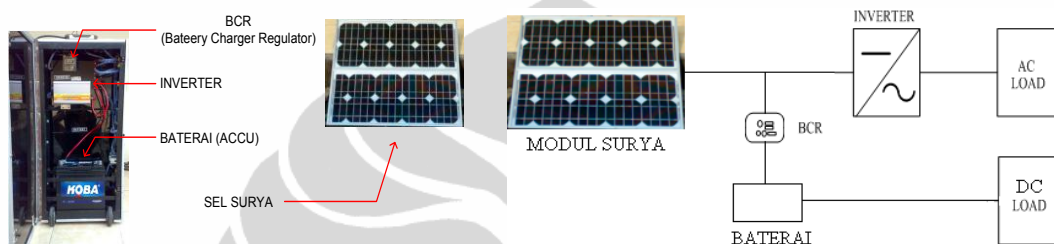


BAB 2 TEORI DASAR

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya

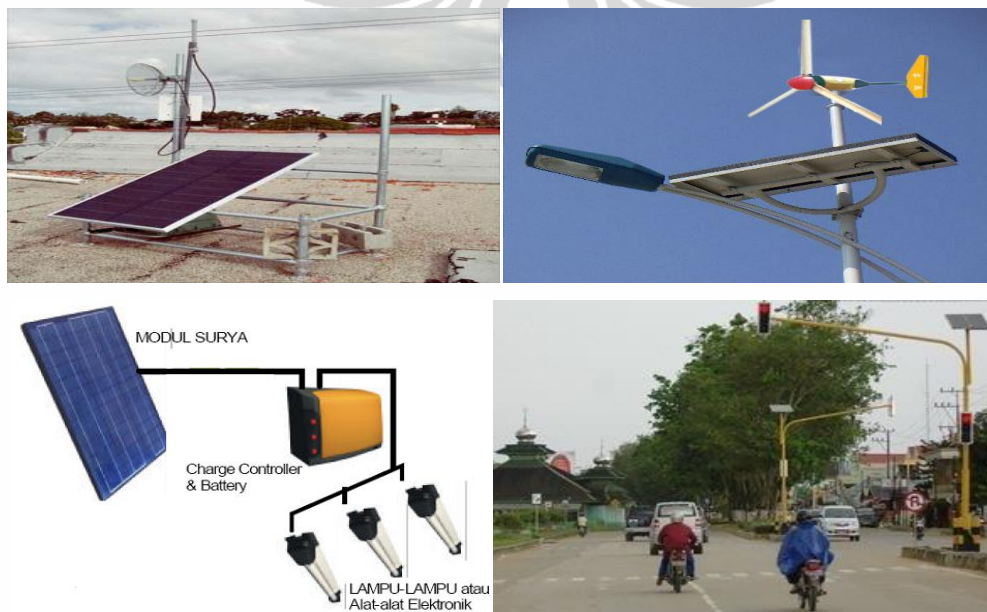
PLTS adalah pembangkit listrik yang menggunakan cahaya matahari, dengan mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS dapat langsung digunakan untuk mencatu beban, atau disimpan terlebih dahulu dalam sebuah baterai. PLTS ini menghasilkan tegangan AS yang dapat diubah menjadi tegangan ABB.



Gambar 2.1. Komponen dan diagram rangkaian PLTS

2.2. Aplikasi PLTS

Tegangan yang dihasilkan sel surya adalah tegangan AS yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan, seperti: lampu penerangan rumah tangga, lampu penerangan jalan, lampu lalu lintas, pemancar, sinyal kereta api dan sebagainya (Gambar 2.2).



Gambar 2.2. Instalasi PLTS berdaya kecil^[2]

Selain itu PLTS juga dapat menghasilkan daya yang lebih besar, biasanya untuk beban ABB, seperti: kebutuhan daya listrik di perumahan, Base Transceiver Station (BTS). Seringkali PLTS ini dikombinasikan dengan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dan Pembangkit Listrik Tenaga Disel (PLTD) sehingga membentuk jaringan listrik mikro yang dikenal dengan microgrid. Jaringan ini juga dapat digabungkan dengan jaringan listrik yang tersedia (milik PLN), seperti tampak pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Instalasi PLTS berdaya besar

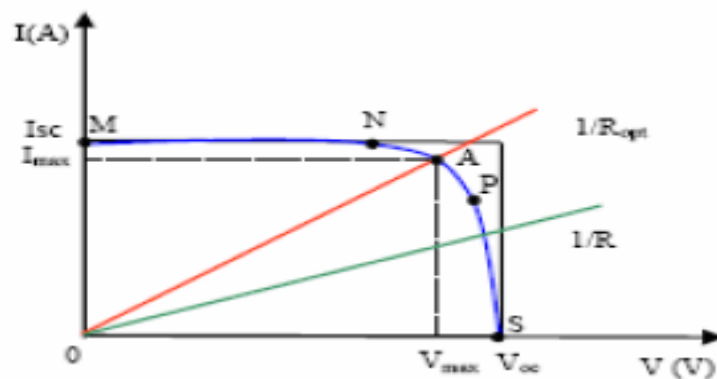
2.3. Komponen PLTS

2.3.1. Sel surya

Dalam penggunaannya, sel surya seringkali dibutuhkan untuk dapat menghasilkan nilai daya yang lebih besar agar dapat digunakan sebagai catu daya, sehingga diperlukan sel surya yang banyak. Hal tersebut dapat terpenuhi dengan cara merakit sejumlah sel surya dengan menghubungkan sedemikian rupa hingga diperoleh tegangan dan daya dengan nilai tertentu. Pada umumnya setiap modul sel surya telah dirancang sedemikian rupa oleh pabrik, sehingga tahan terhadap temperatur yang tinggi serta benturan mekanis yang terjadi. Sel Surya diproduksi dari bahan semikonduktor yaitu silikon yang berperan sebagai isolator pada temperatur rendah dan sebagai konduktor bila ada energi dan panas.^[3]

Sel surya pada kondisi normal dalam penggunaannya memiliki batasan ukuran suhu antara -65°C hingga $+125^{\circ}\text{C}$ (-85°F hingga $+257^{\circ}\text{F}$). Sel surya masih dapat bertahan hingga suhu $+250^{\circ}\text{C}$, untuk periode penggunaan yang tidak lebih dari 30 menit dan bertahan hingga suhu $+300^{\circ}\text{C}$, untuk periode penggunaan kurang dari 20 menit. Sel surya akan bekerja dengan baik pada suhu yang rendah yaitu mencapai suhu -100°C (-148°F). Suhu sangat mempengaruhi kondisi kerja atau nilai keluaran dari sel surya.

2.3.2. Karakteristik Sel Surya



Gambar 2.4 Karakteristik PV pada tiga daerah kondisi.^[4]

Pada intensitas cahaya dan temperatur tertentu, terdapat tiga daerah kerja PV, yaitu daerah MN pada saat arus cenderung konstan, daerah PS dimana tegangan cenderung konstan dan daerah NP daerah dengan daya maksimum pada titik A (Gambar 2.4).

2.3.3. Efisiensi Sel Surya

Efisiensi sel surya didefinisikan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} A_c \quad (2.1)$$

Dengan:

P_{out} = daya output dari sel

P_{in} = tingkat penyinaran pada area sel surya

A_c = area sel surya yang tersinari

Sebagai contoh sel surya dengan efisiensi 10% apabila memperoleh daya dari radiasi matahari sebesar 1000 Watt/m^2 , maka dihasilkan daya listrik

sebesar 100 Watt/m². Saat ini dengan kemajuan teknologi yang dicapai dalam pembuatan telah dicapai efisiensi sel surya sebesar 23%.

Efisiensi maksimum dari konversi energi sel surya tergantung pada:

1. Konstruksi internal sel surya, dimensi, area tersinari, karakteristik sel surya, lapisan antireflektif, tekstur permukaan dan konfigurasi kontak
2. Tingkat penyinaran
3. Temperatur kerja
4. Kerusakan partikel akibat radiasi
5. Temperatur dan pengaruh lingkungan

2.3.4. Modul Sel Surya

Modul sel surya adalah sekumpulan sel surya yang dihubungkan secara seri, paralel atau kombinasi keduanya untuk memperoleh nilai tegangan, arus dan daya tertentu.

Jumlah modul yang dihubungkan seri ditentukan oleh nilai tegangan yang dibutuhkan, dengan rumus dibawah ini^[5] :

$$J_s = \frac{V_{INV}}{V_{MF}} \quad (2.2)$$

Dengan :

J_s = jumlah seri modul PV

V_{INV} = tegangan masukan inverter (Volt)

V_{MF} = tegangan maksimum modul PV (Volt)

Jika diperoleh bilangan pecahan, maka J_s dibulatkan ke bawah atau ke atas. Jadi tegangan modul sel surya (V_{GPV}) adalah :

$$V_{GPV} = J_s \cdot V_{MF} \quad (2.3)$$

Untuk memperoleh daya total sebesar P_{GPV} , maka dibutuhkan jumlah string, sebagai berikut :

$$J_p = \frac{P'_{GPV}}{V_{GPV} \cdot I_{MF}} \quad (2.4)$$

Dengan :

J_p = jumlah string modul PV

P'_{GPV} = daya modul sel surya (Watt)

V_{GPV} = tegangan modul sel surya (Volt)

I_{MF} = arus maksimum modul PV (Ampere)

Bila diperoleh bilangan pecahan, J_p dibulatkan keatas, arus nominal (I_{GPV}) dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$I_{GPV} = J_p \cdot I_{MF} \quad (2.5)$$

Setelah ditentukan J_s dan J_p , maka daya modul sel surya terpasang dihitung kembali menggunakan persamaan :

$$P_{GPV} = V_{GPV} \cdot I_{GPV} \quad (\text{Watt Peak}) \quad (2.6)$$

Sedangkan jumlah susunan modul sel surya (N) yang terpasang adalah

$$N = J_p \cdot J_s \quad (2.7)$$

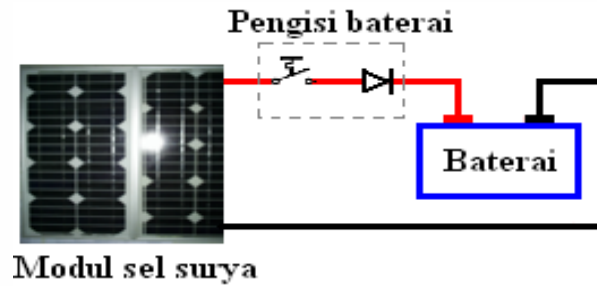
2.4. Rangkaian Pengisi Baterai

Fungsi utama rangkaian pengisi baterai adalah mengisi baterai menggunakan tegangan yang berasal dari sel surya. Selain itu juga berfungsi untuk:

1. Membatasi dan menghentikan arus yang mengalir bila kondisi baterai dalam keadaan penuh, sekaligus melakukan pemindahan hubungan dari baterai yang sudah penuh ke beban
2. Dilengkapi dengan indikator *Low Voltage Disconnect*, dimana akan menghentikan suplai yang berasal dari sel surya ke beban, bila tegangan baterai berada dibawah harga tegangan pemutusan (*cut-off Voltage*). Hal ini dapat mencegah baterai dari kerusakan.
3. Mengamankan baterai dari bahaya *overcharge* maupun *over discharge*. Yang dimaksud dengan *overcharge* adalah suatu kondisi dimana terjadi proses pemutusan pengisian baterai pada tegangan batas atas dengan tujuan untuk menghindari *gassing* yang dapat menyebabkan penguapan gel baterai dan korosi pada *grid* baterai, sehingga dapat mengurangi *life time* baterai.

Sedangkan *over discharge* adalah suatu kondisi dimana terjadi proses pemutusan pengosongan baterai pada tegangan batas bawah untuk menghindari pembebanan berlebih yang dapat menyebabkan *sulfasi*.

4. Mencegah beban berlebih dan terjadinya hubung singkat
5. Menghindari aliran balik arus listrik yang dapat merusak modul sel surya di malam hari saat tegangan lebih rendah dibanding tegangan baterai



Gambar 2.5. Rangkaian pengisi baterai jenis *On-off Regulation Type Serie*

Hubungan sel surya dengan baterai akan terputus saat tegangan baterai telah mencapai batas atas (Gambar 2.5).

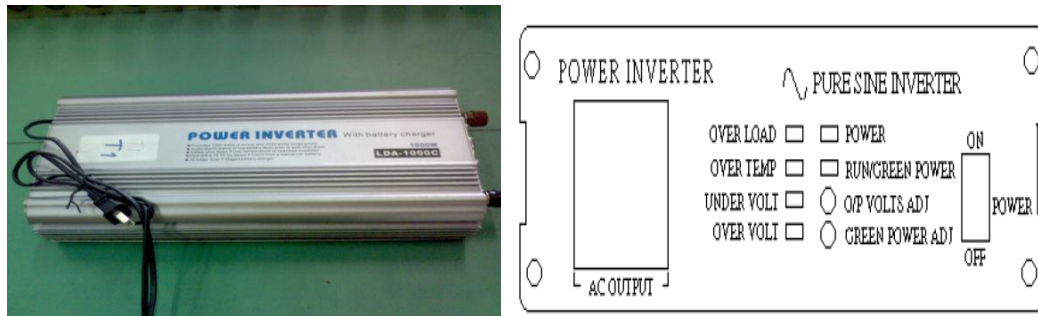
Rangkaian ini dipasang antara modul sel surya dan baterai dengan spesifikasi teknis sesuai dengan daya dan tegangan modul sel surya. Disamping itu harus mampu bekerja pada kondisi ekstrim yaitu saat tegangan lebih rendah dari 1,25 kali tegangan nominal dan arus maksimum modul sel surya selama minimal satu jam tanpa tersambung ke baterai.

Pengaturan pada alat pengontrol perlu diselaraskan dengan kebutuhan sistem PLTS. Contoh pengaturan sistem PLTS untuk baterai yaitu menghentikan pengisian saat tegangan baterai telah mencapai lebih dari 2,5 Volt, dan mengisi kembali jika tegangan baterai kurang dari 2,3 Volt. Adapun pengaturan penggunaan baterai, yaitu menghentikan arus baterai ke beban, jika tegangan baterai turun hingga 1,9 Volt, dan menyambungkan kembali saat baterai telah terisi hingga tegangan melebihi 2,10 Volt.^[6]

2.5. Invertor Satu Fasa

Invertor satu fasa adalah sebuah perangkat elektronik yang dapat mengubah atau mengkonversikan tegangan AS menjadi tegangan ABB satu fasa. Invertor dapat digunakan sebagai:

- a. Catu daya darurat
- b. Catu daya tak terputus (UPS)
- c. Pengendali kecepatan motor

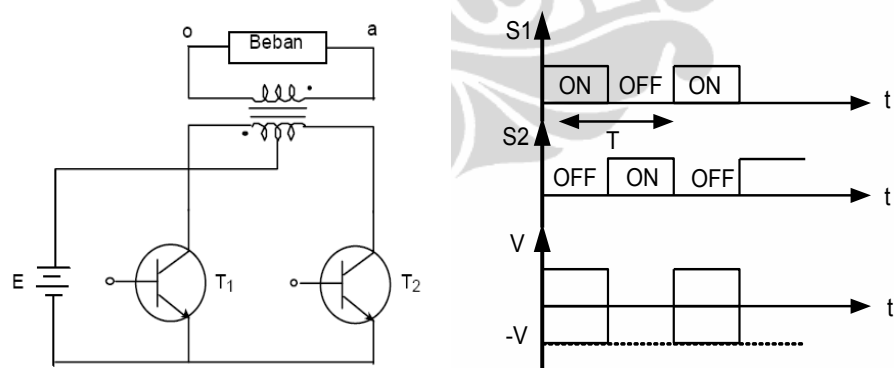


Gambar 2.6 Contoh inverter satu fasa

Bentuk gelombang tegangan keluaran inverter yang ideal adalah gelombang sinusoidal murni, akan tetapi pada kenyataannya gelombang tegangannya berbentuk persegi.

Dalam melakukan penginstalasian inverter, tegangan dan kapasitas baterai sama dengan tegangan input pada inverter, karena jika tegangan pada baterai lebih rendah (kecil) maka inverter tidak akan bekerja dengan normal.

Ditinjau dari bentuk rangkaian, inverter ada 3 macam: Jembatan setengah, jembatan penuh dan *push pull*. Di bawah ini adalah inverter dengan rangkaian *push pull*. Pada rangkaian ini digunakan transformator yang memiliki tap tengah dan dua buah transistor. Cara kerja inverter satu fasa dengan beban tap tengah sama dengan inverter jembatan setengah.



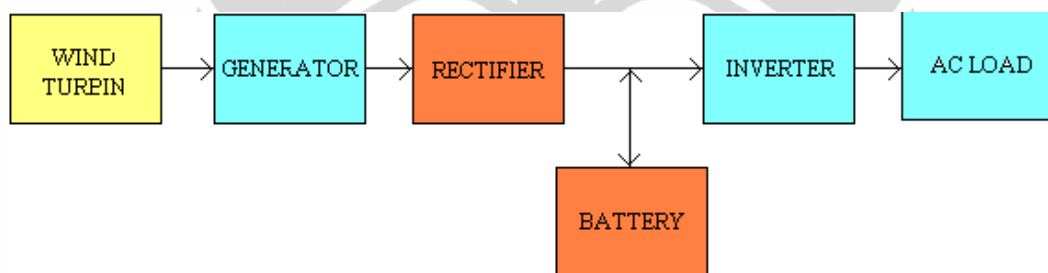
Gambar 2.7 Rangkaian inverter *push pull*

Tap tengah transformator berfungsi supaya beban mendapat tegangan bolak balik. Pada saat T1 terhubung dan T2 terbuka dihasilkan tegangan V_{ao} negatif. Dan sebaliknya saat T1 terbuka dan T2 terhubung dihasilkan tegangan V_{ao} positif. Jika n merupakan perbandingan lilitan transformator antara primer dengan sekunder, maka besar tegangan keluaran adalah : $V_{a0} = E \times n$

Penggunaan transformator pada sistem *push-pull* memberikan keuntungan karena mengisolasi secara elektrik antara sumber tegangan AS dengan keluaran tegangan ABB.

2.6. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah suatu teknologi pembangkit listrik yang mengubah energi angin menjadi energi listrik. Angin adalah udara yang bergerak atau mengalir, sehingga memiliki kecepatan, tenaga dan arah. Penyebab dari pergerakan ini adalah pemanasan bumi oleh radiasi matahari. Dengan mengetahui variasi harian dari kecepatan angin, dapat diketahui kapan angin bertiup kencang dalam satu hari, sehingga dapat digunakan untuk menentukan berapa jam dalam sehari energi angin di daerah tersebut dapat digunakan untuk menggerakkan turbin.



Gambar 2.8. Diagram rangkaian PLTB^[9]

Secara umum PLTB terdiri dari beberapa bagian (Gambar 2.8):

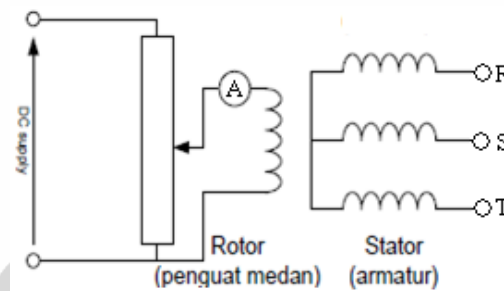
1. kincir angin: Kincir dikopel dengan generator dan dapat berputar bila angin mengenainya dengan kecepatan tertentu.
2. Generator: Generator akan menghasilkan tegangan bila kincir berputar. Jenis tegangan yang dihasilkan tergantung pada jenis generator, antara lain: generator AS, generator ABB satu fasa dan tiga fasa. Sedangkan nilai tegangan tergantung pada kecepatan putar kincir dan besarnya arus penguat medan yang diberikan pada rotor generator. Bila digunakan generator AS, maka tegangan yang dihasilkan dapat langsung disimpan oleh baterai, tetapi bila menggunakan generator ABB baik satu fasa maupun tiga fasa, maka diperlukan rangkaian penyearah untuk mengubah tegangan ABB menjadi tegangan AS untuk disimpan di dalam baterai.

Generator ABB satu fasa jenisnya sama dengan generator AS, sedangkan generator tiga fasa ada dua jenis, yaitu generator sinkron dan generator induksi.

Tegangan dan frekwensi yang dihasilkan generator ABB sebesar:

$$E = C \times N \times \phi \quad (2.9)$$

$$f = \frac{p \times N}{60} \quad (2.10)$$



Gambar 2.9. Generator sinkron tiga fasa

Bila generator dibebani, maka tegangan harus dinaikkan untuk mengatasi rugi tegangan pada jangkar, sehingga besar tegangan generator:

$$E = \sqrt{(V \cos \alpha + IR)^2 + (V \sin \alpha + IX_s)^2} \quad (2.11)$$

Dengan:

E : Tegangan yang dihasilkan generator (V)

V : Tegangan beban (V)

I : Arus beban (A)

R : Tahanan jangkar (Ω)

X_s : Reaktansi jangkar (Ω)

N : Kecepatan putar (rpm)

ϕ : Fluksi pada rotor

f : Frekwensi (Hz)

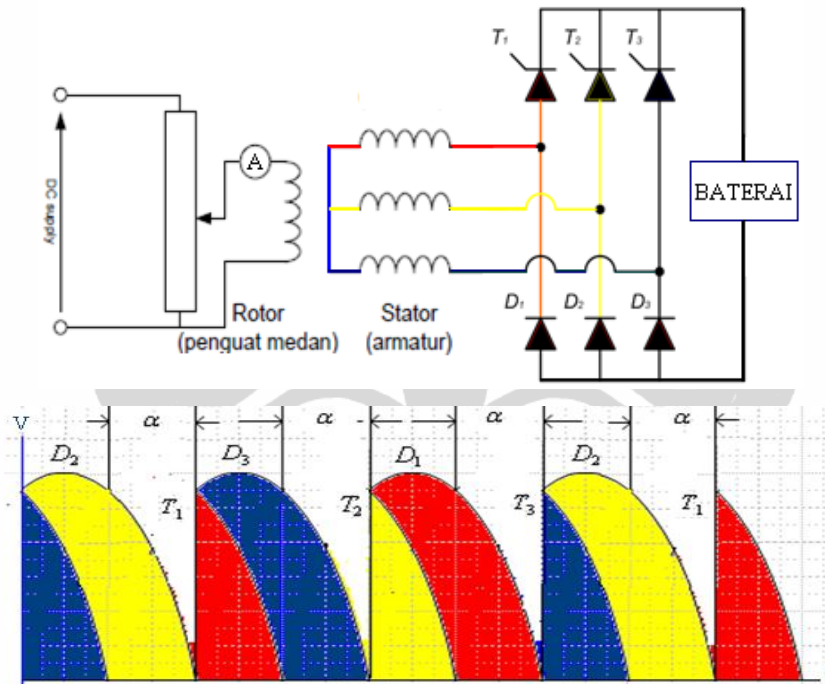
p : Jumlah pasang kutub

3. Penyearah: untuk mengubah tegangan ABB dari generator menjadi tegangan AS. Penyearah ada dua macam yaitu penyearah satu fasa dan tiga fasa, tergantung jenis generator yang digunakan. Penyearah ini menghasilkan tegangan AS yang nilainya tergantung pada bentuk gelombangnya. Bentuk setengah gelombang menghasilkan tegangan yang lebih kecil dibandingkan dengan gelombang penuh, pada tegangan masukan yang sama. Untuk memperoleh nilai tegangan AS yang bervariasi dari nol hingga tegangan maksimum, maka digunakan penyearah terkendali.

Pada penyearah tiga fasa gelombang penuh terkendali dengan beban bersifat resistif, untuk sudut penyulutan $\alpha < 60^\circ$ diperoleh tegangan AS sebesar^[7] :

$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{60^\circ + \alpha}^{120^\circ} V_{max} \cdot \sin \omega_t d(\omega_t) + \frac{3}{2\pi} \int_{60^\circ}^{120^\circ + \alpha} V_{max} \cdot \sin \omega_t d(\omega_t)$$

$$V_{dc} = \frac{3V_{max}}{2\pi} (-\cos 120^\circ + \cos(60^\circ + \alpha)) + \frac{3V_{max}}{2\pi} (-\cos(120^\circ + \alpha) + \cos 60^\circ) \quad (2.12)$$



Gambar 2.10. Rangkaian penyearah tiga fasa gelombang penuh setengah terkendali dan bentuk gelombang tegangan keluarannya

Sedangkan untuk sudut penyulutan $\alpha \geq 60^\circ$ maka dihasilkan tegangan sebesar:

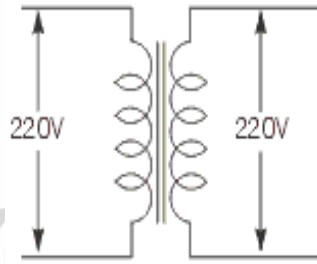
$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \cdot \sin \omega_t d(\omega_t)$$

$$V_{dc} = \frac{3V_{max}}{2\pi} (-\cos 180^\circ + \cos \alpha) \quad (2.13)$$

4. Baterai : Daya yang dihasilkan PLTB sangat fluktuatif tergantung kecepatan angin. Agar dapat lebih kontinyu melayani beban, maka daya yang dihasilkan PLTB disimpan ke dalam baterai
5. Invertor: digunakan untuk mengubah tegangan AS menjadi ABB karena jenis bebannya ABB

2.7. Transformator Isolasi

Transformator isolasi adalah transformator dengan rasio satu (tegangan sekunder sama besar dengan tegangan primer) yang berfungsi sebagai pengaman, yaitu memisahkan secara listrik antara tegangan primer dan tegangan sekunder (Gambar 2.11).



Gambar 2.11. Rangkaian transformator isolasi

Pemisahan ini dimaksudkan untuk menghindari arus hubung singkat pada saat dilakukan pengukuran besaran listrik pada sisi primer dan sekunder secara bersamaan.

Beberapa kerugian pada transformator, antara lain:

1. Kerugian tembaga: Kerugian dalam lilitan tembaga yang disebabkan oleh resistansi tembaga dan arus listrik yang mengalirinya.
2. Kerugian kopling: Kerugian yang terjadi karena kopling primer-sekunder tidak sempurna, sehingga tidak semua fluks magnet yang diinduksikan primer memotong lilitan sekunder. Kerugian ini dapat dikurangi dengan menggulung lilitan secara berlapis-lapis antara primer dan sekunder.
3. Kerugian kapasitas liar: Kerugian yang disebabkan oleh kapasitas liar yang terdapat pada lilitan-lilitan transformator. Kerugian ini sangat mempengaruhi efisiensi transformator untuk frekuensi tinggi. Kerugian ini dapat dikurangi dengan menggulung lilitan primer dan sekunder secara semi-acak
4. Kerugian histeresis: Kerugian yang terjadi ketika arus primer ABB berbalik arah, disebabkan karena inti transformator tidak dapat mengubah arah fluks magnetnya dengan seketika. Kerugian ini dapat dikurangi dengan menggunakan material inti reluktansi rendah.
5. Kerugian efek kulit: Pada saat dialiri arus bolak-balik, arus cenderung mengalir pada permukaan konduktor. Hal ini memperbesar kerugian kapasitas dan juga menambah resistansi relatif lilitan. Kerugian ini dapat dikurangi

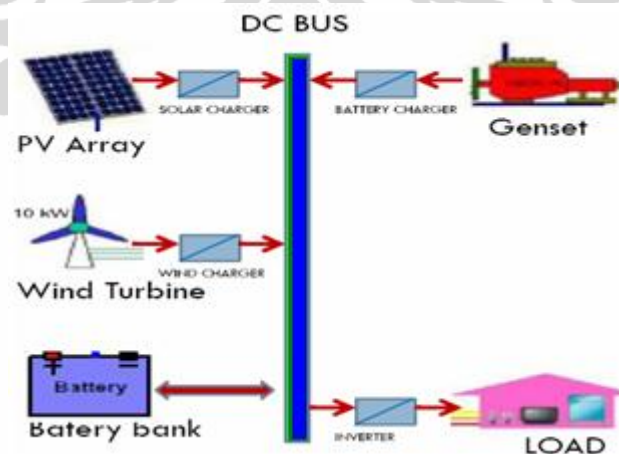
dengan menggunakan kawat Litz, yaitu kawat yang terdiri dari beberapa kawat kecil yang saling terisolasi. Untuk frekuensi radio digunakan kawat atau lembaran tipis tembaga sebagai ganti kawat biasa.

6. Kerugian arus eddy: Kerugian yang disebabkan oleh GGL masukan yang menimbulkan arus dalam inti magnet yang melawan perubahan fluks magnet yang membangkitkan GGL. Karena adanya fluks magnet yang berubah-ubah, terjadi pusaran fluks magnet pada material inti. Kerugian ini dapat dikurangi dengan inti berlapis-lapis.

Karena adanya kerugian pada transformator, maka efisiensi transformator tidak dapat mencapai 100%. Untuk transformator daya dengan frekuensi rendah, efisiensi bisa mencapai 98%.

2.8 Jaringan Listrik Mikro Arus Searah

Jaringan listrik mikro adalah jaringan pemasok daya listrik dengan kapasitas kurang dari 1MW^[1], biasanya terdiri dari beberapa pembangkit listrik energi terbarukan, seperti PLTS, PLTB dan mikro hidro. Berdasarkan sambungan ke jaringan listrik yang besar (*grid*), maka ada dua jenis jaringan listrik mikro, yaitu *off-grid* dan *on-grid*.



Gambar 2.12. Jaringan listrik mikro arus searah jenis *off-grid*

Dalam sistem *off-grid*, tidak ada jaringan utilitas untuk menyediakan cadangan daya. Sistem bergantung sepenuhnya pada kemampuan menghasilkan energi dan cadangan penyimpanan energi dari baterai (Gambar 2.12). Konfigurasi *off-grid* ini paling sering digunakan di lokasi terpencil di mana tidak ada akses ke jaringan

utilitas. Sedangkan dalam sistem *on-grid* energi yang dihasilkan digunakan secara lokal, apabila terdapat kelebihan energi dapat dijual ke layanan utilitas. Jika tidak ada energi yang dihasilkan, misalnya di malam hari, pasokan daya diambil dari jaringan utilitas. Jadi jaringan utilitas digunakan sebagai *back-up* ke sistem jaringan listrik mikro dan diperlukan pengaturan secara otomatis untuk melakukan semua kontrol dan fungsi *switching*.

Keuntungan jaringan listrik arus searah antara lain^[8]:

1. Jika biaya yang besar untuk stasiun-stasiun konverter tidak diperhitungkan, saluran-saluran udara dan kabel AS lebih murah dari pada saluran-saluran udara dan kabel-kabel ABB. Jarak impas keduanya adalah sekitar 500 mil untuk saluran udara, (15 - 30) mil untuk kabel bawah laut, (30 - 60) mil untuk kabel bawah tanah.
2. Kondisi rugi korona dan radio interferensi lebih baik pada saluran AS dibandingkan saluran ABB
3. Faktor daya saluran AS selalu sama dengan satu (1), dan karenanya tidak dibutuhkan kompensasi daya reaktif.
4. Panjang saluran tidak dibatasi oleh stabilitas karena tidak dibutuhkan operasi sinkron, demikian juga daya dapat dikirim dengan kabel sampai pada jarak yang sangat jauh.
5. Rugi saluran AS lebih kecil daripada saluran ABB untuk saluran yang sebanding.

Kerugian jaringan listrik arus searah, antara lain:

1. Konverter menimbulkan arus dan tegangan harmonisa pada sisi ABB dan AS, karena itu dibutuhkan filter, sehingga harganya relatif mahal
2. Konverter mengkonsumsi daya reaktif
3. Tidak mudah menyadap daya pada titik sepanjang saluran AS, sehingga dibuat sistem *point to point* yang menghubungkan suatu stasiun pembangkit besar ke suatu pusat konsumen daya yang besar, atau interkoneksi dua sistem ABB yang terpisah.