

BAB II

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA

2.1. Sel Surya

Sel surya atau sel fotovoltaik berasal dari bahasa inggris “photovoltaic”. Kata photovoltaic berasal dari dua kata “photo” berasal dari kata yunani yakni “phos” yang berarti cahaya; dan kata “volt” adalah nama satuan pengukur arus listrik yang diambil dari nama penemu Alessandro Volta(1745-1827), sebagai pionir dalam mempelajari teknologi kelistrikan. Jadi secara harifiah “photovoltaic” mempunyai arti Cahaya Listrik, dan itu yang dilakukan sel surya yaitu merubah energi cahaya menjadi listrik, penemuannya Edmond Becquerel dan kawan – kawan pada abad ke 18.

2.1.1. Photon

Photon merupakan partikel dari cahaya yang mengakibatkan radiasi elektromagnetik. Photon identik dengan panjang gelombang (λ) yang menentukan spektrum dari gelombang elektromagnetik, diantaranya sinar gamma, sinar-X, cahaya ultraviolet, cahaya tampak, inframerah, *microwaves*, dan gelombang radio. Partikel photon tidak memiliki massa seperti elektron, sehingga dapat merambat dengan kecepatan cahaya termasuk dalam ruang hampa. Photon juga memiliki karakteristik seperti gelombang, seperti dapat dipantulkan oleh lensa, dan dapat saling menghilangkan apabila terjadi interferensi gelombang akibat pemantulan. Sebagai partikel, energi photon dapat dinyatakan dengan persamaan matematis yang menunjukkan transfer energi dari sebuah partikel.

$$E_p = h \cdot \nu \quad (2.1)$$

$$\text{atau} \quad E_p = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.2)$$

dengan h : Konstanta Plank ($6,62 \times 10^{-34}$ J.s)

ν : Frekuensi (Hz)

c : Kecepatan cahaya (3×10^8 m/s)

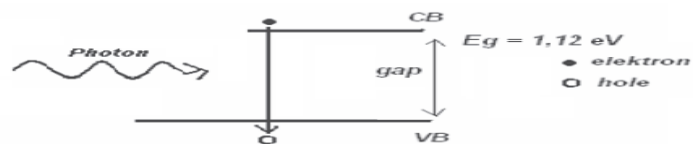
λ : Panjang gelombang (m)

Sebuah photon yang memiliki energi mampu mengeksitasi sebuah molekul seperti elektron pada *photoreceptor cell*, atau dengan efek *photovoltaic*, photon mampu mengeksitasi elektron menjadi elektron bebas yang dapat menghasilkan arus listrik. Dalam *solar cell*, efek *photovoltaic* merupakan dasar dari terbentuknya pasangan elektron - *hole* (*e-h pairs*) yang tentunya melibatkan photon. Ditinjau dari quantum mekanik bahwa energi yang dimiliki photon, seperti momentum dan polarisasi tidak memiliki nilai yang tetap, sehingga tidak bisa memastikan molekul mana yang akan dieksitasi oleh photon. Dalam eksperimen lebih lanjut, Einstein membuktikan bahwa cahaya itu sendiri adalah partikel yang terkumpul (*quantized*), dan photon adalah bagian partikel yang dikumpulkan tersebut

2.1.2. Proses Absorpsi Elektron

Terjadinya eksitasi elektron dari pita valensi (*valence band*) ke pita konduksi (*conduction band*) tidak terlepas dari energi yang cukup diterima elektron untuk bergerak menuju *conduction band*. Energi yang diterima elektron agar dapat tereksitasi bisa berasal dari pengaruh medan listrik yang diberikan dari luar atau berasal dari photon yang datang dengan besar energi tertentu. Eksitasi elektron yang melibatkan photon biasa dijumpai

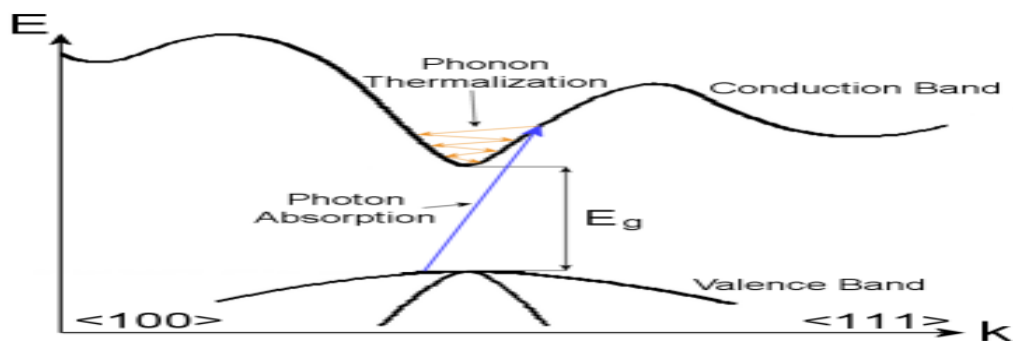
pada efek *photovoltaic* yang juga merupakan dasar fenomena dari *solar cell*. Dalam *solar cell*, photon yang datang akan mengeksitasi elektron pada *p-n junction*, kemudian menyebabkan timbulnya pasangan elektron -hole (e-h pairs). Untuk dapat mengeksitasi elektron, maka energi photon yang diserap harus lebih besar dari energi gap yang dimiliki oleh material tersebut. Misalkan pada bahan semikonduktor, silikon (Si) memiliki energi *gap* sebesar 1,12 eV, germanium (Ge) sebesar 0,62 eV, dll. Gambar 2.1 menunjukkan elektron tereksitasi dari VB ke CB pada bahan silikon (Si) akibat adanya photon yang datang.



Gambar 2.1 Proses Absorpsi electron pada bahan silikon

Elektron menerima energi dari photon yang datang, dan besar energi photon setidaknya lebih besar dari energi *gap* (E_g) pada bahan silikon tersebut, yaitu sebesar 1,12 eV. Elektron yang tereksitasi tersebut menjadi elektron bebas (generation), meninggalkan hole pada pita valensi. Oleh karena itu pada bahan semikonduktor ekstrinsik, energi photon yang diserap mampu menghasilkan banyak elektron bebas sehingga dapat dihasilkan arus listrik. Dalam proses ekesitasi elektron yang melibatkan photon, dihasilkan juga panas (heat) yang timbul. Panas ini timbul karena pergerakan elektron pada pita konduksi setelah tereksitasi menuju tingkat energi terendah dari pita konduksi yang kemudian akan kembali berekombinasi pada pita valensi. Munculnya panas biasa dijumpai pada jenis material indirect band-gap, misalnya silikon (Si) seperti ditunjukkan

pada Gambar 2.2. Dalam silikon solar cell, fenomena munculnya panas tersebut disebut *thermalization loss* yang memiliki kerugian bagi kinerja solar cell. *Thermalization loss* disebabkan oleh energi photon yang diserap jauh lebih besar dari energi gap pada silikon solar cell. Energi panas tersebut ditandai dengan adanya phonon.



Gambar 2.2 Tingkat energi kristal indirect band gap

Tingkat energi maksimum pada pita valensi berada pada kristal momentum adalah saat $k = 0$, akan tetapi pada *indirect band gap*, energi minimum pada pita konduksi tidak berada saat k tidak nol. Inilah yang menimbulkan phonon akibat pergerakan elektron dari pita valensi ke pita konduksi membutuhkan transisi elektron ke titik minimum pada pita konduksi. Jika perpindahan elektron ke titik minimum pada pita konduksi ditandai dengan vektor k_0 , dan energi yang dibutuhkan elektron untuk berpindah adalah ε' , maka hubungan energi photon dengan transisi elektron tersebut adalah :

$$h\nu = \varepsilon_c - \varepsilon_v \pm \varepsilon \cdot k_0$$

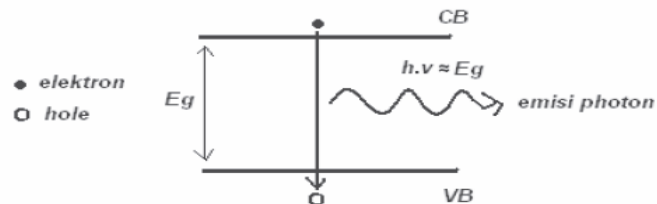
dimana ε_c adalah energi minimum pada pita konduksi, dan ε_v adalah energi maksimal pada pita valensi. Dalam implementasinya, banyaknya cahaya yang dapat diserap oleh *solar cell* dipengaruhi oleh intensitasnya. Dalam

hal ini photon *flux* menentukan banyaknya cahaya yang dapat diserap untuk panjang gelombang tertentu. Photon *flux* dapat dinyatakan dengan jumlah photon dibanding terhadap unit area. Selanjutnya dari referensi [3], dijelaskan secara matematis bahwa intensitas cahaya monokromatis ditentukan juga oleh koefisien absorpsi (α). Parameter ini sangat penting dalam merancang sebuah *solar cell* karena menentukan seberapa jauh kedalaman dari permukaan *solar cell* yang dapat ditembus oleh cahaya pada panjang gelombang tertentu.

2.1.3. Proses Spontaneous Emission

Spontaneous emission adalah fenomena munculnya emisi photon saat elektron berekombinasi dari pita konduksi ke pita valensi. Jika proses absorpsi, elektron menerima energi agar dapat tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi, maka pada *spontaneous emission*, elektron melepas energi minimal sebesar energi *gap*, kemudian energi yang dilepaskan tersebut mengemisikan photon dengan besar yang sama dengan energi *gap*. Besarnya energi *gap* mempengaruhi panjang gelombang dari photon yang diemisikan, dalam aplikasi laser semikonduktor, biasanya jenis material yang digunakan adalah *direct band gap* dengan energi *gap* yang sudah ditentukan untuk menghasilkan spektrum cahaya yang diinginkan. Dalam penulisan ini, konsep *up/down-conversion* diilhami dari fenomena tersebut untuk mengkonversi energi photon yang diterima dari cahaya matahari dengan memaksimalkan panjang gelombang yang sesuai dengan karakteristik *solar cell*. Dalam divais *converter* terdapat *sub-band gap* atau *intermediate level* (IL) dalam *band gap*, sehingga emisi photon yang

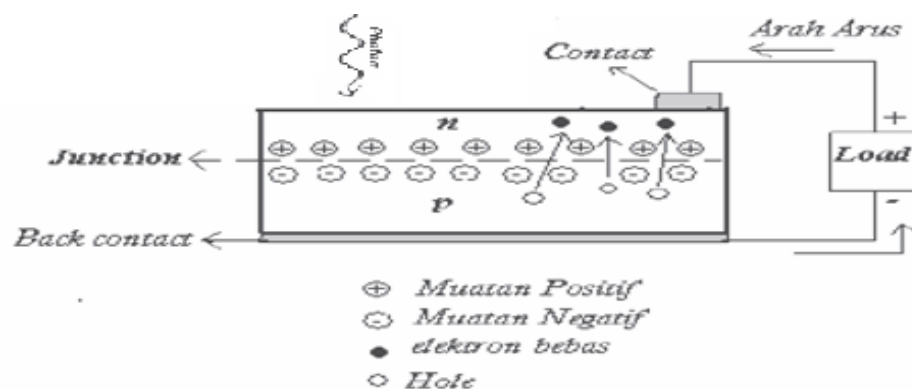
dihasilkan dapat disesuaikan besarnya terhadap tingkat energi IL tersebut. Pada akhirnya spektrum cahaya dan panjang gelombang photon dapat disesuaikan. Gambar 2.3 menunjukkan proses spontaneous emission yang menghasilkan photon dengan energi sama dengan energi gap (E_g).



Gambar 2.3 Rekombinasi electron melibatkan emisi photon dengan energi sebesar E_g

2.1.4. Efek Photovoltaic

Photovoltaic adalah sebuah divais yang mampu menghasilkan listrik dari cahaya matahari. Dalam hal ini divais yang dimaksud adalah *solar cell*. Sedangkan efek *photovoltaic* yaitu proses bagaimana dihasilkannya listrik oleh *solar cell* setelah menyerap cahaya matahari yang terdapat photon didalamnya yang mampu mengeksitasi elektron. Photon yang diserap menghasilkan elektron bebas pada divais *solar cell*, dengan begitu timbul arus listrik. Proses terjadinya elektron bebas pada *solar cell* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Efek Photovoltaic yang terjadi pada solar cell

Pada dasarnya Gambar 2.4 menjelaskan proses sederhana terbentuknya elektron bebas dalam solar cell yang dapat menimbulkan arus listrik. Elektron - elektron bebas yang dihasilkan akan terkumpul pada contact di atas permukaan solar cell. Elektron - elektron tersebut membentuk pasangan elektron hole (e-h pairs) sesaat setelah terbentuknya elektron bebas. Biasanya contact ini terbuat dari bahan metal atau aluminium (Al). Kemudian jika solar cell terhubung dengan beban, maka arus listrik akan timbul dan mengalir berlawanan dari arah elektron bebas tersebut. Elektron yang bergerak tadi akan kembali menuju solar cell melalui back contact yang diletakan dibagian bawah solar cell. Fungsinya sebagai penghubung agar elektron dapat berekombinasi kembali dan nantinya akan tereksitasi lagi jika menyerap photon dari cahaya matahari, sehingga terbentuk jaringan arus listrik.

2.2. Rumah Dengan Sistem Daya Listrik Surya

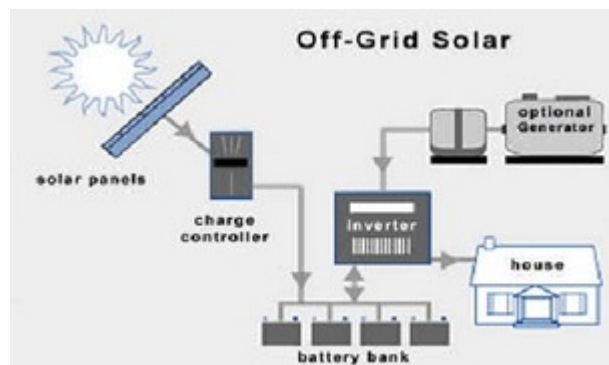
2.2.1. Pengertian

Rumah dengan sistem daya listrik surya adalah aplikasi dari pembangkit listrik tenaga surya dengan konsep yang sederhana dan skala kecil. Aplikasinya pun telah banyak digunakan pada perumahan-perumahan serta gedung-gedung komersial. Umumnya aplikasi rumah dengan sistem daya listrik surya ini pada kawasan yang tidak dijangkau oleh PLN, namun pada saat ini aplikasinya telah berkembang luas karena sistem ini memberi banyak keuntungan bagi penggunanya. Rumah dengan sistem daya listrik surya itu sendiri umumnya terbagi menjadi sistem

mandiri atau bisa juga sistem rumah surya yang tidak terhubung jaringan listrik PLN dan rumah dengan sistem daya listrik surya yang terhubung jaringan listrik PLN atau *grid connected system*

2.2.2. Rumah Dengan Sistem Daya Listrik Surya yang Mandiri.

Pada sistem ini listrik DC yang dihasilkan PV biasa disimpan ke baterai, untuk menghidupkan beban – beban DC atau diubah ke tegangan AC menggunakan inverter untuk menghidupkan beban AC yang telah dihubungkan dengan sistem rumah surya ini tentunya. Karena rumah dengan sistem daya listrik surya yang mandiri ini tidak dapat terhubung dengan jaringan listrik PLN, maka sebuah rumah atau gedung yang menerapkan sistem ini harus membuat dua instalasi listrik untuk menghidupkan beban-bebannya. Sistem instalasi yang satu disuplai oleh sumber utama PLN dan sistem instalasi listrik lainnya disuplai oleh inverter tadi.



Gambar 2.5 Rumah dengan sistem daya listrik surya yang mandiri

Rumah dengan sistem daya listrik surya yang mandiri ini umumnya membutuhkan penyimpanan daya seperti baterai karena ada

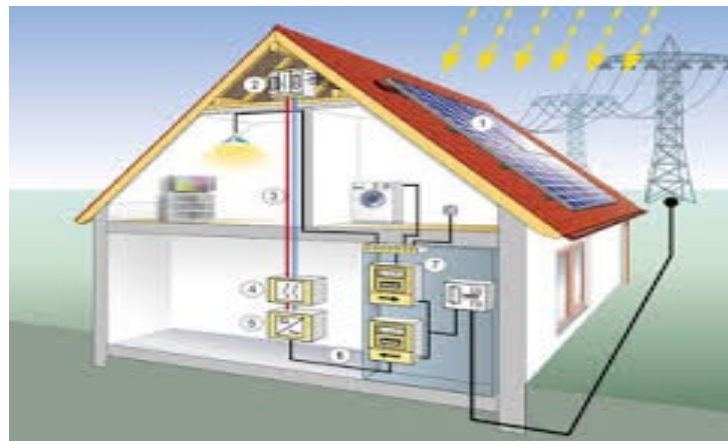
saat dimana kita tidak membutuhkan energi PV tersebut namun pada saat yang bersamaan PV sedang menghasilkan listrik. Contohnya pada aplikasi lampu penerangan jalan. PV menghasilkan listrik pada pagi hari, sedangkan lampu baru digunakan pada malam hari. Untuk itulah diperlukan baterai regulator baterai atau charge regulator untuk menjaga agar umur baterai agar tetap lama.

Pada gambar 2.1 menjelaskan konfigurasi rumah dengan sistem daya listrik surya yang mandiri dimana disaat terdapat komponen penting pada sistem ini yaitu :

1. Modul photovoltaic yang biasa dipasang seri atau paralel.
2. Baterai regulator
3. Baterai
4. Beban DC
5. Inverter (jika digunakan untuk menyuplai beban AC)

2.2.3. Rumah Denga Sistem Daya Listrik Surya Yang Terhubung Dengan Jaringan Listrik PLN

Rumah dengan sistem daya listrik surya yang terhubung jaringan listrik PLN merupakan sistem yang akan dirancang pada tugas akhir ini. Sistem ini telah banyak diaplikasikan baik pada sistem PV yang terdapat pada pembangkit tenaga surya skala besar sampai aplikasi pada atap rumah. Sebuah grid connected PLTS atap umumnya terdiri dari komponen – kompnen penting seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini.

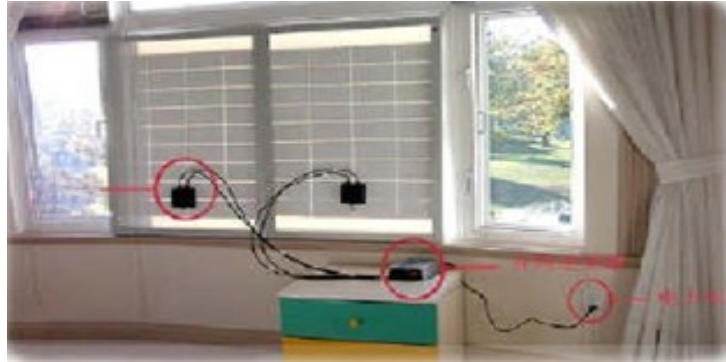


Gambar 2.6 Rumah dengan sistem daya listrik surya yang terhubung dengan jaringan listrik PLN

1. Modul photovoltaic
2. Konektor modul PV
3. Kabel Penghantar DC
4. Saklar Pemutus pada penghantar DC
5. Inverter Grid Tie
6. Kabel Penghantar AC
7. KWH meter dua arah.

Pada konfigurasi rumah dengan sistem daya listrik surya yang terhubung jaringan listrik PLN diatas dapat dilihat output dari inverter yang mengubah listrik DC ke AC langsung dihubungkan (menyatu) dengan sistem instalasi listrik rumah tersebut karena output inverter telah tersinkronisasi dengan daya dari sumber utama atau PLN. Selain itu pada sistem diatas juga diperlukan KWH meter dua arah untuk menggantikan KWH meter konvensional karena KWH meter dua arah ini mampu membaca listrik dari dua arah, listrik yang mengalir dari utilitas dan

mengalir ke utilitas. Selain konfigurasi diatas, rumah dengan sistem daya listrik surya yang terhubung jaringan listrik PLN ini juga dapat diterapkan dengan instalasi yang lebih simple seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2.7 Instalasi sederhana dari sistem PV grid connected

Rumah dengan sistem daya listrik surya terhubung dengan pln ini memungkinkan listrik yang dihasilkan PV digunakan untuk menghidupkan beban AC serta mampu untuk mengirim (mengeksport) daya lebih ke utilitas atau PLN. Jadi Tujuan dibuat PLTS atap terhubung PLN ini adalah :

1. Listrik yang dihasilkan photovoltaic array dapat langsung digunakan oleh load atau beban peralatan listrik rumah tangga.
2. Ketika daya listrik yang dikonsumsi beban tersebut lebih kecil dibandingkan daya yang dihasilkan PV maka daya lebih tersebut dapat dialirkan (dieksport) ke utilitas atau PLN.

Satu hal yang penting ialah, pada rumah dengan sistem daya listrik surya yang terhubung jaringan listrik PLN ini apabila terjadi pemadaman pada sumber utama PLN, maka sistem inipun harus padam walaupun pada

saat yang sama PV sedang menghasilkan listrik dan hal ini disebut *anti islanding*.

2.2.4. Rumah Dengan Sistem Daya Listrik Surya Yang Terhubung Jaringan Listrik PLN Dengan Cadangan Baterai.

Rumah dengan sistem daya listrik surya yang terhubung jaringan listrik PLN dengan cadangan baterai ini merupakan penggabungan dari kedua sistem yang telah dijelaskan tadi. Dengan sistem ini memungkinkan listrik yang dihasilkan PV digunakan untuk mengisi baterai sebagai energi cadangan, untuk menghidupkan beban AC tanpa harus memiliki instalasi double pada sistem.

2.3. Modul Surya

Untuk mendapatkan daya, tegangan listrik yang diinginkan, sel surya dihubungkan secara seri dan parallel kemudian dilaminasi dan diberi frame dan disebut menjadi modul surya. Umumnya modul surya mempunyai sistem tegangan kerja 12 volt dan 24 volt, serta mempunyai daya yang bervariasi mulai dari 10 Wp sampai dengan 300 Wp.



Gambar 2.8 Modul Surya

2.3.1. Karakteristik Modul Surya.

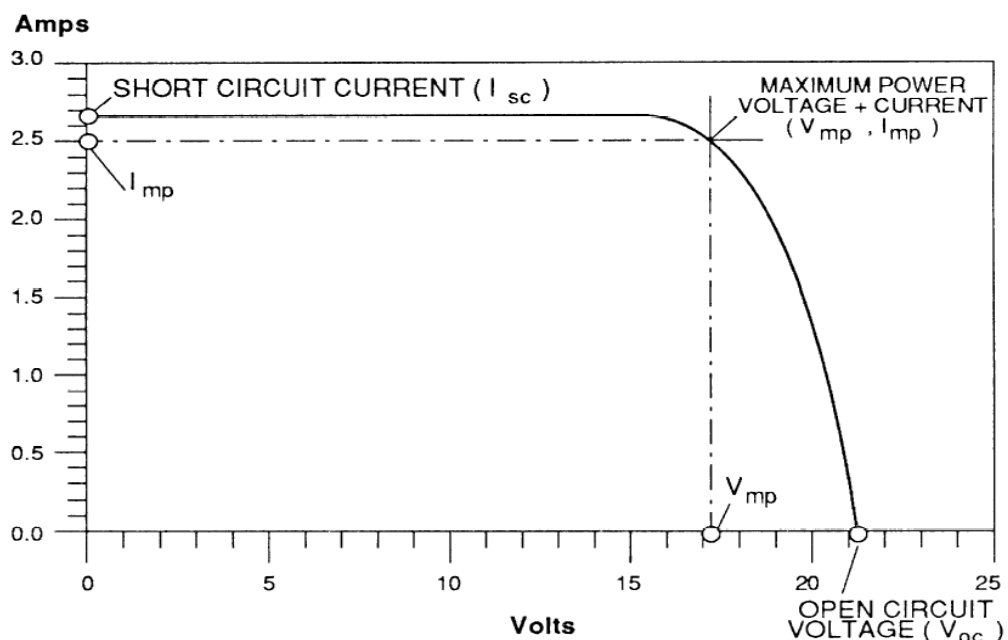
Kinerja modul surya digambarkan dengan karakteristik *Kurva I-V*, atau kurva Arus Listrik (I) terhadap Tegangan (V) seperti terlihat pada gambar 2.5. Modul surya akan menghasilkan arus listrik maksimum apabila tidak ada komponen Tahanan (R) pada rangkaian, dengan kata lain kita akan menghubungkan-singkatkan kutub positif dan kutub negatif. Arus maksimum biasa disebut sebagai Arus Hubung Singkat (I_{sc}) dimana terjadi pada saat Tegangan Modul Surya sama dengan nol ($V = 0$).

Sebaliknya tegangan maksimum dihasilkan pada saat rangkaian tidak terhubung. Tegangan ini disebut sebagai Tegangan Terbuka (V_{oc}), pada kondisi ini tahanan (R) sangatlah besar dan tidak ada sama sekali arus yang mengalir karena rangkaian listrik tidak terhubung atau dengan kondisi terbuka. Dari kedua kondisi tahanan beban yang ekstrim, dan kondisi diantaranya digambarkan seperti pada gambar Kurva I-V, arus Listrik (I) ditunjukkan dengan sumbu Y dengan satuan Ampere, sedangkan Tegangan (V) ditunjukkan sebagai sumbu X dengan satuan Volt.

Seperti terlihat pada gambar **arus** hubung singkat (I_{sc}) terjadi pada saat tegangan sama dengan nol, dan tegangan terbuka (V_{oc}) terjadi pada saat **arus** listrik sama dengan nol. Besaran daya listrik dari modul surya terletak pada semua titik sepanjang kurva dengan satuan Watt. Watt didapatkan dengan cara mengalikan tegangan dan arus listrik (**Watt = Volt x Ampere**). Pada titik I_{sc} daya yang dihasilkan adalah nol dikarenakan tegangannya sama dengan nol. Demikian pula pada titik V_{oc} daya listrik sama dengan nol

dikarenakan arus listrik sama dengan nol. Daya maksimum yang dihasilkan terjadi pada “lutut” kurva.

Pada gambar dibawah terlihat bahwa daya maksimum terjadi pada saat tegangan mencapai 17 Volt dan arus listrik 2,5 Ampere, Oleh karena itu daya maksimum yang dihasilkan adalah 17 volt dikalikan dengan 2,5 Ampere adalah 42,5 Watt. Daya maksimum umumnya disebut dengan daya puncak dengan notasi mp, jadi arus listrik pada posisi maksimum dituliskan sebagai I_{mp} dan tegangan sebagai V_{mp} .

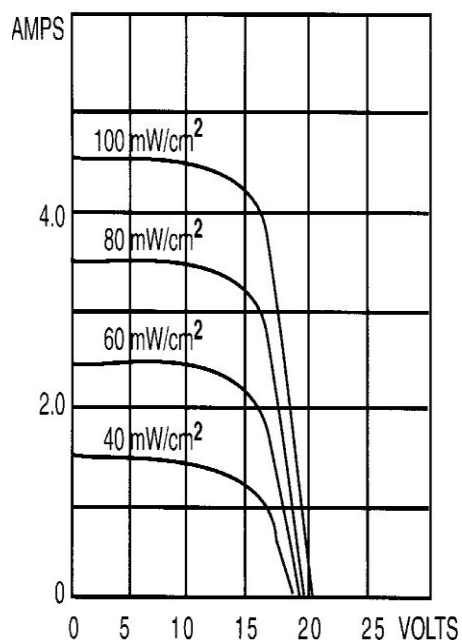


Gambar 2.9 Kurva Arus-tegangan Modul surya

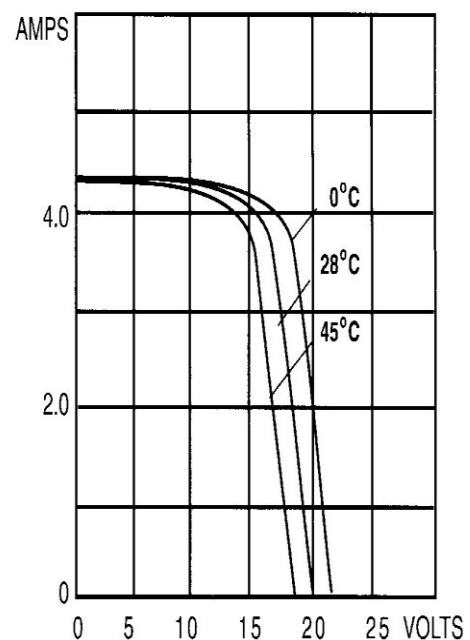
Sumber: PV design assistance center Sandia National laboratory 1991

Kurva arus-tegangan setiap produk modul surya haruslah dibuat pada kondisi standard intensitas cahaya matahari dan temperature modul surya, dikarenakan keluaran daya dari modul surya ini sangatlah

tergantung kepada intensitas cahaya matahari dan temperatur modul surya tersebut. Pengaruh intensitas cahaya matahari terhadap keluaran daya modul surya semakin besar, intensitas cahaya matahari yang jatuh dipermukaan modul surya akan semakin besar arus listrik yang dihasilkan, dengan kata lain intensitas cahaya matahari berbanding lurus dengan keluaran arus listrik. (lihat gambar 2.6a), sedangkan temperature modul surya akan berbanding terbalik dengan keluaran tegangan yang dihasilkan, jadi semakin besar temperature modul surya, tegangannya akan semakin menurun (lihat gambar 2.6b). Standar Kurva I-V suatu modul surya dibuat pada kondisi Intensitas Cahaya 1000 W/m^2 dan Temperature Modul Surya 25°C .



(a)

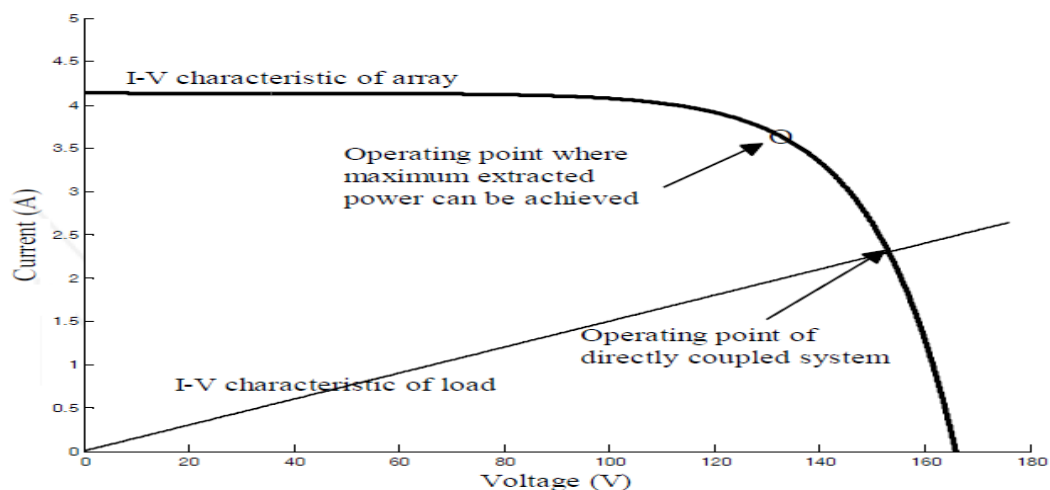


(b)

Gambar 2.10 (a) Pengaruh intensitas cahaya terhadap keluaran arus (b)

Pengaruh temperature modul surya terhadap keluaran tegangan.

Selain karakteristik V-I yang dimiliki, PV juga memiliki karakteristik unik dimana ketika PV dihubungkan langsung ke beban, titik operasi dari sistem akan jatuh pada titik perpotongan antara kurva karakteristik V-I pada PV dan kurva karakteristik pada beban seperti yang terlihat pada gambar 2.7. Umumnya titik ini bukanlah titik daya maksimum atau maximum power point (MPP) dari yang dapat dihasilkan PV. Akhirnya untuk memecahkan masalah ini diperlukan kapasitas PV array yang lebih besar agar dapat memenuhi kebutuhan daya beban yang berujung dana yang akan dikeluarkan akan besar.



Gambar 2.11 Titik operasi dari pv yang terhubung beban

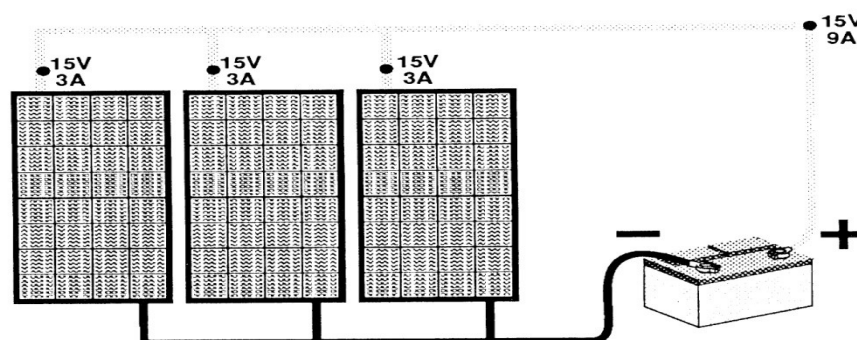
Oleh sebab itu MPPT diperlukan dalam sistem PV untuk mengatasi karakteristik PV tersebut. Dengan menggunakan algoritma tertentu, serta mekanisme tertentu tegangan ataupun arus dari PV dimanipulasi sehingga mendekati atau sama dengan arus dan tegangan maksimum yang dapat dicapai PV untuk dapat menghasilkan titik daya maksimum.

2.3.2. Array atau Rangkaian Modul Surya

Sistem – sistem photovoltaic atau lebih dikenal dengan sistem pembangkit listrik Tenaga surya (PLTS) dibuat berdasarkan kebutuhan catu daya dan sistem tegangan yang diinginkan oleh beban. Untuk membuat rangkaian modul surya dilakukan dengan cara menghubungkan modul surya secara seri dan parallel.

2.3.2.1. Hubungan Modul Surya secara Parallel

Untuk mendapatkan arus listrik yang lebih besar daripada keluaran arus listrik dari setiap modul surya, maka modul surya dihubungkan secara parallel, dengan cara menghubungkan kutub – kutub yang sama (kutub negatif saling dihubungkan dan kutub positif saling dihubungkan). Apabila masing – masing modul surya mempunyai tegangan kerja 15 Volt dan menghasilkan arus listrik sebesar masing – masing 3 Ampere, kemudian ketiganya dihubungkan secara parallel maka akan didapatkan arus listrik total sebesar 9 amper sedangkan tegangan total akan sama dengan tegangan masing – masing modul surya yaitu 15 Volt.

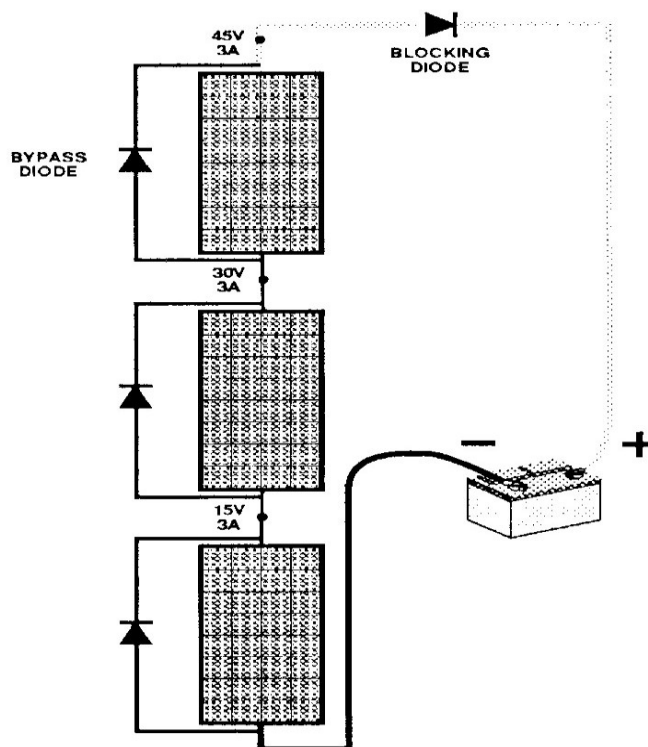


Gambar 2.12 Tiga buah modul surya dihubungkan secara parallel

2.3.2.2. Hubungan Modul Surya secara seri

Untuk Mendapatkan tegangan yang diinginkan modul surya dihubungkan secara seri yaitu dengan cara menghubungkan kutub positif dan kutub negative seperti terlihat pada gambar 2.9 di bawah ini.

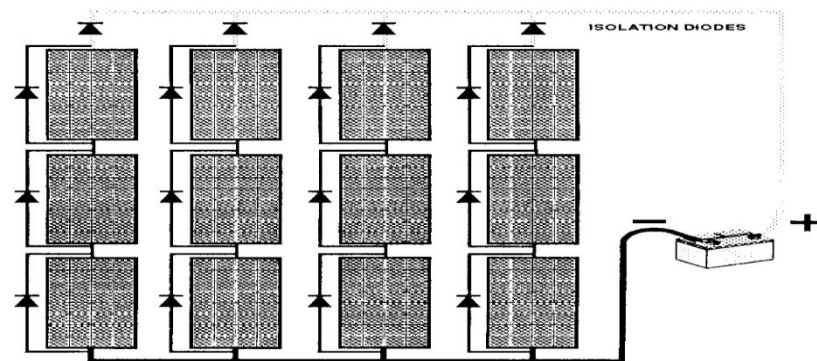
Tegangan total yang didapatkan dengan cara menghubungkan seri tiga buah modul masing – masing mempunyai tegangan 5 volt adalah merupakan jumlah yaitu 15 Volt, tetapi arus listrik total yang dihasilkan adalah sama dengan masing arus setiap modul yaitu 3 Ampere.



Gambar 2.13 Tiga buah modul dihubungkan secara seri

2.3.2.3. Hubungan Modul Surya Secara Seri dan Paralel.

Untuk Mencatu daya sistem – sistem PLTS yang diinginkan, maka perlu untuk menggabungkan sejumlah modul surya secara seri maupun parallel seperti terlihat pada gambar 2.10. Pada gambar terlihat bahwa array atau rangkaian modul surya untuk mencatu daya sistem terdiri dari 3 buah modul surya yang dihubungkan secara seri dan 4 buah modul surya yang dihubungkan secara parallel. Tegangan kerja sistem tersebut adalah 15 Volt dan arus listrik yang dibutuhkan adalah sebesar 12 Ampere.



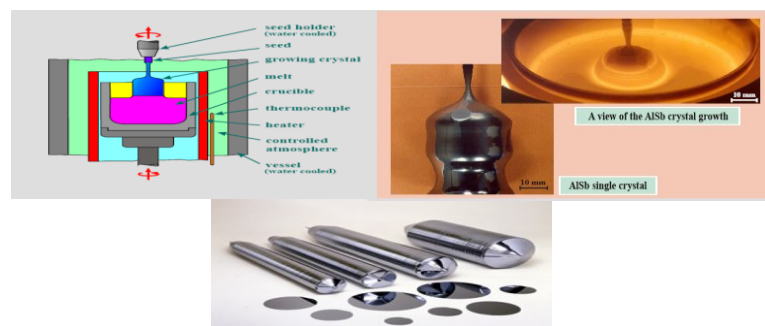
Gambar 2.14 Array atau rangkaian Modul surya.

2.4. Jenis – jenis Sel Surya

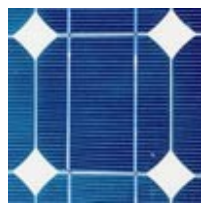
Bermacam – macam teknologi telah diteliti oleh para ahli di dunia untuk merancang dan membuat sel photovoltaic yang lebih baik, murah dan efisien diantaranya adalah :

2.4.1. Generasi Pertama Kristal (Single Kristal)

Konfigurasi normal untuk Sel Fotovoltaik terdiri p-n *Junction* Mono Kristal Silikon material mempunyai kemurnian yang tinggi yaitu 99,999%. Ditumbuhkan dengan sistem yang paling terkenal Metode Czochralski dapat dilihat di gambar.9, hasil berbentuk silinder dengan panjang 12 cm, diameter tertentu 2 – 5 inch, alat pemotong yang terbaru adalah gergaji yang mampu memotong dua sisi sekaligus dengan kapasitas 4000 wafer per-jam.



Gambar 2.15 Metoda Penumbuhan Kristal Mono Czochralski dan produk ingot



(a)



(b)

Gambar 2.16 (a). Sel surya Single Kristal, (b). Modul surya Single Kristal

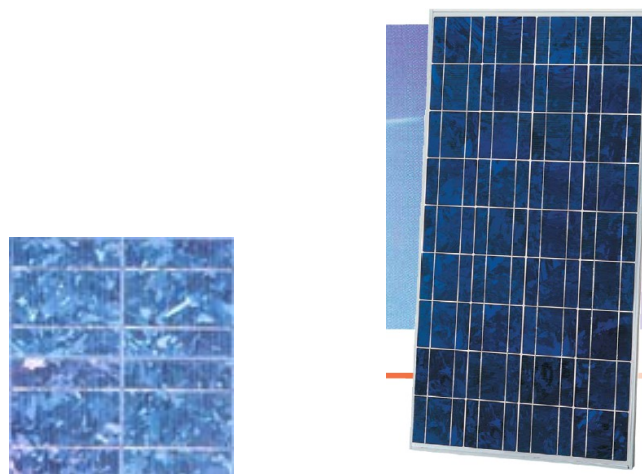
Efisiensi sel surya jenis Single Kristal Silikon mempunyai efisiensi konversi yang cukup tinggi yaitu sekitar 16 % sampai dengan 17 %

2.4.2. Generasi Kedua kristal (Polikristal)

Material – material mono kristal harga per kilogram masih mahal, untuk menurunkan harga material, dikembangkan material lain yang disebut Polikristal. Pembuatan wafer dengan material ini menggunakan metode Casting (gambar 2.13), kemudian dipotong dengan ukuran 40 x 40 cm². Efisiensi modul fotovoltaik polikristal yang komersial mencapai 12 % s/d 14 %.



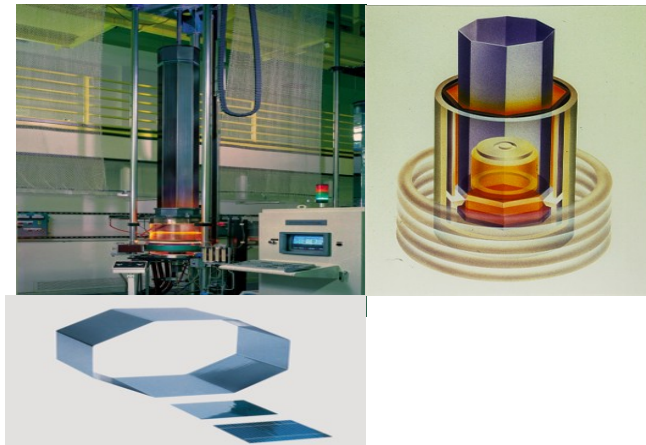
Gambar 2.17. Metoda Casting pembuatan bahan polikristal.



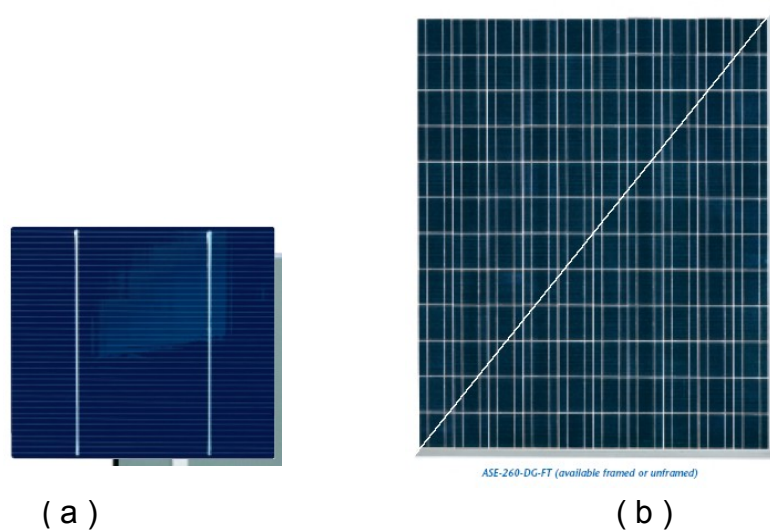
Gambar 2.18 (a). Sel Polikristal, (b) Modul surya polikristal

2.4.3. Generasi ketiga, EFG the Edge Defined Film Growth Ribbon

Proses ini menumbuhkan wafer Mono Kristal seperti pita langsung dari cairan silikon dengan menggunakan pita kapiler, dapat menghasilkan dengan lebar 5 – 10 cm. Pada proses ini penumbuhan terjadi 5 m/menit dengan ketebalan 250 – 350 mikrometer, dengan efisiensi 13%.



Gambar 2.19 Proses Pembuatan EFG the Edge Defined Film Growth Ribbon



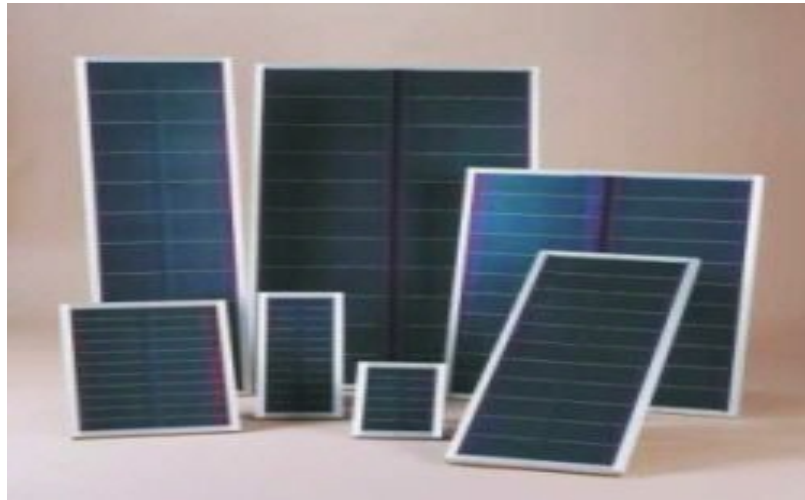
(a)

(b)

Gambar 2.20 (a). Sel Surya Jenis Polikristal dengan metode EFG, (b). Modul

2.4.4. Generasi ke Empat (Thin Film)

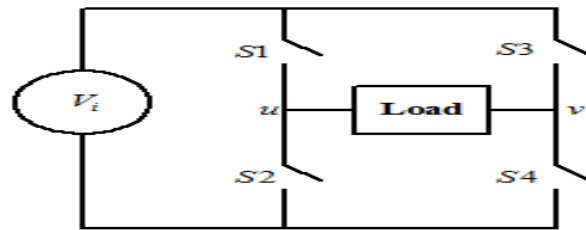
Generasi Ke- empat lapisan tipis atau thin film, mempunyai ketebalan sekitar 10 mm di atas substrat kaca/steel (baja) atau disebut advanced sel fotovoltaik. Tipe yang paling maju saat ini adalah Amorphous Silicon dengan Heterojunction dengan stack atau tandem sel. Efisiensi Sel Amorphous Silicon berkisar 6% sampai dengan 9%.



Gambar 2.21 Amorphous Silicon dengan Heterojunction dengan stack atau tandem Sel

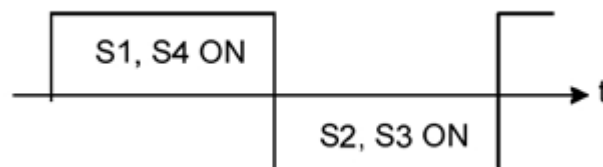
2.5. Inverter dan Prinsip Kerjanya

Inverter merupakan alat yang digunakan untuk mengubah arus searah menjadi arus bolak balik. Sumber tegangan inverter dapat berupa baterai, solar cell, turbin angin dan sumber tegangan DC lainnya dengan tegangan output 120 V atau 220 V, dan frekuensi output 50 Hz atau 60 Hz. Pada dasarnya inverter merupakan sebuah alat yang membuat tegangan bolak balik dari tegangan searah dengan cara pembentukan gelombang tegangan. Namun gelombang tegangan yang terbentuk dari inverter tidak berbentuk sinusoidal melainkan berbentuk gelombang tegangan persegi. Pembentukan tegangan AC tersebut dilakukan dengan menggunakan dua pasang saklar. Berikut ini merupakan gambar yang akan menerangkan prinsip kerja inverter dalam pembentukan gelombang tegangan persegi.



Gambar 2.22 Prinsip Kerja inverter 1 phasa

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa untuk menghasilkan arus bolak balik maka kerja saklar S_1 sampai S_4 yang disuplai oleh tegangan dc harus bergantian. Lalu bagaimanakah gelombang tegangan tersebut dapat terbentuk dari keempat buah saklar tersebut? Ketika saklar S_1 dan S_4 hidup maka arus akan mengalir dari titik U ke titik V sehingga terbentuklah tegangan positif. Setelah itu gantian saklar S_2 dan S_3 yang hidup dan saklar S_1 dan S_4 off sehingga arus akan mengalir dari titik V ke titik U sehingga terbentuklah negatif. Pembentukan gelombang hasil ON – OFF keempat saklar tersebut dapat dilihat dari gambar berikut :



Gambar 2.23 Bentuk gelombang output inverter

Dengan mengubah arah arus yang mengalir ke beban (pada $\frac{1}{2}$ periode pertama harus mengalir dari titik U ke V dan pada $\frac{1}{2}$ periode kedua arus mengalir dari V ke U) maka akan didapatkan bentuk gelombang arus bolak balik.

2.6. Inverter Grid Tie

Inverter grid tie merupakan sebuah tipe khusus dari inverter yang mampu mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak balik (AC) dan menyalurkannya ke jaringan listrik utilitas (PLN di Indonesia). Inverter tipe ini disebut juga dengan synchronous inverter atau grid – interactive inverter. Lalu apakah yang membuat inverter ini spesial? Selain karena harganya yang tentu saja mahal inverter ini memiliki dua fitur yang handal dan penting, yakni kemampuannya dalam mencocokkan atau mensinkronisasi tegangan AC atau disebut juga “ Phase matching ” serta proteksi terhadap gangguan pada grid atau “ reaction to power outage ”.

Desain sistem inverter jenis inipun sedikit berbeda dengan inverter jenis stand alone. Tegangan Output dari inverter jenis GTI harus memenuhi beberapa persyaratan agar inverter dapat terhubung dengan jaringan listrik PLN (tersinkronisasi) dan mengirimkan daya ke jaringan listrik tersebut. Beberapa persyaratan tersebut adalah :

1. Tegangan dan phasa inveter harus sama dengan yang dimiliki jaringan listrik PLN
2. Frekuensi dari tegangan yang dihasilkan haruslah sama dengan frekuensi jaringan listrik PLN, (50 Hz untuk Indonesia).

2.6.1. Karakteristik Inverter Grid Tie

Inverter yang dikeluarkan pabrik manufacture umumnya memiliki lembar spesifikasi mengenai prduknya tersebut. Data – data yang terkandung di dalam lembar spesifikasi atau manual book tersebut

mengandung spesifikasi, fitur dan karakteristik seperti yang disebutkan dibawah ini.

- **Rated output power.** Nilai ini merupakan daya nominal yang mampu di hasilkan oleh inverter. Pada beberapa inverter daya yang dikeluarkan berbeda tergantung pada tegangan outputnya. Sebagai contoh suatu inverter dapat tegangan outputnya pada 200Vac dan 240Vac. Maka daya yang dihasilkan tiap tegangan yang diset tersebut akan berbeda.
- **Output Voltage.** Nilai ini mengindikasikan pada untuk tegangan listrik disuatu tempat inverter tersebut dapat digunakan. Sebagai contoh pada output voltage untuk Negara US adalah 120Vac sedangkan diindonesia tegangan utilitasnya adalah 220Vac.
- **Peak efficiency.** Efisiensi puncak menyatakan efisiensi tertinggi yang dapat diraih inverter. Kebanyakan inverter grid tie yang dijual dipasaran saat ini dapat menghasilkan efisiensi 94% sampai 96%. Energi yang hilang selama proses konversi tersebut kebanyakan diubah menjadi energi panas yang dihasilkan inverter, itu artinya untuk menghasilkan daya yang sesuai dengan rated output powernya maka daya inputnya haruslah lebih besar dari daya output yang diinginkan. Sebagai contoh, sebuah inverter 5000 W dapat menghasilkan daya penuh 5000 W jika diberikan input sebesar 5263 W.
- **Maximum input current.** Menyatakan jumlah maksimal arus input yang dapat diterima inverter. Jika suplai DC, seperti modul PV menghasilkan arus yang lebih besar dari maksimum arus masukan, arus tersebut tidak dapat digunakan inverter.

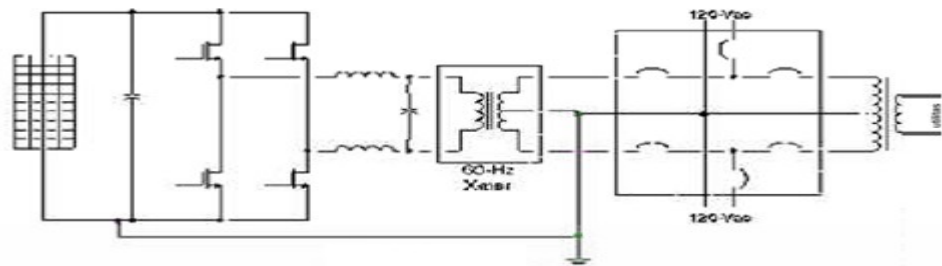
- Maximum output current. Merupakan maksimum arus AC yang akan disuplai inverter. Nilai ini dapat dijadikan acuan untuk menentukan rating arus pengaman arus lebih untuk inverter untuk men-diskonek inverter dari rangkaian. Inverter yang mampu menghasilkan tegangan output AC yang bervariasi akan memiliki maksimum arus keluaran yang berbeda beda untuk tiap tegangannya.
- Peak Power tracking voltage. Parameter ini merupakan range tegangan DC dimana maximum power point inverter akan berkerja. Hal ini cukup rumit karena tegangan karena pengaruh temperatur.
- Start voltage. Nilai ini tercantum pada semua data sheet inverter. Nilai ini menunjukkan tegangan DC input yang dibutuhkan agar inverter dapat berkerja.

2.6.2. Skematik atau Topologi Rangkaian Inverter Grid Tie

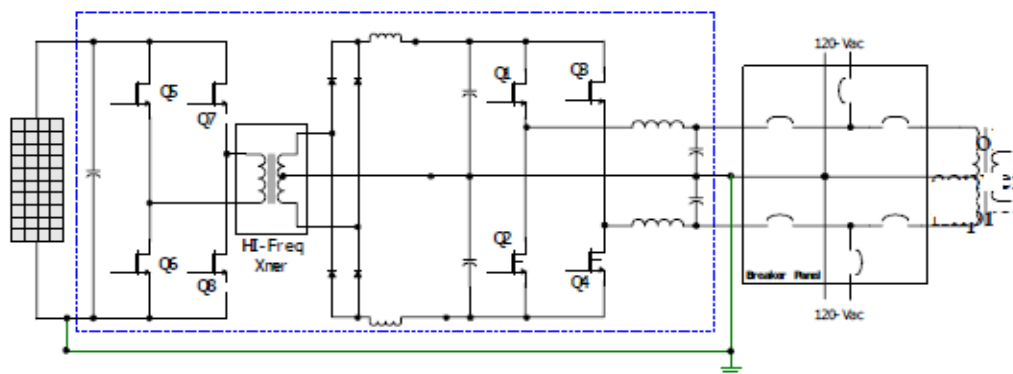
Pada Dasarnya topologi rangkaian pada grid tie inverter hampir dibedakan atas tiga jenis yaitu : inverter LF- transformer, H-F transformer, dan Transformerless inverter. Tradisionil inverter GTI biasanya menggunakan LF-transformer untuk menaikkan tegangan inputnya. Topologi rangkaiannya dapat dilihat pada gambar dibawa ini. Inverter jenis ini memiliki efisiensi yang rendah, distorsi yang rendah serta bobot yang berat. Dengan mengganti trafo LF dengan HF efisiensi inverter dapat meningkat 2%. Konverter DC-DC juga mampu melakukan tugasnya sebagai pengatur MPPT. Selain itu terdapat transformerless inverter, diamana inverter ini menggunakan boost converter untuk mengatur

tegangan dari PV agar cocok dengan tegangan input yang dibutuhkan.

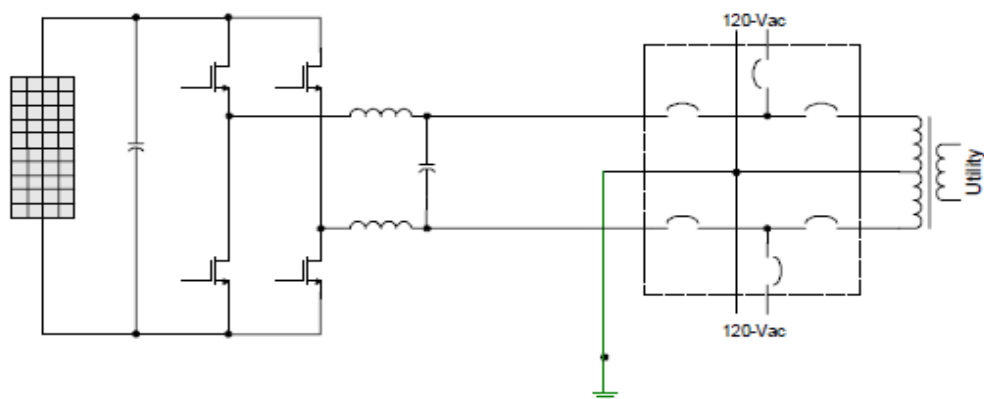
Inverter ini juga mampu meningkatkan efisiensi sampai 2%.



(a)



(b)



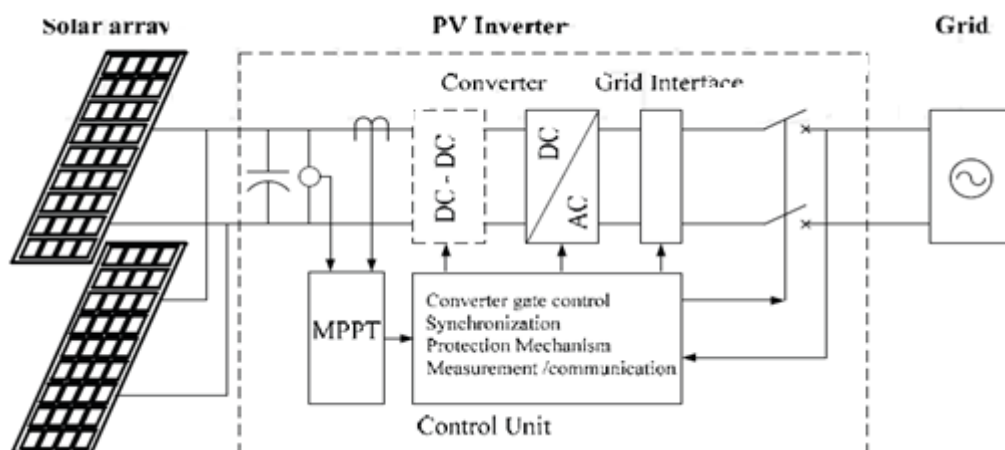
(c)

Gambar 2.24 (a) Inverter yang menggunakan LF- Transformer, (b) Inverter yang menggunakan HF-transformer, dan (c) Transformerless inverter

2.6.3. Sinkronisasi Tegangan Inverter GTI Dengan Tegangan PLN

Sinkronisasi adalah suatu cara untuk menghubungkan dua sumber atau beban arus bolak – balik (AC). Sumber AC yang ingin dihubungkan disini adalah sumber solar cell yang diubah AC oleh inverter dan dari sumber dari PLN. Pemanfaatan tegangan solar cell ataupun energi terbarukan lainnya yang terhubung dengan grid sudah lama dikembangkan. Namun dalam menghubungkan tegangan PV dalam hal ini tegangan output inverter ini tidaklah mudah. Untuk menghubungkan secara paralel antara tegangan PV dan tegangan grid maka karakteristik kedua tegangan haruslah mempunyai frekuensi, amplitude dan sudut fase yang sama. Beberapa metode telah banyak digunakan dalam beberapa produk inverter diantaranya adalah :

1. Zero crossing Detection
2. Pem-filter-an tegangan jaringan listrik
3. Phase Locked Loop (PLL)



Gambar 2.25 Diagram Dari Fungsi Yang dimiliki Grid Tie Inverter

Dari Gambar diatas dapat dilihat fungsi – fungsi dasar dari inverter grid tie, diantaranya terdapat fungsi MPPT agar inverter dapat mengambil daya maksimum yang dihasilkan PV, sistem sinkronisasi, sampai sistem proteksi. Pada inverter ini terdapat fungsi monitoring yang dapat dihubungkan dengan PC.