

## ***Power Electronic Interface pada Modul Photovoltaic yang Terhubung dengan Grid***

Yusran<sup>1</sup>, Mochamad Ashari<sup>2</sup>, dan Adi Soeprijanto<sup>2</sup>

1. PPs Teknik Elektro ITS (Dosen Teknik Elektro Unhas), Surabaya

2. Jurusan Teknik Elektro ITS, Surabaya

### **Kontak Person:**

Yusran

Jl. Keputih Utara Gang Buntu No 22 Sukolilo

Surabaya, 60111

Telp: 08124181907, E-mail: yusranibnu@yahoo.com, yusran@elect-eng.its.ac.id

### **Abstrak**

*Paper ini membahas tentang power electronic interface pada modul photovoltaic yang terhubung dengan grid. Modul photovoltaic tersusun dari solar cell yang akan bekerja optimal pada MPP (maximum power point). Koneksi modul photovoltaic tersebut ke grid umumnya menggunakan power electronic converter. Inverter PV mengalami evolusi mulai dari centralized inverter, string inverters dan AC modules dan multi-string inverter, ac modules and ac cells. Topologi inverter dapat diklasifikasikan menjadi empat bagian berdasarkan: number of power processing stages, power decoupling, transformer and types of interconnection, dan types of grid interface.*

**Kata kunci :** *power electronic interface, inverter, photovoltaic, grid*

### **Abstract**

*This paper describes about power electronic interface at photovoltaic module connected to grid. Photovoltaic module composed from solar cell that work optimally at MPP (maximum power point). Photovoltaic modul connection to grid commonly uses power electronic converter. PV inverter evolutes from centralized inverter, string inverters and AC modules and multi-string inverter, ac modules and ac cells. Inverter's topologi can be classified based on : number of power processing stages, power decoupling, transformer and types of interconnection, dan types of grid interface.*

**Keywords:** *power electronic interface, inverter, photovoltaic, grid*

## **1 PENDAHULUAN**

Permintaan listrik yang berasal dari energi surya tumbuh secara konsisten sebesar 20-25 % per tahun dalam kurun waktu 20 tahun terakhir ini. Hal ini dipicu oleh adanya penurunan biaya dan harga yang terkait dengan energi tersebut. Penurunan biaya dan harga tersebut dikendalikan oleh beberapa faktor sebagai berikut:

1. Adanya peningkatan efisiensi *solar cell*
2. Pengembangan teknologi manufaktur
3. Skala ekonomi

Peningkatan penggunaan sumber energi terbarukan serta *distributed generation* memerlukan strategi baru untuk pengoperasiannya serta adanya manajemen *electricity grid* untuk memelihara dan meningkatkan keandalan dan kualitas pasokan daya. Teknologi elektronika daya memiliki peranan

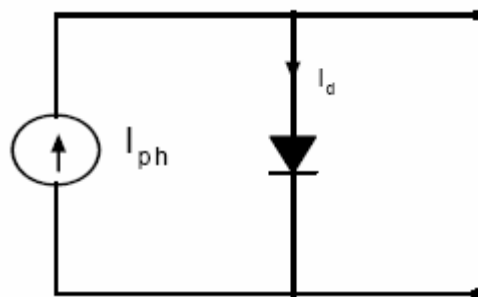
yang sangat penting pada sistem *distributed generation* serta integrasi sumber energi terbarukan ke dalam *electrical grid*. Teknologi tersebut dipakai secara luas dan mengalami perkembangan yang pesat seiring dengan makin banyaknya integrasi ke grid.

Lima tahun terakhir ini, elektronika daya mengalami evolusi cepat yang diakibatkan oleh dua faktor utama. Faktor pertama adalah perkembangan *fast semiconductor switches* yang mampu untuk *switching* cepat. Faktor yang kedua adalah pengenalan *real-time controller* yang dapat diimplementasikan pada *advanced* dan *complex control algorithm*. Hal tersebut menjadikan arah pengembangan elektronika daya menjadi *cost-effective* dan *grid-friendly converter*.

## 2 SOLAR CELL

*Solar cell* adalah komponen paling fundamental dari sistem *photovoltaic* yang merubah energi matahari menjadi energi listrik. *Solar cell* tersebut mirip dengan *solid-state electronic device* yang umum digunakan seperti dioda, transistor dan lain-lain. *Solar cell* terdiri atas *p-n junction* yang terbentuk oleh material semikonduktor. Ketika sinar matahari menimpa *solar cell*, maka sepasang *electron-hole* dibangkitkan oleh energi dari cahaya (photon). Medan listrik yang terbentuk pada *junction* menyebabkan pasangan *electron-hole* akan berpisah dengan aliran elektron menuju daerah-n dan hole menuju daerah p. Tegangan listrik dibangkitkan pada output. *Photocurrent* ( $I_{ph}$ ) akan mengalir melalui beban yang terhubung dengan terminal output pada *photovoltaic cell*.

Rangkaian ekivalen ideal dari *solar cell* diperlihatkan pada gambar 1



Gambar 1 Diagram rangkaian ekivalen *solar cell*

Rangkaian tersebut terdiri dari sumber arus yang paralel dengan dioda. Pada kasus ideal, persamaan arus-tegangan *solar cell* diberikan oleh persamaan :

$$I = I_{ph} - I_o(e^{qV/kT} - 1) \quad (1)$$

dimana

$I_{ph}$  = Photo current

$I_o$  = diode reverse saturation current

$q$  = muatan elektron ( $1.6 \times 10^{-19}$  C)

$k$  = konstanta Boltzman ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)

$T$  = temperatur cell dalam Kelvin

*Solar cell* dimodelkan dan disimulasikan dengan menggunakah software PSIM. Simulasi didasarkan pada *datasheet* dari modul photovoltaic Shell SQ160PC. Parameter dari modul tersebut diberikan pada tabel 1. Modul tersebut terbuat dari 72 *solar cell* yang terhubung seri untuk memberikan daya output maksimum 160 W.

Karakteristik tegangan-arus (I-V) PV yang disimulasikan dari modul PV diperlihatkan pada gambar 2. Karakteristik didapatkan pada level konstan dari pemancaran dan temperatur sel konstan.

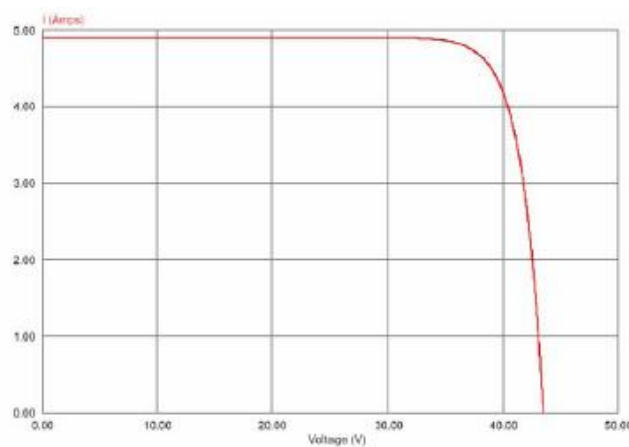
Titik paling signifikan dari plot karakteristik ini adalah arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ) dan tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ). Arus hubung singkat adalah arus maksimum yang dihasilkan ketika sel

## Power Electronic Interface pada Modul Photovoltaic yang Terhubung dengan Grid

dihubungsingkat dan tegangan terminal 0, pada beban nol. Tegangan rangkaian terbuka adalah tegangan yang melewati terminal sel dengan kondisi rangkaian terbuka, dimana arus adalah 0, dan resistansi beban tidak terbatas.

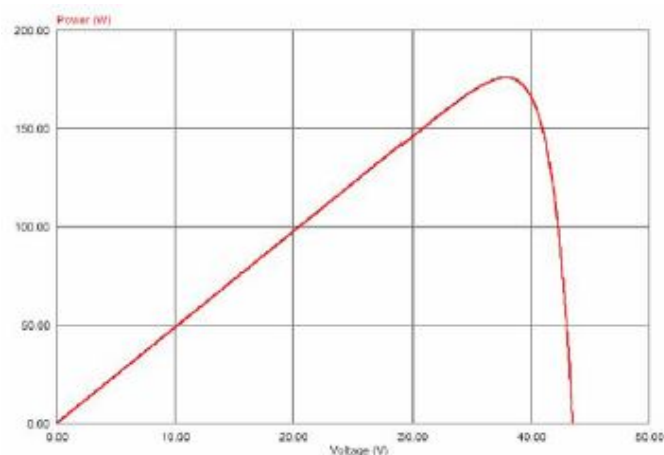
Tabel 1 Modul Photovoltaic (PV) Shell SQ160PC

Rated Power	$P_R$	160 W
Peak Power*	$P_{MPP}^*$	160 W
Peak Power Voltage	$V_{MPP}$	35 V
Peak Power Current	$I_{MPP}$	4.58 A
Open Circuit Voltage	$V_{OC}$	43.5 V
Short Circuit Current	$I_{SC}$	4.9 A
Minimum Peak Power	$P_{MPP-Min}$	152 W
Tolerance on Peak Power		$\pm 5 \%$



Gambar 2. Karakteristik arus-tegangan modul PV Shell SQ 160 PC

Gambar 3 memperlihatkan karakter simulasi daya-tegangan modul PV. Untuk mendapatkan efisiensi maksimum dari *solar cell* maka penting untuk mengoperasikan sel pada titik dimana sel membawa daya maksimum. Kerja operasi ini dikenal sebagai *maximum power point* ( $P_{MPP}$ ).



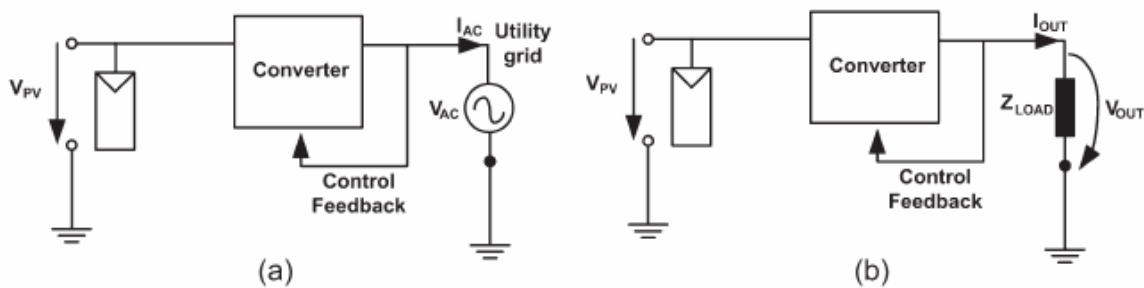
Gambar 3 Karakteristik daya-tegangan modul PV Shell SQ 160 PC

### 3 INVERTER INTERFACING PV MODULE

Sel PV secara umum dapat dihubungkan dengan grid (*grid connection application*) atau dapat digunakan sebagai *isolated power supplies*. Dua aplikasi sistem PV diperlihatkan pada gambar 4.

*Solid-state inverter* telah terbukti sebagai teknologi yang memungkinkan untuk penempatan sistem PV ke dalam grid.

*Inverter interfacing PV module* didalam grid mempunyai dua fungsi utama yaitu menjamin modul PV agar beroperasi pada *maximum power point* (MPP) serta menginjeksikan arus sinusoidal ke dalam grid.



Gambar 4 Aplikasi PV (a) Aplikasi Grid-Connection (b) Aplikasi Power-Supply

Salahsatu standar persyaratan inverter adalah kemampuan untuk mendeteksi situasi *islanding*. *Islanding* adalah kondisi dimana inverter tetap beroperasi walaupun grid telah di-*remove* karena adanya permasalahan ataupun kerusakan dan selanjutnya mensuplai beban. Skema deteksi normalnya terbagi atas dua grup yaitu aktif dan pasif. Metode pasif tidak mempunyai pengaruh terhadap kualitas daya karena metode tersebut hanya memonitor parameter grid. Skema aktif mempengaruhi kualitas daya dan menimbulkan permasalahan dengan *multiple inverter* yang paralel dengan grid. *Islanding* juga dapat menyebabkan permasalahan untuk kebanyakan *high-power transformerless system*, yaitu inverter satu fasa dengan *neutral to line grid connection* yang merupakan sebuah sistem yang diground pada sisi grid.

Standar IEEE dan IEC memberikan batasan jumlah maksimum arus dc yang diinjeksikan ke dalam grid. Pembatasan injeksi tersebut bertujuan untuk mencegah saturasi pada transformator distribusi. Namun demikian, limit injeksi yang agak kecil (0,5 % dan 1,0 % dari *rated output current*) ataupun nilai yang terlalu kecil dapat menyulitkan untuk pengukuran secara tepat. Hal ini dapat di-mitigasi dengan meningkatkan rangkaian pengukuran atau dengan penempatan *line-frequency transformer* antara inverter dengan grid. Beberapa inverter menggunakan *transformer embedded in a high-frequency dc-dc converter* untuk isolasi *galvanic* antara modul PV dengan grid. Hal ini walaupun tidak menyelesaikan masalah terkait dengan injeksi arus dc tetapi akan membuat *grounding* modul PV menjadi lebih mudah.

## 4 EVOLUSI INVERTER PV

### 4.1 Centralized Inverter

Teknologi inverter ini diilustrasikan pada gambar 5(a) , berbasis pada *centralized inverter* yang menjadi *interface* sejumlah besar modul PV ke grid. Modul PV dibagi ke dalam *series connection* (yang dikenal sebagai string), dimana setiap string tersebut membangkitkan tegangan tinggi yang cukup untuk mencegah *amplification* yang lain. *Series connection* tersebut kemudian dihubungkan secara paralel melalui *string diode*, untuk mendapatkan level daya tinggi.

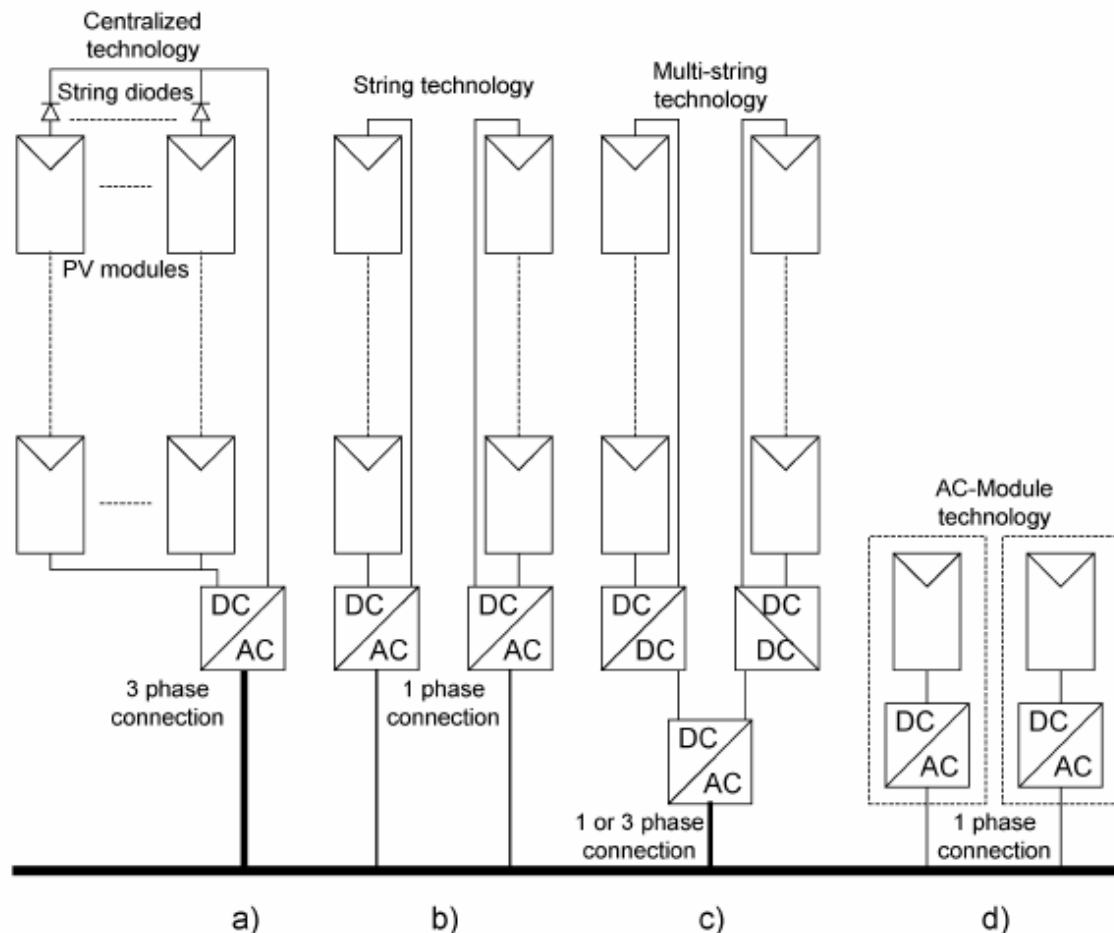
### 4.2 String Inverter and AC Modules

Teknologi inverter ini berisikan inverter *string* dan *ac module*. Inverter *string* yang diperlihatkan pada gambar 5(b) adalah versi reduksi dari *centralized inverter*, dimana sebuah *single string* dari modul PV dihubungkan dengan inverter. Tegangan input mungkin cukup tinggi untuk mencegah *voltage*

## Power Electronic Interface pada Modul Photovoltaic yang Terhubung dengan Grid

*amplification*. Teknologi ini membutuhkan sekitar 16 modul PV seri (sistem Eropa). Tegangan rangkaian terbuka total untuk modul 16 PV dapat mencapai 720 V, yang dikenal sebagai 1000 V

MOSFET/IGBT yang mengizinkan tegangan de-rating 75 % dari semikonduktor. Namun demikian tegangan operasi normalnya hanya sekitar 450 – 510 V. Modul AC pada gambar 5(d) adalah integrasi antara inverter dan modul PV ke dalam satu *electrical device*. Hal tersebut untuk menghilangkan *mismatch losses* antara modul PV.



Gambar 5. Overview inverter PV (a) Centralized technology (b) String technology (c) Multi string technology (d) Ac module and ac cell technology

### 4.3 Multi String Inverter, AC Modules dan AC Cells

Inverter multi *string* yang diperlihatkan pada gambar 5(c) adalah pengembangan lebih lanjut dari inverter string, dimana beberapa *string*, *interface* dengan *dc-dc converter* ke *common dc-ac inverter*. Hal ini menjadi keuntungan bila dibandingkan dengan *centralized system*, karena setiap *string* dapat dikontrol secara individual.

Tantangan utama yang sebenarnya adalah pengembangan sebuah inverter yang dapat menguatkan tegangan sangat rendah 0,5 – 1.0 V dan 100 W per meter bujursangkar sampai ke level yang sesuai untuk grid, dengan efisiensi tinggi.

## 5 KLASIFIKASI TOPOLOGI INVERTER

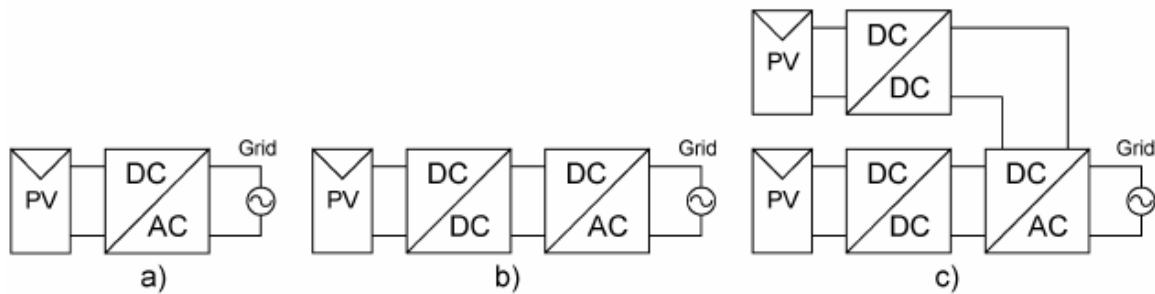
Secara konvensional, klasifikasi topologi PV dibagi atas dua kategori utama yaitu : inverter PV dengan konverter dc-dc (dengan atau tanpa isolasi) dan inverter PV tanpa konverter dc-dc.

Adapun klasifikasi lain dari topologi inverter yang menghubungkan modul PV ke single phase grid terbagi menjadi empat bagian berdasarkan :

1. jumlah *power processing stages*
2. tipe *power decoupling* antara modul PV dan *single phase grid*
3. penggunaan transformator dan tipe interkoneksi
4. tipe dari *grid interface*

### 5.1 Jumlah Power Processing Stages

Gambar 6 menunjukkan tiga kasus *single* dan *multiple stage inverter* yaitu : *single power processing*, *dual power processing* dan *dual stage inverter*.



Gambar 6 Tiga tipe inverter PV (a) *A single power processing stage* (b) *Dual power processing inverter* dimana konverter dc-dc menangani MPPT, inverter dc-ac mengontrol arus grid. *Voltage amplification* termasuk dalam dua stage (c) *Dual-stage inverter*, dimana setiap modul PV atau *string* dihubungkan ke konverter dc-dc yang dihubungkan ke *common dc-ac inverter*

Gambar 6(a) adalah sebuah *single-stage inverter* dimana harus menangani seluruh tugas oleh dirinya sendiri misalnya MPPT, kontrol arus grid, dan mungkin juga *voltage amplification*. Ini adalah konfigurasi tipikal untuk *centralized inverter*. Inverter juga harus didesain untuk menangani daya puncak sebesar 2 kali daya nominal.

Gambar 6(b) melukiskan sebuah *dual-stage inverter*. Konverter dc-dc menangani MPPT (dan mungkin *voltage amplification*). Tergantung pada kontrol dc-ac inverter, output dari dc-dc konverter adalah tegangan dc murni ( dan konverter dc-dc hanya didesain untuk menangani tegangan nominal) atau arus output dari konverter dc-dc dimodulasi untuk mengikuti *rectified sine wave* (konverter dc-dc sekarang meng-handle daya puncak, dua kali daya nominal). Inverter dc-ac adalah kontrol terhadap arus grid dengan *pulsewidth modulation* (PWM) atau bang-bang operation.

Gambar 6(c) adalah solusi untuk *multi string* inverter. Tugas konverter dc-dc hanya MPPT dan mungkin *voltage amplification*. Konverter dc-dc dihubungkan dengan *dc link* yang menjaga kontrol arus grid.

### 5.2 Power Decoupling

*Power decoupling* secara normal didapatkan melalui sebuah *electrolytic capacitor*. Komponen ini adalah faktor utama yang menentukan lifetime peralatan sehingga harus dijaga sebaik mungkin atau sebaiknya diganti dengan *film capacitor*. Kapasitor ditempatkan secara paralel dengan modul PV atau dalam *dc link* antara *inverter stage*.

Ukuran dari decoupling capacitor dapat dinyatakan dengan :

$$C = \frac{P_{PV}}{2 \cdot \omega_{grid} \cdot U_C \cdot u_C} \quad (2)$$

dimana :  $P_{PV}$  adalah daya nominal dari modul PV  
 $U_C$  adalah tegangan rata-rata yang melewati kapasitor  
 $u_C$  adalah amplitudo *ripple*

### 5.3 Transformator dan Tipe Interkoneksi

Beberapa inverter menggunakan sebuah transformator yang ditempelkan pada *high frequency dc-dc converter* atau dc-dc inverter, sementara yang lain menggunakan *line-frequency transformer*. Beberapa inverter bahkan sama sekali tidak menggunakan transformator. Inverter moderen cenderung menggunakan high-frequency transformer.

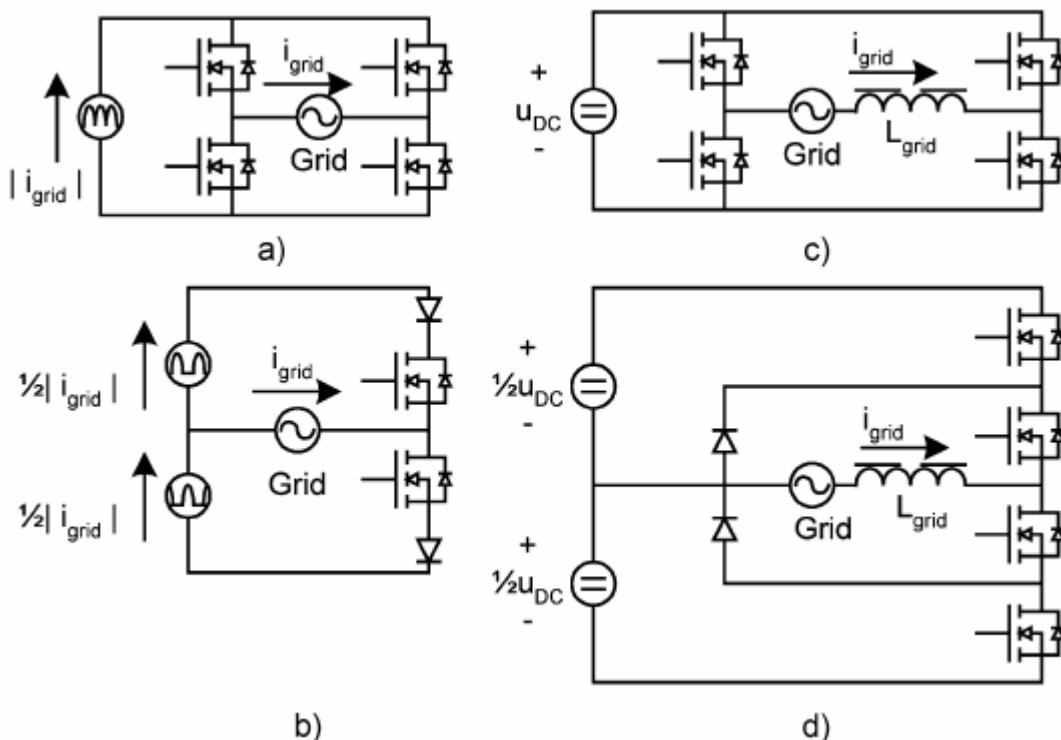
### 5.4 Tipe dari Interface Grid

Hanya inverter yang beroperasi dalam *current-source mode* yang dimasukkan dalam klasifikasi karena salahsatu tujuan inverter PV adalah menginjeksikan arus sinusoidal ke dalam grid.

Gambar 7 memperlihatkan 4 jenis dari sekian banyak jenis *possible grid-connected inverter*. Topologi gambar 7(a) dan 7(b) adalah *line frequency-commutated current source inverter (CSI)*. Arus yang mengalir ke *stage* telah dimodulasi dan dikontrol untuk mengikuti *rectified sinusoidal waveform* dan tugas dari rangkaian adalah membentuk ulang gelombang sinus dan menginjeksikannya ke dalam grid. Rangkaian menerapkan *zero-voltage switching (ZVS)* dan *zero-current switching (ZCS)* sehingga hanya *loss conduction* dari semikonduktor yang tersisa.

Gambar 7(c) adalah sebuah standard full-bridge three level VSI yang dapat membuat sebuah arus grid sinusoidal dengan menggunakan *positive/negative dc-link* atau tegangan nol, ke grid plus grid inductor

Gambar 7(d) adalah *half-bridge diode clamped three level VSI*, satu dari sekian banyak VSI, yang dapat membuat 3,5,7,...*distinct voltage* melalui grid dan induktor. Keuntungannya adalah *switching frequency* dari setiap transistor dapat direduksi dan *power quality* dapat dijaga.



Gambar 8. Grid connected inverter stage (a),(b) Line commutated CSI switching at twice the line frequency (c),(d) Self-commutated voltage source inverter (VSI) switching with high frequency in PWM or bang-bang mode

## 6 KESIMPULAN

Paper ini membahas mengenai power electronic interface pada modul photovoltaic yang terhubung dengan grid. Desain inverter PV diharapkan masih terus berkembang seiring kebutuhan untuk mendapatkan performansi terbaik. Klasifikasi topologi inverter pada paper ini didasarkan atas *number of power processing stages, power decoupling, transformer and types of interconnection*, dan *types of grid interfac*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Carpinelli, G., Celli, G., Mocci, S., Pilo, F., Proto, D., dan Russo, A., "Multiobjective Programming for The Optimal Sizing and Siting of Power-Electronic Interfaced Dispersed Generators", *Proceeding of PowerTech*, 2007
- [2] Carrasco, J.M., Bialasiewicz, J.T., Guisado, R.C.P., and Leon, J.I., "Power-Electronic Systems for The Grid Integration of Renewable Energy Source : A Survey", *IEEE Transactions on Industrial Electronic*, Vol.53, No.4, 2006
- [2] Esmaili, G., "Application of Advanced Power Electronics in Renewable Energy Sources and Hybrid Generating Systems", *Dissertation of The Ohio State University*, 2006
- [3] Kjaer, S.B., Pederson, J.K., and Blaabjerg, F., " A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.41, No.5, 2005
- [4] Medina, A., Hernandez J.C., and Jurado, F., "Optimal Placement and Sizing Procedure for PV Systems on Radial Distribution Systems", *Proceeding of 2006 International Conference on Power System Technology*, 2006
- [5] Rashid, M.H., "Power Electronic, Circuits, Devices, and Application, 2<sup>nd</sup>ed, Prentice –Hall International, Inc, 1991