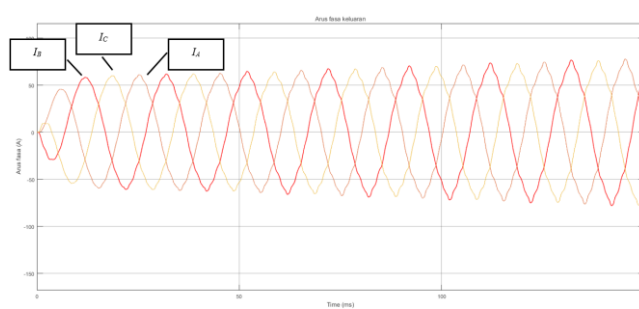
diambil data tegangan paling rendah pada resistansi paling rendah. Tabel 3 menunjukkan tegangan, arus, THD, daya dan resistansi ketika tegangan berada pada batas atas, nominal dan pada titik terendah. Hasilnya, daya tertinggi didapatkan ketika tegangan bernilai nominal, dibandingkan dengan batas atas dan bawah.



**Gambar 11. Daya 3 Fasa Keluaran**



**Gambar 12. Bentuk Gelombang Tegangan Fasa-Fasa Keluaran**



**Gambar 13. Bentuk Gelombang Arus Fasa Keluaran**

**Tabel 3. Data Pengamatan Berdasarkan Kriteria Tegangan Fasa-Fasa Keluaran**

No	Tegangan RMS terukur	Waktu (ms)	Tegangan (V)			Arus		Daya (MW)	R (ohm)
			Vrms,f-f	Vrms,f-n	THD (%)	Irms (A)	THD (%)		
1	Batas atas	81,958	22000	12660	3,847	44,98	4,006	1,707	270
2	Nominal	131,909	20000	11500	4,239	49,66	4,207	1,712	220
3	Terendah	150	19180	11060	3,981	51,44	4,041	1,703	210

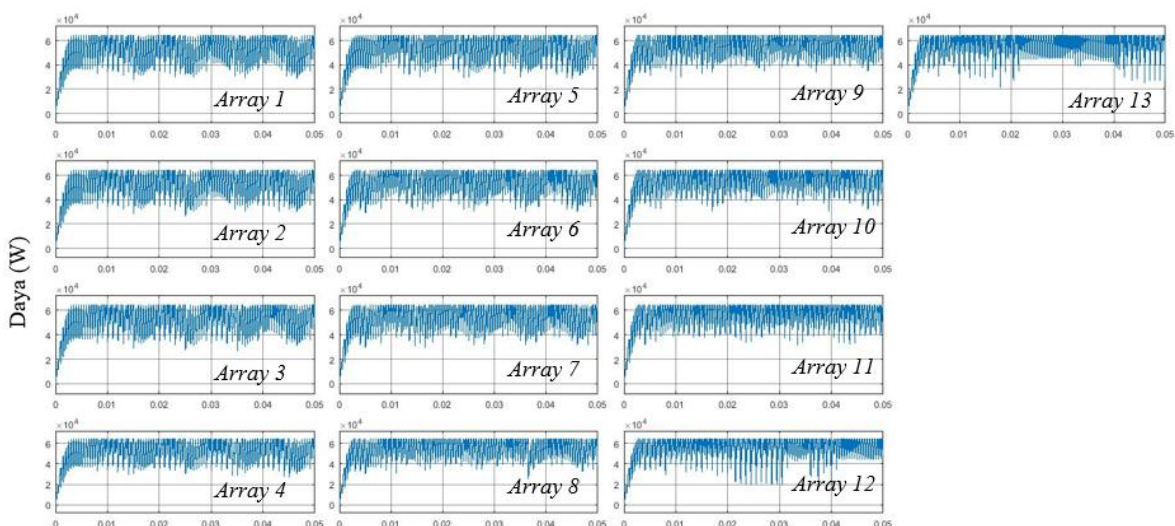
**Tabel 4. Daya Maksimum Keluaran Sistem**

Daya (MW)	Waktu (ms)	R (ohm)	Tegangan (V)			Arus	
			Vrms,f-f	Vrms,f-n	THD (%)	Irms (A)	THD (%)
1,716	117,406	240	20540	11900	3,987	48,25	4,226

Hasil simulasi menunjukkan bahwa daya maksimum dapat dicapai ketika resistansi beban sekitar 240 Ω dengan tegangan fasa-fasa 20,54 kV dan arus fasa 48,25 A. Daya maksimum yang dapat dicapai ketika iradiasi matahari dan temperatur PV sistem masing-masing 1000 W/m<sup>2</sup> dan 25 °C adalah 1,716 MW. Nilai daya tersebut jauh dibandingkan dengan daya target yaitu 2,5 MW. Secara kasar, efisiensi sistem ( $\eta_{sistem}$ ) pada keadaan nominal adalah:

$$\eta_{sistem} = \frac{\text{Daya 3 fasa maks}}{\text{Daya DC maks}} = \frac{1,716 \times 10^6}{39 \cdot P_{mp,array}} = \frac{1,716 \times 10^6}{2,5038 \times 10^6} \approx 68,54 \%$$

Nilai efisiensi tersebut cukup kecil karena daya DC yang di estimasi sebagai hasil dari pemberian iradiasi 1000 W/m<sup>2</sup> dan temperatur PV 25 °C adalah 2,5038 MW. Sementara daya keluaran hanya mencapai 17,16 MW dengan beban resistif. Penyebab rendahnya efisiensi sistem dapat dijelaskan dengan melihat Gambar 14, Tabel 5, Gambar 15, dan Tabel 6. Pada grafik daya keluaran PV *array*, terlihat bahwa terjadi *ripple* yang sangat besar. Nilai maksimum dari kurva tersebut adalah 64,2 kW yang setara dengan daya maksimum dari PV *array* pada kondisi nominal. Namun, nilai efektif atau RMS dari daya tersebut hanya berkisar antara 52,18 kW hingga 55,51 kW, jauh di bawah nilai maksimum. Daya dari PV tersebut kemudian menjadi masukan bagi konverter DC-DC dengan gelombang keluaran dan besar daya yang ditunjukkan pada Gambar 15 dan Tabel 6. Daya keluaran konverter DC-DC tersebut kemudian diubah menjadi AC oleh *inverter*.

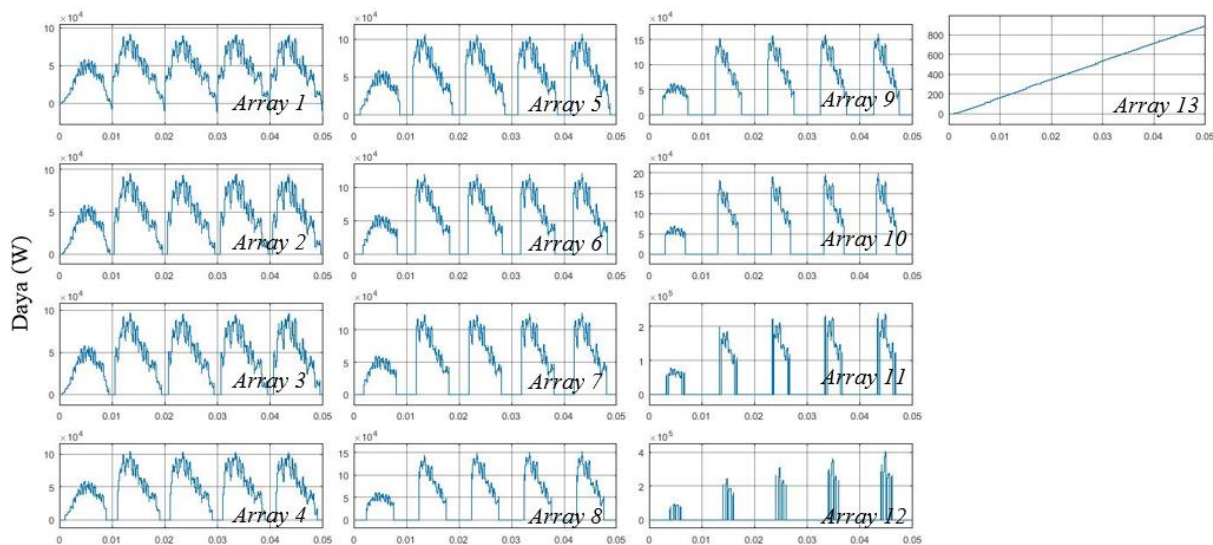


**Gambar 14. Daya Keluaran PV Array 1-13 pada Fasa A**



**Tabel 5. Daya Keluaran PV Array**

PV array	PV Power (kWp)		PV array	PV Power (kWp)		PV array	PV Power (kWp)		PV array	PV Power (kWp)	
	Max	RMS		Max	RMS		Max	RMS		Max	RMS
1	64,2	52,18	5	64,2	53	9	64,2	54,79	13	64,2	55,51
2	64,2	52,33	6	64,2	53,5	10	64,2	55,01			
3	64,2	52,47	7	64,2	53,89	11	64,2	55,46			
4	64,2	52,53	8	64,2	54,46	12	64,2	54,92			



**Gambar 15. Daya DC Keluaran Konverter DC-DC Hasil Simulasi**

**Tabel 6. Daya Keluaran Konverter DC-DC (Sumber PV Array)**

Level	Converter output power (kWp)		Level	Converter output power (kWp)		Level	Converter output power (kWp)		Level	Converter output power (kWp)	
	Max	RMS		Max	RMS		Max	RMS		Max	RMS
1	91,8	50,18	5	106,8	54,96	9	161,3	66,84	13	0,887	0,5137
2	94,89	51,17	6	120,7	58,36	10	198,9	72,79			
3	96,63	51,83	7	125,9	60,05	11	239,5	78,4			
4	103,4	53,71	8	152,3	64,79	12	403,3	75,54			

Tabel 7 menunjukkan daya-daya total hasil pengukuran pada fasa A.  $P_{pv\ max}$  merupakan daya maksimum yang dihasilkan PV,  $P_{pv,out}$  merupakan daya RMS keluaran PV array,  $P_{DC-DC}$  merupakan daya RMS keluaran konverter DC-DC, dan  $P_{phase-A}$  merupakan daya keluaran inverter fasa A. Tabel tersebut menunjukkan bahwa konversi daya yang paling tidak efisien adalah pada keluaran PV dan pada konversi DC menjadi AC oleh inverter. Daya keluaran PV (RMS) hanya bernilai 83,5% dari daya PV maksimum sementara daya fasa A (AC) RMS hanya 84,08% dari daya DC masukan inverter. Sementara daya keluaran konverter DC-DC adalah 94,2% dari daya RMS masukan.

**Tabel 7. Konversi Daya Pada Fasa A**

$P_{pv\ Max}$ (kW)	$P_{pv\ out}$ (kW)	$P_{DC-DC}$ (kW)	$P_{phase-A}$ (kW)
831,4	694,5	654,2	550,03

Rendahnya efisiensi ini disebabkan karena kinerja MPPT yang kurang optimal dan kurang stabil dalam mengondisikan daya keluaran PV. Penambahan dan pengurangan *duty cycle* yang tidak optimal menyebabkan *ripple* yang besar pada sisi keluaran PV *array*. Pada saat konversi daya DC oleh konverter DC-DC, resistansi seri pada komponen-komponen konverter serta *switching losses* juga dapat berkontribusi dalam menurunkan daya keluaran yang idealnya sama dengan daya masukan konverter. *Switching losses* tersebut juga dapat terjadi pada proses konversi DC menjadi AC pada IGBT.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

##### 4.1 Kesimpulan

Berdasarkan perancangan, pemodelan dan simulasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Perancangan menghasilkan sistem dengan *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter* 3 fasa 27-level.
2. Sub-sistem *inverter* terdiri dari *DC-DC boost converter* dan *H-Bridge Inverter* pada setiap level tegangan.
3. Setiap level PV *array* dihubungkan secara bertingkat (*cascaded*) agar keluaran sistem dapat mencapai tegangan 20 kV.
4. Keluaran *cascaded H-Bridge multilevel inverter* dihubungkan dengan LCL filter untuk memperbaiki kualitas gelombang tegangan dan arus keluaran sistem. MPPT diimplementasikan pada *DC-DC boost converter* agar daya keluaran modul PV tetap berada pada titik maksimum pada level iradiasi dan temperatur PV yang berubah.
5. Setiap komponen utama dari sistem, mulai dari PV *array*, *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter*, dan LCL filter dimodelkan pada MATLAB *Simulink* untuk kemudian dilakukan simulasi operasi sistem pada kondisi STC (level iradiasi matahari 1000 W/m<sup>2</sup> dan Temperatur PV 25 °C).
6. Simulasi sistem pada kondisi STC menghasilkan daya keluaran 1,716 MW (3 fasa) atau 68,54% dari daya DC maksimum 2,5 MWp.
7. Efisiensi sistem cukup kecil karena kinerja MPPT, konverter DC-DC, serta *switching* IGBT yang kurang optimal diindikasikan dengan *ripple* yang cukup besar gelombang tegangan dan arus DC dan AC.
8. Tegangan keluaran sistem dapat mencapai 20 kV, dan masih dalam standar rentang tegangan ketika diberi beban hingga 1,716 MW.
9. Nilai THD sudah memenuhi standar karena memiliki nilai di bawah 5%.

##### 4.2 Saran

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat dikatakan bahwa sistem yang dirancang belum bekerja dengan maksimum, terutama dilihat dari daya keluaran yang hanya 68,54% dari daya DC maksimum. Agar daya keluaran lebih baik, dapat dilakukan:

1. Optimalisasi pengaturan *duty cycle* atau PWM pada *DC-DC converter* dan *inverter* untuk mengurangi *ripple* serta *switching losses* pada komponen-komponen tersebut.
2. Menggunakan alternatif algoritma MPPT yang lebih stabil.
3. Menggunakan alat penyimpan energi sementara agar daya sistem lebih stabil.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Drs. Djafar Sodik, S.T., M.Eng., dan Ibu Sri Utami, SST., M.T. selaku Pembimbing I dan Pembimbing II dalam penelitian ini,
2. Bapak Ir. Teguh Sasono, M.T. selaku koordinator Tugas Akhir dari Program Studi Teknologi Pembangkit Tenaga Listrik sekaligus untuk penelitian ini,
3. Bapak Ir. Achmad Mudawari, M.T. dan Bapak Aceng Daud, S.T., M.Eng, selaku Evaluator dari penelitian ini,
4. Bapak Arsyad Ramadhan Darlis dan Tim Redaksi Jurnal Elkomika Institut Teknologi Nasional (ITENAS) Bandung,
5. Dan pihak-pihak lain yang telah membantu Penulis yang tidak dapat Penulis sebutkan satu per satu.

### DAFTAR RUJUKAN

- Advanced-Energy. (2014). *www.solarenergy.advanced-energy.com*. Dipetik 03 16, 2017, dari <http://solarenergy.advanced-energy.com/upload/File/Application%20Notes/ENG-600vor1000V-260-02.pdf>
- BPS. (2017). *Suhu Minimum, Rata-Rata, dan Maksimum di Stasiun Pengamatan BMKG (oC) 2011-2015*. Dipetik April 18, 2017, dari [https://www.bps.go.id/website/tabelExcelIndo/Indo\\_151\\_17952722.xls](https://www.bps.go.id/website/tabelExcelIndo/Indo_151_17952722.xls)
- Garcia, M. C., & Balenzategui, J. L. (2004). Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on Nominal Operation Cell Temperature calculations . *Elsevier Renewable Energy 1997-2010*(29).
- Hauke, B. (2014). *Application Report : Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage*. Dallas: Texas Instruments.
- Islam, M. R., Guo, Y., & Zhu, J. (2014). *Power Converters for Medium Voltage Networks*. Heidelberg: Springer.
- Pandey, R., Tripathi, R. N., & Hanamoto, T. (2017). *Comprehensive Analysis of LCL Filter Interfaced Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter-Based DSTATCOM*. Fukuoka: Multidisciplinary Digital Publishing Institute .
- Reznik, A., Simoes, M. G., Al-Durra, A., & Muyeen, S. M. (2014). *LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid Interconnected Systems*. Abu Dhabi: Petroleum Institute.
- SMA. (2013). *Central Inverter Planning of a PV Generator Planning Guidelines*. Niestetal: SMA Solar Technology AG.
- Sumathi, S., Kumar, L. A., & Surekha, P. (2015). *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems*. Cham: Springer.