

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

1.1 Peneliti Terdahulu

Setelah peneliti berhasil melakukan penelitian, dari hasil penelitian ada beberapa yang memiliki keterkaitan dengan penelitian yang peneliti lakukan.

Penelitian pertama, dilakukan oleh Bagas Budi Wicaksono dan Trisna Wati (2020) yang berjudul tentang “Kontrol Frekuensi Beban Pada Sistem Tenaga Satu Area Menggunakan Kontrol Integral dan Integral Proporsional” dengan Tujuan dari penelitian tersebut adalah menguji efisiensi kontrol beban dan untuk menstabilkan frekuensi sistem energi listrik yang baik, dengan menggunakan Kontrol integral pada LFC terdiri dari sensor frekuensi dan integrator. Fungsi sensor frekuensi adalah untuk mendeteksi frekuensi kesalahan pada sistem energi ketika terjadi perubahan beban atau lonjakan frekuensi. dan Kontrol Proporsional Integral (PI) menghasilkan dua keluaran sinyal yaitu sinyal kesalahan proporsional dan sinyal kesalahan integral proporsiona. Dengan kesimpulan bahwa kontrol Integral dan kontrol Proporsional Integral (PI) dapat digunakan untuk menstabilkan frekuensi. Respon frekuensi terbaik adalah respon dari kontrol Integral dengan overshoot kecil dan settling time 7,5 detik. “(Wicaksono et al., n.d.2020)

Penelitian kedua, dilakukan oleh Mochamad Andrik dan Mohamad Farul (2018) yang berjudul tentang “Optimasi *Load Frequency Control* (LFC) Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Mikro Hidro* Berbasis *Pid-Anfis*” dalam penelitian ini membahas tentang Pembangkit listrik tenaga *mikro hidro* yang semakin banyak digunakan sebagai alternatif sumber energi listrik, pembangkit listrik tenaga *mikro hidro*. Dengan Permasalahan yang sering terjadi pada sistem pembangkit mikro hidro adalah terjadinya putaran tidak konstan pada generator yang disebabkan oleh perubahan beban yang tersambung, sehingga menyebabkan terjadinya fluktuasi frekuensi pada sistem yang dapat mengakibatkan kerusakan peralatan listrik. Oleh karena itu, penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul Penggunaan Metode *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) Sebagai Pengoptimasi *Load Frequency Control* (LFC) Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Mikro Hidro*. *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*

(ANFIS) adalah penggabungan mekanisme *fuzzy inference system* yang digambarkan dalam arsitektur jaringan syaraf. dengan kesimpulan dari pada PID_ANFIS, *undershoots* terkecil ($0,05 \times 10^{-5}$) dan *settling time* tercepat (25 detik). Hal ini menunjukkan bahwa dengan model kontrol PID_ANFIS sistem akan lebih cepat merespon dan memperbaiki frekuensi agar tetap konstan. (Andrik, Farul, dan Cahyono 2018)

Penelitian ketiga, dilakukan oleh Erick Sutjiadi dan Soetjipto Soewono (2016) yang berjudul tentang “ Pemodelan Kontrol Frekuensi Beban Dan Strategi Pemutusan Beban Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas” pada penelitian ini membahas mengenai sistem tenaga listrik dengan pembebanan yang selalu berubah. Dalam pembahasan ini dengan pembangkit listrik tenaga gas merupakan masa berputar yang besar (*large rotating mass*) dimana terdapat dua gaya torsi yang berputar secara berlawanan. Torsi mekanis akan meningkatkan kecepatan berputar sedangkan torsi elektrik dari generator akan memberikan gaya yang berlawanan, oleh karena itu akan didapat kecepatan berputar yang konstan. *GAST* adalah model turbin yang digunakan untuk mensimulasikan response frekuensi terhadap perubahan beban dan sistem tenaga listrik. Dengan perangkat simulasi *Simulink* akan di bangun model kontrol untuk area multi. Pada simulasi kontrol menggunakan kontrol primer (*governor*) dan kontrol sekunder PID. memberikan osilasi transien yang lebih baik untuk respon frekuensi. Simulasi perangkat lunak menggunakan model *GAST*, merupakan model turbin gas yang banyak digunakan dalam analisa sistem ketenagaan. Parameter yang digunakan berdasarkan pada konstanta kontrol turbin gas yang jadi objek penelitian dan juga asumsi yang relevan digunakan untuk studi sistem ketenagaan. Simulasi menggunakan kontrol primer dan kontrol sekunder dan dapat disimpulkan kontrol sekunder (PID) memberikan osilasi transien yang lebih kecil dan waktu settling yang lebih baik. (Sutjiadi et al., n.d. 2019).

Penelitian keempat dilakukan oleh T.Bharath Kumar dan M.Uma Vani (2018) yang berjudul “Pengendalian Frekuensi Beban Pada Sistem Power Dua Area Menggunakan Anfis” pada penelitian ini berfokus pada pengendalian frekuensi pada sistem

pembangkit dua area. dengan Membandingkan dua metode yaitu metode *Anfis* dan Pengendali proporsional integral (PI).

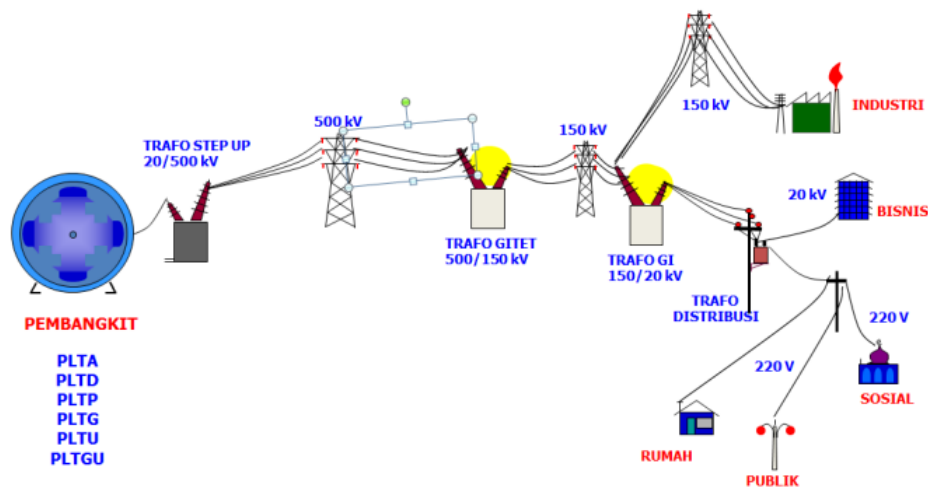
Seperti yang kita ketahui bahwa frekuensi sistem naik ketika beban berkurang jika disimpan pada nol. Demikian pula frekuensi dapat menurun jika beban meningkat. Namun perlu untuk mempertahankan konstanta frekuensi sedemikian rupa. Aliran daya antara garis ikat yang berbeda dijadwalkan-misalnya, area 'i' dapat mengekspor praspesifikasi jumlah daya ke area 'J' sambil mengimpor sejumlah daya yang telah ditentukan sebelumnya dari area 'k'. Bagaimanapun itu diharapkan bahwa untuk memenuhi tugas di atas, area 'i' menyerap perubahan bebannya sendiri, yaitu peningkatan pembangkitan untuk memasok beban tambahan di area tersebut atau penurunan pembangkitan ketika permintaan beban di area tersebut mengalami penurunan. Hal ini akan diatasi dengan pengontrolan PI. Dengan kesimpulan Kontrol Frekuensi Beban berbasis *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* diusulkan untuk sistem daya dua area di setiap area kontrol. Hasilnya telah dibandingkan dengan kontroler PI konvensional. Hasil membuktikan bahwa *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* berbasis LFC memberikan respon yang lebih baik dibandingkan dengan kontroler konvensional dalam hal *peak overshoot*, *settling time* dan *steady state error*. Pengontrol ANFIS yang diusulkan tidak hanya sederhana untuk dirancang tetapi juga mudah untuk diimplementasikan. Selain itu kemampuan beradaptasi dengan gangguan membuat pengontrol yang diusulkan lebih efektif. (Bharath Kumar and Uma Vani. 2014).

Penelitian kelima dilakukan oleh Samuel Yunus Yeboah, Sulaiman Nunoo Rajalingam Sakthivelsamy (2021) yang berjudul “Kontrol Frekuensi Beban Otomatis Berbasis Algoritma Pencarian Gravitasi untuk Sistem Tenaga Terinterkoneksi Multi Area” dalam penelitian ini pengontrol *Gravitational Search Algorithm* (GSA) *Proportional-Integral-Derivative* (PID) yang dioptimalkan untuk kontrol sistem daya interkoneksi empat area dari penyimpangan beban dan frekuensi dengan adanya gangguan. GSA diperkenalkan untuk penyetelan parameter pengontrol PI dan PID untuk kontrol frekuensi dalam sistem daya interkoneksi unit tunggal. Metode GSA telah digunakan untuk mendapatkan parameter optimal kontroler dual PI pada sistem tenaga listrik yang saling terhubung dua area. Hasil simulasi menekankan bahwa GSA berbasis PI ganda dianggap unik dalam operasinya dan memberikan redaman yang

sangat baik untuk frekuensi dan deviasi daya *tie line* terkait dengan kontroler PI konvensional. Dengan kesimpulan Kontrol permintaan dan frekuensi adalah langkah ke arah yang benar untuk menekan osilasi yang berasal dari bagian mekanis dan bagian listrik dari sistem tenaga, redaman osilasi yang efisien dapat dicapai dan meningkatkan kemungkinan stabilitas sistem dan dengan demikian meningkatkan stabilitas sistem tenaga secara keseluruhan. Pengontrol PID tradisional dikenal untuk mengendalikan daya yang saling berhubungan. Oleh karena itu, diperlukan desain kontroler yang cepat dan kokoh yang mampu mengendalikan dinamika pada sistem tenaga listrik moderen. Namun pengontrol yang efisien dan tangguh adalah yang memiliki *overshoot* lebih sedikit, waktu penyelesaian tercepat, dan kemampuan meredam osilasi transien secara efektif. Pengontrol GSA-PID menunjukkan semua kualitas ini, karenanya GSA-PID adalah desain LFC terbaik untuk kontrol interkoneksi multi-area yang kompleks.

1.2 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen berupa pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban yang saling berhubungan dan berkerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Secara garis besar sistem tenaga listrik dapat digambarkan dengan skema seperti pada Gambar 2.1 berikut (Suripto et al., n.d.2016).



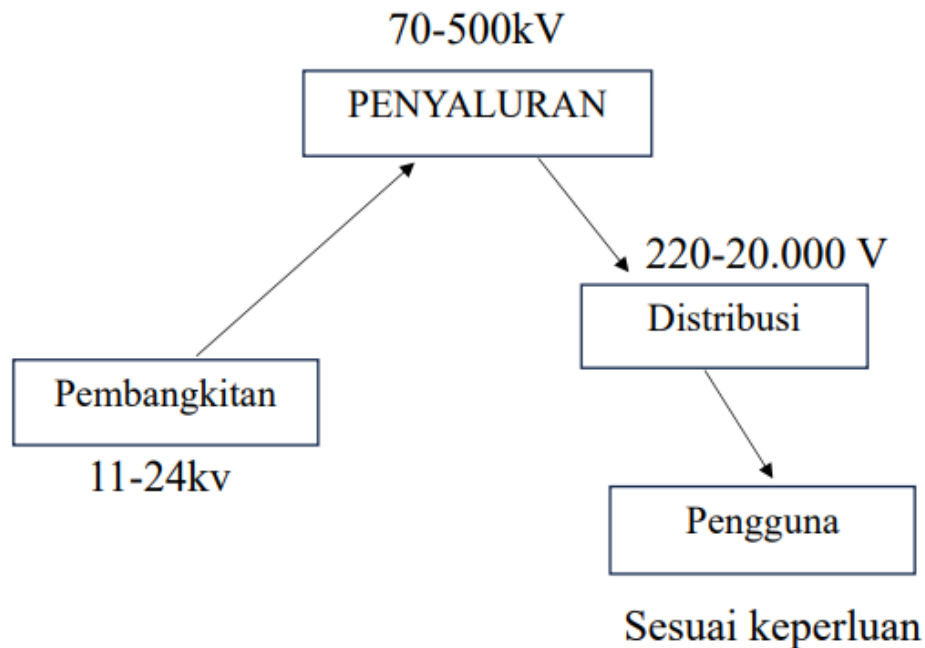
Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

Fungsi masing-masing komponen pada Gambar 2.1 secara garis besar adalah sebagai

berikut :

1. Pembangkitan merupakan komponen yang berfungsi membangkitkan tenaga listrik, yaitu mengubah energi yang berasal dari sumber energi lain misalnya: air, batu bara, panas bumi, minyak bumi dan lain-lain menjadi energi listrik.
2. Transmisi merupakan komponen yang berfungsi menyalurkan daya atau energi dari pusat pembangkitan ke pusat beban.
3. Distribusi merupakan komponen yang berfungsi mendistribusikan energi listrik ke lokasi konsumen energi listrik.
4. Beban adalah peralatan listrik di lokasi konsumen yang memanfaatkan energi listrik dari sistem tersebut.

Pada suatu sistem tenaga listrik, tegangan yang digunakan pada masing-masing komponen dapat berbeda-beda sesuai dengan kebutuhannya. Dengan kata lain, setiap komponen pada sistem tenaga listrik mempunyai level tegangan yang berbeda-beda. Pembagian level tegangan dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2. 2 Pembagian Level Tegangan Listrik (Suripto et al., n.d.2016)

Pada sistem pembangkitan, level tegangan disesuaikan dengan spesifikasi

generator pembangkit yang digunakan, biasanya berkisar antara 11 s/d 24 kV. Untuk pembangkit yang berkapasitas lebih besar biasanya menggunakan level tegangan yang lebih tinggi. Hal ini dilakukan agar arus yang mengalir tidak terlalu besar karena untuk kapasitas daya tertentu, besar arus yang mengalir berbanding terbalik dengan tegangannya. Level tegangan pada pembangkit biasanya tidak tinggi, karena semakin tinggi level tegangan generator, jumlah lilitan generator harus lebih banyak lagi. Lilitan yang lebih banyak mengakibatkan generator menjadi lebih besar dan lebih berat sehingga dinilai tidak efisien. Pada sistem saluran transmisi biasanya digunakan level tegangan yang lebih tinggi. Hal ini karena fungsi pokok saluran transmisi adalah menyalurkan daya, sehingga yang dipentingkan adalah sistem mampu menyalurkan daya dengan efisiensi yang tinggi atau rugi-rugi daya dan turun tegangannya kecil. Upaya yang dilakukan adalah mempertinggi level tegangan agar yang mengalir pada jaringan transmisi 70-500Kv, 220-20.000V Sesuai keperluan 11-24 kV Penyaluran Distribusi Pengguna Pembangkitan lebih kecil.

Level tegangan saluran transmisi lebih tinggi dari tegangan yang dihasilkan generator pembangkit. Tegangan saluran transmisi umumnya berkisar antara 70 s/d 500 kV. Untuk menaikkan tegangan dari level pembangkit ke level tegangan saluran transmisi diperlukan transformator penaik tegangan. Pada jaringan distribusi biasanya menggunakan tegangan yang lebih rendah dari tegangan saluran transmisi. jaringan distribusi yang sering digunakan ada dua macam, yaitu 20 kV untuk jaringan tegangan menengah (JTM) dan 220 V untuk jaringan tegangan rendah (JTR). Dengan demikian diperlukan gardu induk yang berisi trafo penurun tegangan untuk menurunkan tegangan dari saluran transmisi ke tegangan distribusi 20 kV. Diperlukan juga trafo distribusi untuk menurunkan tegangan dari 20 kV ke 220 V sesuai tegangan pelanggan. Level tegangan beban pelanggan menyesuaikan dengan jenis bebannya, misalnya beban industri yang biasanya memerlukan daya yang relatif besar biasanya menggunakan tegangan menengah 20 kV, sedang beban rumah tangga dengan daya yang relatif kecil, biasanya menggunakan tegangan rendah 220 V (Distribusi & Syahputra, n.d.2016)

1.3 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus memenuhi beberapa syarat, seperti *Reliability, Quality dan Stability*.

1. *Reliability* adalah kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus.
2. *Quality* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
3. *Stability* adalah kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan.

Dalam sistem tenaga listrik yang baik maka ketiga syarat tersebut harus dipenuhi yaitu sistem harus mampu memberi pasokan listrik secara terus menerus dengan standar besaran untuk tegangan dan frekuensi sesuai dengan aturan yang berlaku dan harus segera kembali normal bila sistem terkena gangguan. Untuk jaringan yang sangat kompleks dimana beberapa pembangkit saling terkoneksi satu sama lain maka keluaran daya elektrik berupa besaran seperti tegangan dan frekuensi haruslah diperhatikan agar tidak ada pembangkit yang kelebihan beban dan pembangkit yang lain bebannya kecil. Sistem tenaga listrik mempunyai variasi beban yang sangat dinamis dimana setiap detik akan berubah-ubah, dengan adanya perubahan ini pasokan daya listrik tetap dan harus dipasok dengan besaran daya yang sesuai, bila pada saat tertentu terjadi lonjakan atau penurunan beban yang tidak terduga maka perubahan ini sudah dapat dikategorikan ke dalam gangguan pada sistem tenaga listrik yakni kondisi tidak seimbang antara pasokan listrik dan permintaan energi listrik akibat adanya gangguan baik pada pembangkit ataupun pada sistem transmisi sehingga mengakibatkan kerja dari pembangkit yang lain menjadi lebih berat. Untuk itu diperlukan satu penelaahan kestabilan agar pembangkit yang terganggu tidak terlepas dari sistem. Analisis kestabilan biasanya digolongkan kedalam tiga jenis, tergantung pada sifat dan besarnya gangguan yaitu (Saadat.1999).

1. Kestabilan Keadaan Tetap (*Steady State Stability*) Kestabilan keadaan tetap adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menerima gangguan kecil yang bersifat gradual, yang terjadi disekitar titik keseimbangan pada kondisi tetap.

Kestabilan ini tergantung pada karakteristik komponen yang terdapat pada sistem tenaga listrik antara lain: pembangkit, beban, jaringan transmisi, dan kontrol sistem itu sendiri. Model pembangkit yang digunakan adalah pembangkit yang sederhana (sumber tegangan konstan) karena hanya menyangkut gangguan kecil disekitar titik keseimbangan.

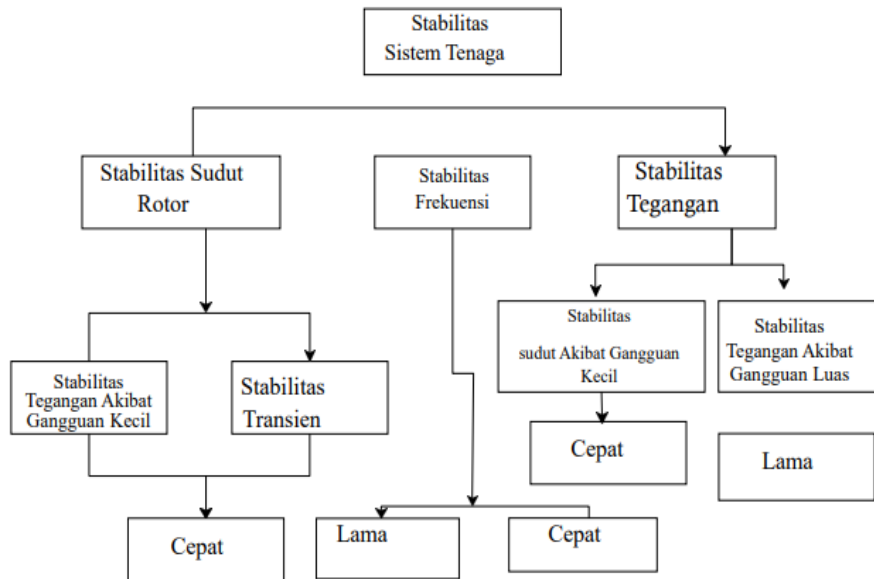
2. Kestabilan Dinamis (*Dynamic Stability*) Kestabilan dinamis adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali ke titik keseimbangan setelah timbul gangguan yang relatif kecil secara tiba-tiba dalam waktu yang lama. Analisa kestabilan dinamis lebih kompleks karena juga memasukkan komponen kontrol otomatis dalam perhitungannya.
3. Kestabilan Peralihan (*Transient Stability*). kestabilan peralihan adalah kemampuan sistem untuk mencapai titik keseimbangan/sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar sehingga sistem kehilangan kestabilan karena gangguan yang terjadi diatas kemampuan sistem. Analisis kestabilan peralihan merupakan analisis yang utama untuk menelaah perilaku sistem daya misalnya gangguan yang berupa:
 - a. Perubahan beban yang mendadak karena terputusnya unit pembangkit.
 - b. Perubahan pada jaringan transmisi misalnya gangguan hubung singkat atau pemutusan saklar (*switching*).

Sistem daya listrik masa kini jauh lebih luas, ditambah interkoneksi antar sistem yang rumit dan melibatkan beratus-ratus mesin yang secara dinamis saling mempengaruhi melalui perantara jala-jala tegangan ekstra tinggi, mesin-mesin ini mempunyai sistem penguatan yang berhubungan. Kisaran masalah yang dianalisis banyak menyangkut gangguan yang besar dan tidak lagi memungkinkan menggunakan proses kelinearan. Masalah kestabilan peralihan dapat lebih lanjut dibagi ke dalam "Kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dan ayunan majemuk (*multi swing*).

Kestabilan ayunan pertama didasarkan pada model generator yang cukup sederhana tanpa memasukkan sistem pengaturannya, biasanya periode waktu yang diselidiki adalah detik pertama setelah timbulnya gangguan pada sistem. Bila 12 pada sistem, mesin dijumpai tetap berada dalam keadaan serempak sebelum berakhirnya

detik pertama, ini dikategorikan sistem masih stabil. Kestabilan sistem tenaga listrik diklasifikasikan berdasarkan beberapa hal di bawah ini (Saadat.1999).

- a. Sifat alami dari ketidak stabilan yang dihasilkan terkait dengan parameter sistem utama dimana ketidak stabilan bisa diamati.
- b. Ukuran gangguan dianggap menunjukkan metode perhitungan dan prediksi ketidakstabilan yang paling sesuai.
- c. *Divais*, proses, dan rentang waktu yang harus diambil untuk menjadi pertimbangan dalam menentukan kestabilan.



Gambar 2. 3 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik (Humamuddin.2018)

Pada Gambar 2.3 menunjukkan sebuah kemungkinan klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik ke dalam tiga bagian, yaitu kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi, dan kestabilan tegangan.

1.4 Kestabilan Frekuensi

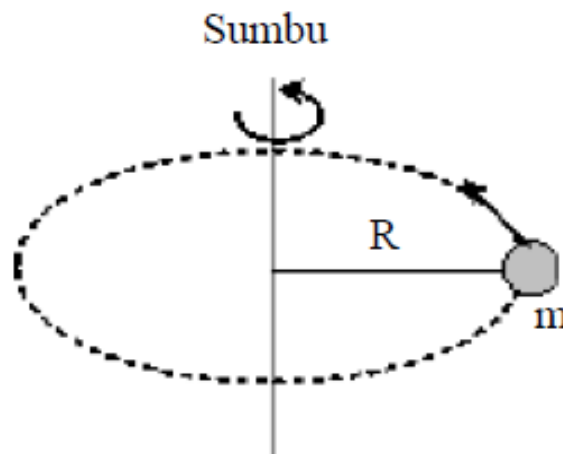
Kestabilan frekuensi merupakan kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk menjaga keseimbangan frekuensi setelah terjadi gangguan. Adapun ketidakstabilan frekuensi disebabkan oleh ketidakseimbangan antara daya pembangkitan dan beban yang disuplai. Ketidakstabilan frekuensi menjadi perhatian khusus, agar tidak terdapat

rerugi pada beban maupun pembangkitan tenaga listrik. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3, kestabilan frekuensi dapat berupa kestabilan jangka panjang maupun jangka pendek. Contoh ketidakstabilan frekuensi jangka pendek antara lain pembangkit yang bekerja secara *standalone* kemudian mengalami *underfrequency*, karena pembangkit tidak mampu memenuhi beban daya listrik total, sehingga terjadi pemadaman dalam beberapa detik di sisi pelanggan. Sedangkan pada situasi yang lebih kompleks, ketidakstabilan frekuensi disebabkan oleh *overspeed control* turbin, atau proteksi dan pengaturan dari *reactor/boiler* yang mengakibatkan sistem terganggu selama puluhan detik hingga beberapa menit merupakan contoh ketidakstabilan frekuensi jangka panjang (Tsabit Mustarin.2015).

1.5 Momen Inersia

Momen inersia adalah ukuran resistansi atau kelembapan sebuah benda terhadap perubahan dalam gerak rotasi. Momen inersia adalah sifat yang dimiliki sebuah benda untuk mempertahankan posisinya dari gerak berotasi. Suatu benda yang diam akan cenderung mempertahankan posisinya yang diam, begitu juga ketika benda bergerak maka akan tetap mempertahankan untuk berotasi atau melawan rotasi (Aidil Syawani.2016). momen inersia pada pembangkit tenaga listrik adalah ukuran kecenderungan sistem pembangkit untuk menjaga kestabilan frekuensi ketika terjadi fluktuasi beban atau gangguan dalam sistem. Dalam konteks pembangkit tenaga listrik, momen inersia terkait dengan sistem rotor pada generator. Momen inersia rotor merupakan ukuran jumlah energi kinetik yang disimpan dalam rotor saat berputar, dan berhubungan langsung dengan kemampuan sistem untuk merespons perubahan beban atau gangguan. Semakin besar momen inersia pada sistem pembangkit tenaga listrik, semakin tinggi pula kemampuan sistem untuk menjaga kestabilan frekuensi. Hal ini karena momen inersia yang besar akan membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mempengaruhi kecepatan rotasi rotor, sehingga sistem memiliki waktu yang cukup untuk merespons perubahan beban dengan mempertahankan frekuensi yang stabil. Momen inersia bergantung pada massa benda dan jarak massa benda tersebut terhadap sumbu rotasi. Jika benda berupa partikel atau titik bermassa m berotasi mengelilingi sumbu putar yang berjarak r , didefinisikan sebagai hasil kali massa dengan kuadrat jari-

jarinya. Persamaan momen inersia secara umum pada Persamaan 2.1.



Gambar 2. 4 Momen inersia

$$I = m R^2 \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.1)}$$

Keterangan:

m = Massa Benda (kg)

R = Jarak Benda Terhadap Sumbu Putar Atau Jari-Jari (m)

I = Momen Inersia (kgm²)

Persamaan 2.1 dapat disimpulkan bahwa momen inersia suatu partikel berbanding lurus dengan massa partikel dan kuadrat jarak partikel tersebut terhadap sumbu rotasinya. Dengan demikian, semakin jauh jarak poros benda (sumbu rotasinya), besar momen inersia benda tersebut akan semakin besar.

Menurut Haekal Maulana (2021) daya yang dibangkitkan selalu sama dengan daya yang dibutuhkan konsumen (beban). Ketika daya yang dibutuhkan konsumen lebih besar dari daya yang dibangkitkan generator maka frekuensi akan turun dan bila daya yang dihasilkan generator lebih besar dari daya yang dibutuhkan konsumen maka frekuensi akan bertambah besar. Pada sebuah generator, beban pada dasarnya merupakan beban listrik. Apabila beban tersebut diterjemahkan sebagai torsi, maka

torsi tersebut dapat diterjemahkan sebagai torsi elektrik sedangkan daya yang keluar atau terbangkit dari generator dapat diterjemahkan sebagai torsi mekanik. Pada pengoperasian generator dalam kondisi tetap, nilai torsi mekanik akan sama dengan nilai torsi elektrik. Prinsip dasar Persamaan putaran rotor mesin sinkron adalah momen percepatan putar (*accelerating torque*) merupakan perkalian dari momen kelembaman J (*moment of inertia*) rotor dengan percepatan sudut yang dimiliki $\frac{d^2\theta_m}{dt^2}$, Persamaan differensial dinamis rotor (Haekal Maulana.2021).

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.2)}$$

Keterangan :

- J = Momen kelembaman total massa motor (kg.m²).
- θ_m = Pergeseran sudut rotor (angular displacement) terhadap sumbu yang diam (rad).
- T_a = Momen putar percepatan bersih (Nm).
- T_m = Momen putar mekanis atau poros (penggerak) yang diberikan oleh penggerak mula dikurangi dengan momen putar perlambatan yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran (Nm).
- T_e = Momen putar elektris/elektromagnetis (Nm)

Putaran generator sinkron dapat membangkitkan torsi medan elektromagnetik pada saat berputar kecepatan sinkron atau ω_m maka $T_m = T_e$. Percepatan (*accelerating*) $T_m > T_e$ atau perlambatan (*decelerating*) $T_m < T_e$ akan terjadi akibat gangguan. Berdasarkan pada Persamaan 2.2 perubahan posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron dapat dituliskan dengan Persamaan berikut.

$$\theta_m = \omega_{sm} + \delta_m \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.3)}$$

Pergeseran daya sudut rotor atau δ_m merupakan pergeseran angular rotor yang terjadi saat sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron dalam radian.

Sedangkan Persamaan kecepatan putaran rotor ω_m maka Persamaan 2.3 dapat diturunkan terhadap waktu menjadi

$$\omega_m = \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.4)}$$

Persamaan percepatan rotornya maka Persamaan 2.4 dapat diturunkan kembali terhadap waktu menjadi

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \dots \dots \dots \text{Persamaan(2.5)}$$

substitusi Persamaan 2.5 ke dalam Persamaan 2.2 akan didapatkan

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.6)}$$

Selanjutnya dengan mengalikan Persamaan 2.6 dengan ω_m akan menghasilkan

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.7)}$$

P_m adalah daya mekanik dari masukan sedangkan P_e daya elektrik keluaran maka Persamaan daya dapat diturunkan kembali.

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \text{ (MW)} \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.8)}$$

Jika $J\omega_m$ merupakan momen sudut rotor maka dapat dinyatakan M atau konstanta inersia. Massa putar memiliki hubungan dengan energi kinetik yang dituliskan pada Persamaan berikut.

$$W_k = \frac{1}{2} \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m^2 \text{ atau } M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}^2} \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.9)}$$

Hubungan Persamaan ayunan dengan momen sudut adalah

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \text{ (MW)} \dots \dots \dots \text{persamaan (2.10)}$$

Apabila p adalah jumlah kutub dari generator sinkron, maka sudut daya listrik δ dalam hubungannya dengan sudut daya mekanik δ_m adalah sebagai berikut.

$$\delta = \frac{P}{2}\delta_m \text{ dan } \omega = \frac{P}{2}\omega_m \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.11)}$$

Persamaan ayunan dalam hubungan dengan sudut daya elektrik adalah

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.12)}$$

Jika nilai M pada Persamaan 2.9 disubstitusikan ke dalam Persamaan 2.12 akan diperoleh

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.13)}$$

Selanjutnya membagi Persamaan 2.13 dengan Sbase (SB) maka akan menghasilkan

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2W_k}{\omega_{sm}S_B} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{S_B} \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.14)}$$

Akan diperoleh Persamaan 2.15 ketika mensubstitusikan $H = W_k/S_B$ ke dalam Persamaan 2.13.

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2H}{\omega_{sm}} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e (pu) \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.15)}$$

Kecepatan putar elektrik dalam hubungannya dengan kecepatan putar mekanik adalah

$$\omega_{sm} = \frac{P}{2}\omega_s \text{ sehingga Persamaan 2.15 menjadi}$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e (pu) \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.16)}$$

Dengan mensubstitusikan $\omega = 2\pi f$ ke dalam Persamaan 2.17 akan diperoleh

$$\frac{H}{\pi f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e (pu) \dots \dots \dots \text{Persamaan (2.17)}$$

Persamaan 2.16 atau 2.17 dinamakan dengan Persamaan ayunan (*swing equation*) yang merupakan Persamaan dasar yang mengatur dinamika (gerak) perputaran mesin sinkron dalam studi kestabilan (Putri et al., n.d.2021). persamaan 2.1 sampai dengan 2.17 digunakan Ketika dalam generator terjadi gangguan pada momen inersia yang

merupakan persamaan yang mengatur dinamika (gerak) perputaran mesin sinkron dalam studi kestabilan.

1.6 Load Frequency Control (LFC)

Frekuensi merupakan sebuah parameter umum yang terdapat pada seluruh sistem tenaga listrik. Perubahan permintaan (*demand*) terhadap listrik pada satu titik apabila tidak diimbangi dengan penyesuaian pada sisi pembangkitan maka dapat mengakibatkan terjadinya perubahan frekuensi. Oleh sebab itu, perlu disediakan alokasi pada generator untuk mengantisipasi perubahan beban dari konsumen. Secara umum, tiap generator pembangkit yang terpasang telah memiliki perangkat untuk mengatur osilasi frekuensi yang diakibatkan oleh bervariasinya beban dari konsumen, yaitu *governor*. Namun dalam beberapa kasus, kinerja dari *governor* tersebut belum mampu bekerja secara optimal dan cepat. Sementara itu, tujuan dari pengaturan frekuensi adalah sebagai berikut:

1. Memberikan keseimbangan (*balance*) antara sistem pembangkitan dengan beban dari konsumen
2. Memperkecil penyimpangan frekuensi akibat adanya perubahan beban yang terjadi secara tiba-tiba supaya nilai penyimpangan tersebut dapat mendekati nol (hilang)
3. Menjaga kontinuitas penyaluran daya pada pembangkit-pembangkit yang terinterkoneksi (jika ada) agar dapat berada pada kemampuan kapasitas masing-masing generator terpasang.

Load Frequency Control (LFC) adalah sebuah mekanisme yang digunakan untuk menjaga keseimbangan antar daya yang dihasilkan dari pembangkit listrik dengan daya yang dibutuhkan oleh pelanggan. LFC merupakan salah satu aspek yang sangat penting dalam pengoperasian sistem tenaga listrik dan juga sistem control, demi terciptanya penyediaan daya yang mencukupi dan memiliki kualitas baik. Sifat dan karakteristik perubahan beban menyebabkan titik operasi dari sebuah sistem tenaga dapat berubah secara signifikan dalam penggunaan harian. Dampaknya, sistem control yang dapat bekerja optimal pada suatu kondisi operasi, belum tentu cocok digunakan dalam

kondisi yang lain (Tsabit Mustarin.2015). Dalam kontrol frekuensi beban (*Load Frequency Control*), terdapat beberapa sistem kontrol yang digunakan untuk menjaga stabilitas frekuensi pada sistem tenaga listrik. Berikut ini adalah beberapa sistem kontrol yang umum digunakan dalam *load frequency control*:

1. ***Governor Control***

Governor control adalah sistem kontrol yang digunakan untuk mengatur kecepatan rotasi generator. *Governor* ini mengontrol pasokan bahan bakar (misalnya, pada generator berbahan bakar fosil) atau sistem penggerak (misalnya, pada generator *hidro*) untuk mempertahankan kecepatan rotasi yang diinginkan. *Governor control* akan merespons perubahan beban dengan menyesuaikan aliran bahan bakar atau daya penggerak untuk menjaga kecepatan rotasi generator stabil.

2. ***Proportional-Integral-Derivative (PID) Control***

PID control adalah metode kontrol klasik yang sering digunakan dalam kontrol frekuensi beban. *PID control* menggunakan umpan balik berdasarkan perbedaan antara frekuensi aktual dan frekuensi target untuk menghasilkan sinyal kontrol yang mengatur daya *netto* yang dimasukkan atau diambil dari sistem. *PID control* terdiri dari komponen proporsional, integral, dan diferensial yang bekerja untuk menghasilkan respons yang cepat dan stabil terhadap perubahan frekuensi.

3. ***Automatic Generation Control (AGC)***

AGC adalah sistem kontrol yang digunakan dalam kordinasi beberapa generator dalam sistem tenaga listrik. *AGC* memonitor frekuensi sistem secara kontinu dan mengirim sinyal kontrol ke *governor* pada masing-masing generator untuk mengatur daya keluaran dan mempertahankan frekuensi sistem pada nilai nominal. *AGC* berfungsi untuk mengkoordinasikan operasi generator dalam sistem tenaga listrik yang lebih besar, termasuk pembagian beban antara generator-generator dan menjaga frekuensi sistem secara keseluruhan.

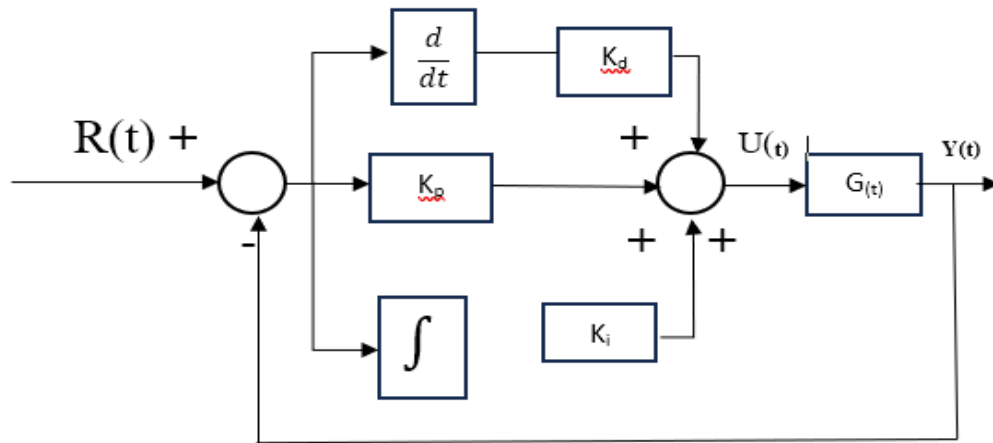
4. ***Load Shedding***

Load shedding adalah metode darurat dalam kontrol frekuensi beban yang

digunakan ketika terjadi ketidakseimbangan antara daya yang dihasilkan dan daya yang dikonsumsi dalam sistem. Ketika frekuensi turun di bawah ambang batas tertentu, sistem *load shedding* akan secara otomatis memutuskan beberapa beban non-kritis atau tidak penting untuk mengurangi beban sistem. Sistem kontrol dapat bekerja secara terpisah atau digabungkan dalam sistem kontrol yang lebih kompleks untuk mengoptimalkan stabilitas frekuensi sistem tenaga listrik. Dalam pemodelan LFC menggunakan Kontrol ***Proportional-Integral-Derivative (PID) Control***, sering digunakan dalam pengendalian frekuensi beban *load frequency control* (LFC) karena memiliki beberapa keunggulan yang membuatnya cocok untuk diaplikasikan dalam *load frequency control*.

1. Respons Proporsional: Komponen proporsional (P) dalam PID control merespons perbedaan antara frekuensi aktual dan frekuensi referensi (*setpoint*) dengan proporsional. Ini memungkinkan pengendali untuk memberikan respons yang cepat dan sebanding dengan besarnya kesalahan frekuensi. Hal ini membantu mengurangi waktu *settling* dan meningkatkan ketepatan pengendalian.
2. Penyesuaian Integral: Komponen integral (I) dalam PID control membantu menangani kesalahan frekuensi yang persisten atau biasa. Dengan menggunakan integrator, PID control dapat secara bertahap mengakumulasi kesalahan frekuensi seiring waktu dan memberikan tindakan pengendalian yang terus menerus untuk mengurangi kesalahan frekuensi secara akumulatif.
3. Penyesuaian Diferensial: Komponen diferensial (D) dalam PID control membantu mengantisipasi perubahan frekuensi yang cepat. Dengan menganalisis laju perubahan frekuensi, komponen diferensial dapat memberikan tindakan pengendalian yang cepat untuk mengurangi efek *overshoot* atau penundaan respons.
4. Stabilitas: PID kontrol diketahui memiliki sifat setabil yang baik dalam mengendalikan sistem. Dengan mengatur parameter PID yang sesuai, seperti kecepatan respon (K_p), waktu integrasi (T_i), dan waktu diferensiasi (T_d), sistem

LFC dapat tetap stabil dan terhindar dari osilasi yang tidak diinginkan. Persamaan dan gambar kendali PID kontrol dikutip dari fitria suryadini, annisa firasanti program studi teknik elektro fakultas teknik universitas islam. dalam penelitiannya yang berjudul “kendali p, pi, dan pid analog pada pengaturan kecepatan motor dc dengan penalaan ziegler-nichols”.



Gambar 2. 5 Kontrol PID

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots \text{Persamaan (2.18)}$$

dimana:

$u(t)$ = sinyal output pengendali PID

K_p = konstanta proporsional

K_i = konstanta integral

K_d = konstanta derivative

$e(t)$ = sinyal error

Salah satu Persamaan yang digunakan dalam kontrol frekuensi beban (*load frequency control*) pada sistem tenaga listrik adalah Persamaan perubahan frekuensi:

$$\Delta f = K/(2\pi H) * \Delta P \dots\dots\dots \text{Persamaan (2.19)}$$

di mana:

Δf = perubahan frekuensi sistem (dalam Hz)

K = konstanta sistem

H = momen inersia total sistem (dalam detik)

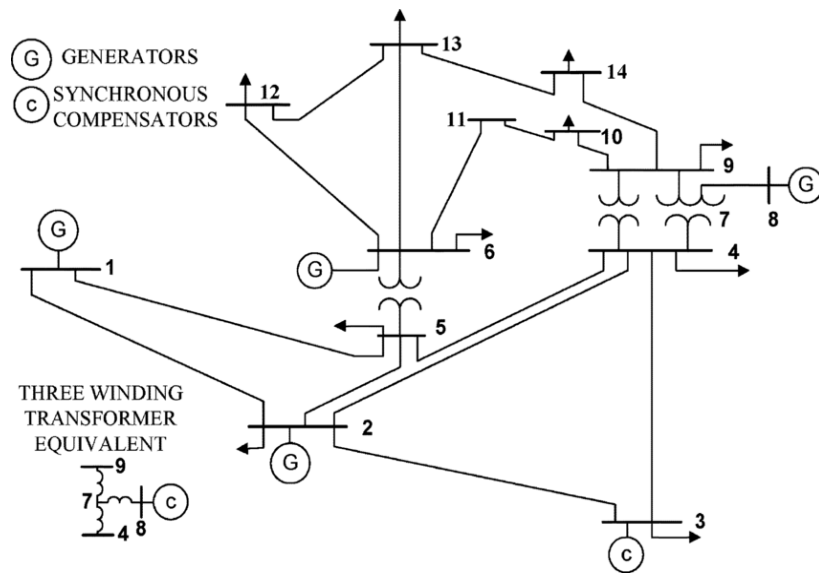
ΔP = perubahan daya netto yang dimasukkan atau diambil dari sistem (dalam Watt)

Persamaan 2.19 menggambarkan hubungan antara perubahan frekuensi sistem dengan perubahan daya *netto* yang memasuki atau ditarik dari sistem. Konstanta K bergantung pada karakteristik sistem dan parameter kontrol yang digunakan.

Dalam kontrol frekuensi beban, tujuan utamanya adalah menjaga frekuensi sistem tetap stabil (50 Hz atau 60 Hz). Dalam Persamaan 2.19, perubahan daya *netto* ΔP dapat dikendalikan untuk meminimalkan perubahan frekuensi sistem Δf . Kontrol frekuensi beban biasanya menggunakan umpan balik (*feedback*) untuk mengatur daya *netto* yang dimasukkan atau diambil dari sistem, misalnya dengan mengendalikan governor pada generator. Persamaan 2.19 adalah salah satu bentuk sederhana dari Persamaan kontrol frekuensi beban, dan ada beberapa model dan metode yang lebih kompleks yang digunakan dalam praktiknya, termasuk penggunaan pengontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*) dan algoritma kontrol yang lebih canggih.

1.7 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 14 BUS

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 14 BUS adalah sebuah sistem yang digunakan untuk suatu pembangkit listrik. Yang terdiri dari 5 generator, 11 beban, dan 14 bus. Yang dapat dilihat pada Gambar 2.6



Gambar 2. 6 Sistem daya IEEE 14-bus (Boudreaux, n.d.)

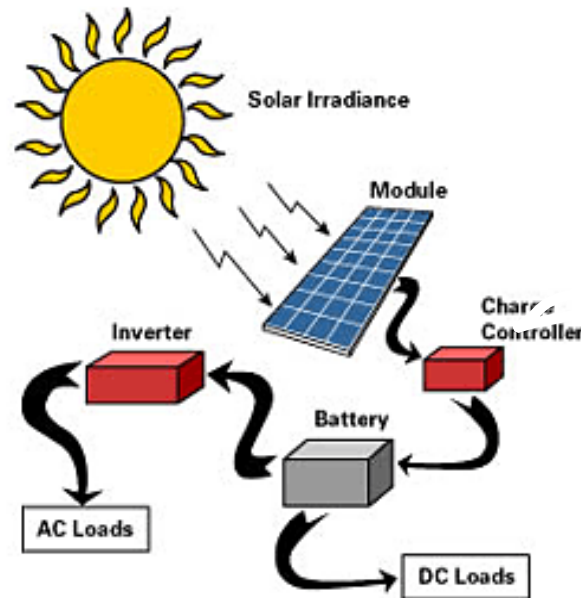
Pada Gambar 2.6 ini merupakan gambar sistem 14 bus pada sistem pembangkit tenaga listrik. Dengan kombinasi komponen-komponen tersebut, sistem IEEE 14-bus digunakan sebagai standar dalam penelitian dan pengembangan bidang pengaturan beban, analisis aliran daya, dan studi stabilitas sistem tenaga.

1.8 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan sinar matahari untuk menjadi energi listrik. PLTS sering juga disebut *Solar Cell*, atau *Solar Photovoltaik*, atau *Solar Energi*. Dengan memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik. DC (*direct current*), yang dapat diubah menjadi listrik AC (*alternating current*) apabila diperlukan. Oleh karena itu meskipun mendung, selama masih terdapat cahaya, maka PLTS dapat menghasilkan listrik. Pembangkit Listrik Tenaga Surya pada dasarnya adalah percatuan daya (alat yang menyediakan daya), dan dapat dirancang untuk mencatu kebutuhan listrik yang kecil sampai dengan besar, baik secara mandiri, maupun dengan *Hybrid* (dikombinasikan dengan sumber energi lain seperti PLTS-Genset, PLTS-Angin). Dengan komponen yang mendukung PLTS adalah panel surya, *solar charge controller*, *inverter*, baterai.

1.8.1 Cara Kerja PLTS

Pembangkit listrik tenaga surya konsepnya sederhana, yaitu mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Cahaya matahari merupakan salah satu bentuk energi dari sumber daya alam. Gambar skema cara kerja plts dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Cara kerja PLTS

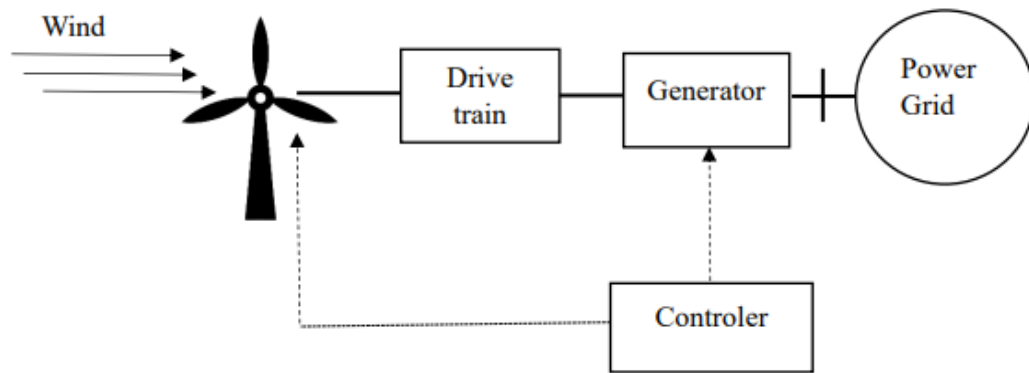
Pada Gambar 2.7 dengan memanfaatkan sinar matahari yang menyinari panel surya, kemudian akan mengalir daya listrik ke kebatrai solar charge controller, lalu ke inverter yang nantinya akan dikonversi oleh inverter dari listrik dc ke ac jika diperlukan.

1.9 Pembangkit Listrik Tenaga Angin atau Bayu (PLTB)

Pembangkit listrik tenaga angin atau bayu ini adalah sistem pembangkit listrik yang menggunakan energi angin sebagai sumber utama untuk menghasilkan energi listrik.

1.9.1 Cara Kerja (PLTB)

Cara kerja pembangkit yang sering dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) cukup sederhana. Energi angin yang memutar kincir diteruskan untuk memutar baling-baling pada generator di bagian belakang kincir angin, sehingga menghasilkan energi listrik.



Gambar 2. 8 Skema cara kerja PLTB

Pada Gambar 2.8 skema cara kerja PLTB dengan menggunakan energi angin untuk menghasilkan energi listrik. PLTB memiliki rotor yang terdiri dari baling-baling (biasanya tiga atau lebih) yang dipasang di ujung sumbu yang berputar. Baling-baling dirancang untuk menangkap energi angin dan mengubahnya menjadi gerakan rotasi.