



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas) merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan gas untuk memutar turbin dan generator. Turbin dan generator adalah dua benda dengan satu poros yang sama, jadi jika turbin berputar secara otomatis maka generator akan ikut berputar. Dan jika generator berputar, maka generator akan menghasilkan beda potensial pada medan magnetnya yang akan menghasilkan energi listrik.

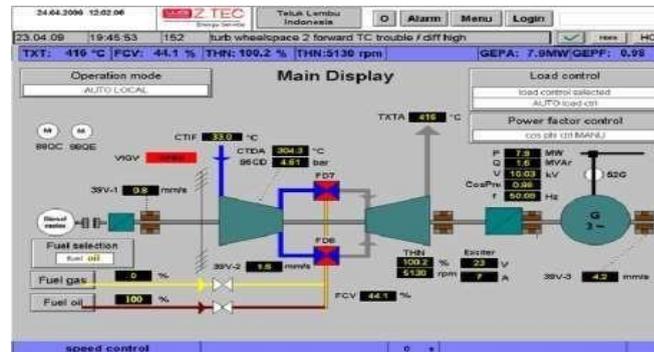
Dalam pengoperasiannya PLTG, secara prinsip hampir sama dengan PLTU. Hanya saja uap yang menjadi bahan bakar di PLTU di ganti dengan gas. Karena karakteristik uap dan gas secara umum berbeda, maka akan ada beberapa prinsip dasar yang berbeda antara turbin uap dan turbin gas. Selain itu, gas yang dipakai dalam PLTG bisa dibilang lebih mudah untuk disiapkan dari uap, sehingga sebuah PLTG bisa mulai berproduksi dari keadaan dingin dalam hitungan menit.

Satu yang menarik pada PLTG adalah gas yang keluar dari turbin biasanya masih cukup panas. Cukup panas` sehingga bila PLTG disebelah PLTU maka gas hasil proses di PLTG masih dapat digunakan untuk memanaskan boiler kepunyaan PLTU. Inilah kemudian dikenal dengan *combine cycle*, sebuah pembangkit yang terdiri dari komponen utama PLTG terdiri atas beberapa peralatan yang satu dengan yang lainnya terintegrasi sehingga menjadi satu unit lengkap yang dapat dioperasikan sebagaimana mestinya PLTG dan PLTGU.

Sebagai mesin pembangkit, sistem PLTG merupakan gabungan dari beberapa sub sistem yang bekerja secara terpadu sedemikian rupa sehingga PLTG mampu mengonversikan energi yang terkandung dalam bahan bakar dan udara menjadi energi listrik yang akan disalurkan ke konsumen. Pada umumnya PLTG memerlukan alat pemutar awal (*starting device*) untuk menjalankannya. *Starting device* dapat berupa mesin *diesel*, dan motor listrik. Fungsi dari *starting device* adalah untuk memutar kompresor pada saat *start up* untuk menghasilkan udara



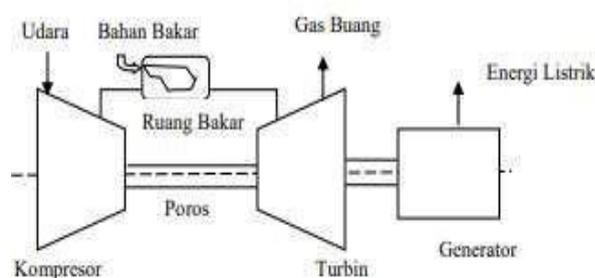
bertekanan sebelum masuk ke ruang pembakaran. Sistem PLTG seperti pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Sistem PLTG

2.1.1 Prinsip Kerja PLTG

Gambar 2.2 menunjukkan prinsip kerja PLTG. Udara masuk ke kompresor untuk dinaikkan tekanannya menjadi kira-kira 13 kg/cm^2 . Kemudian udara tersebut dialirkan ke ruang bakar. Dalam suatu ruang bakar udara bertekanan tadi dicampur dengan bahan bakar dan dibakar. Apabila digunakan bahan bakar gas (BBG), maka gas dapat langsung dicampur dengan udara untuk dibakar, tetapi apabila digunakan bahan bakar minyak (BBM), maka BBM ini harus dijadikan kabut terlebih kemudian baru dicampur dengan udara untuk dibakar. Teknik mencampurkan bahan bakar dengan udara dalam ruangan bakar sangat mempengaruhi efisiensi pembakaran (Marsudi,2011).¹



Gambar 2. 2 Prinsip kerja PLTG

Pembakaran bahan bakar dalam ruang bakar menghasilkan gas bersuhu tinggi kira-kira 1300°C dengan tekanan 13 kg/cm^2 . Gas hasil pembakaran ini

¹ Marsudi, Dijiteng, 2011, pembangkitan Energi Listrik Edisi Kedua Erlangga, Jakarta



kemudian dialirkan menuju turbin untuk disemprotkan kepada sudu-sudu turbin sehingga energy (*enthalpy*) gas ini dikonversikan menjadi energi mekanik dalam turbin penggerak generator (dan kompresor udara) dan akhirnya generator menghasilkan tenaga listrik. Karena pembakaran yang terjadi pada turbin gas mencapai suhu sekitar 1300° C maka sudu-sudu turbin beserta porosnya perlu didinginkan dengan udara

Selain masalah pendinginan, operasi turbin gas yang menggunakan gas hasil pembakaran dengan suhu 1300° C memberikan resiko korosi tinggi, yaitu bereaksinya logam kalium, vanadium, dan natrium yang terkandung di dalam bahan bakar dengan bagian-bagian turbin seperti sudu dan saluran gas (*hot gas path*). Oleh karena itu, bahan bakar yang digunakan tidak boleh mengandung logam-logam tersebut diatas melebihi batas tertentu. Kebanyakan pabrik pembuat turbin gas mensyaratkan bahan bakar dengan kandungan logam kalium, vanadium, dan natrium tidak boleh melampaui 1 part per mil (ppm). Di indonesia BBM yang bisa memenuhi syarat ini hanya minyak solar (High Speed Diesel) dan BBG gas juga memenuhi persyaratan di atas (Marsudi,2011).¹

2.1.2 Komponen Utama dan Komponen Pendukung PLTG

Turbin gas tersusun atas komponen-komponen utama seperti air inlet section, compressor section, combustion section, turbine section, dan exhaust section. Sedangkan komponen pendukung turbin gas adalah starting equipment, coupling dan accessory gear, fuel system, lube oil system, cooling system, dan beberapa komponen pendukung lainnya (Sumitomo, 1980). Berikut ini penjelasan tentang komponen utama turbin gas:²

1. Air Inlet

¹ Marsudi, Dijiteng, 2011, pembangkitan Energi Listrik Edisi Kedua Erlangga, Jakarta

² Sumitomo, 1980, MS-9000 service manual Inspection and Maintenance Vol. III, General Electric Company, Perpustakaan PT PJB Muara Karang



Salah satu hal yang perlu diperhatikan untuk menjaga *performance* gas turbin adalah menjaga kualitas udara masuk. *Inlet Air Filter* (IAF) pada *inlet air section* memiliki peranan yang sangat penting untuk menjaga kualitas dan kuantitas udara masuk (Puslitbang, 2015)¹.

Air Inlet berfungsi untuk menyaring kotoran dan debu yang terbawa dalam udara sebelum masuk ke kompressor. Bagian ini terdiri dari:

- a. Air Intel Housing, merupakan tempat udara masuk dimana didalamnya terdapat beberapa peralatan pembersih udara seperti inertia separator, filter dan lain-lain.
- b. Inertia Seperator, berfungsi untuk membersihkan debu-debu atau partikel yang terbawa bersama udara masuk.
- c. Pre Filter, merupakan penyaringan udara yang dipasang pada intel house pada bagian luar sebelum memasuki main filter.
- d. Main Filter, merupakan penyaringan utama yang terdapat pada bagian dalam intel house, udara yang telah melewati penyaring ini masuk ke dalam kompresor aksial.
- e. Intel Belmouth, berfungsi untuk membagi udara agar merata pada saat memasuki ruang kompresor.
- f. Intel Guide vane, yaitu blade yang dapat dibuka dan di tutup sehingga jumlah udara yang masuk ruangan kompresor dapat diatur sesuai dengan kebutuhan energi yang diperlukan (Purwanto,2012).²

Salah satu hal yang perlu diperhatikan untuk menjaga *performance* gas turbin adalah menjaga kualitas udara masuk. Intel Air Filter (IAF) pada intel air section memiliki peranan yang sangat penting untuk menjaga kualitas dan kuantitas udara masuk (Puslitbang,2012).³

¹ PT PLN Puslitbang, 2015 Lapangan Teknik Major Inspection & Relokasi PLTG sunyaragi Unit 1 Cirebon Jabar-Duri Riau, Maintenace service, Jakarta Barat

² Purwanto, edi 2012, analisa Vibrasi Turbin Pltg duri uit 2, PT PLN (Persero) Jakarta

³ PT PLN Puslitbang, 2012 Lapangan Teknik Major Inspection & Relokasi PLTG sunyaragi Unit 1 Cirebon Jabar-Duri Riau, Maintenace service, Jakarta Barat



2. Compressor Section

Komponen utama pada bagian ini adalah aksial flow compressor, berfungsi untuk mengkompresikan udara yang berasal dari inlet air section hingga bertekanan tinggi sehingga pada saat terjadi pembakaran dapat menghasilkan gas panas berkecepatan tinggi yang dapat menimbulkan daya output turbin yang besar. Aksial flow compressor terdiri dari dua bagian yaitu:

a. Compressor Rotor Assembly.

Merupakan bagian dari kompresor aksial yang berputar pada porosnya. Rotor ini memiliki 17 tingkat sudu yang mengompresikan aliran udara secara aksial dari 1 atm menjadi 17 kalinya 8 sehingga diperoleh udara yang bertekanan tinggi. Bagian ini tersusun dari wheels, stubshaft, tie bolt dan sudu-sudu yang disusun kosentris di sekeliling sumbu rotor

b. Compressor Stator

Merupakan bagian dari casing gas turbin yang terdiri dari:

- Inlet Casing, merupakan bagian dari casing yang mengarahkan udara masuk ke inlet bellmouth dan selanjutnya masuk ke inlet guide vane.
- Forward Compressor Casing, bagian casing yang didalamnya terdapat empat stage kompresor blade.
- Aft Casing, bagian casing yang didalamnya terdapat compressor blade tingkat 5-10.
- Discharge Casing, merupakan bagian casing yang berfungsi sebagai tempat keluarnya udara yang telah dikompresi

3. Combustion Section

Pada bagian ini terjadi proses pembakaran antara bahan bakar dengan fluida kerja yang berupa udara bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi. Hasil pembakaran ini berupa energi panas yang diubah menjadi energi kinetik dengan mengarahkan udara panas tersebut ke transition pieces yang juga berfungsi sebagai nozzle. Fungsi dari keseluruhan sistem adalah untuk mensuplai energi panas ke siklus turbin. Sistem pembakaran ini terdiri dari komponen-komponen berikut yang jumlahnya



bervariasi tergantung besar frame dan penggunaan turbin gas. Komponen-komponen itu adalah :

- Combustion Chamber, berfungsi sebagai tempat terjadinya pencampuran antara udara yang telah dikompresi dengan bahan bakar yang masuk.
- Combustion Liners, terdapat didalam combustion chamber yang berfungsi sebagai tempat berlangsungnya pembakaran.
- Fuel Nozzle, berfungsi sebagai tempat masuknya bahan bakar ke dalam combustion liner.
- Ignitors (Spark Plug), berfungsi untuk memercikkan bunga api ke dalam combustion chamber sehingga campuran bahan bakar dan udara dapat terbakar.
- Transition Pieces, berfungsi untuk mengarahkan dan membentuk aliran gas panas agar sesuai dengan ukuran nozzle dan sudu-sudu turbin gas.
- Cross Fire Tubes, berfungsi untuk meratakan nyala api pada semua combustion chamber.
- Flame Detector, merupakan alat yang dipasang untuk mendeteksi proses pembakaran terjadi.

4. Turbin Section

Turbin merupakan tempat terjadinya konversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang digunakan sebagai penggerak kompresor aksial dan perlengkapan lainnya. Dari daya total yang dihasilkan kira-kira 60% digunakan untuk memutar kompresornya sendiri, dan sisanya digunakan untuk kerja yang dibutuhkan (Purwanto, 2012)¹.

Komponen-komponen pada turbin section adalah sebagai berikut :

- Turbin Rotor Case
- First Stage Nozzle, yang berfungsi untuk mengarahkan gas panas ke first stage turbine wheel.

¹ Purwanto, edi 2012, analisa Vibrasi Turbin Pltg dari uit 2, PT PLN (Persero) Jakarta



- First Stage Turbine Wheel, berfungsi untuk mengkonversikan energi kinetik dari aliran udara yang berkecepatan tinggi menjadi energi mekanik berupa putaran rotor.
- Second Stage Nozzle dan Diafragma, berfungsi untuk mengatur aliran gas panas ke second stage turbine wheel, sedangkan diafragma berfungsi untuk memisahkan kedua turbin wheel.
- Second Stage Turbine, berfungsi untuk memanfaatkan energi kinetik yang masih cukup besar dari first stage turbine untuk menghasilkan kecepatan putar rotor yang lebih besar.

5. Exhaust Section

Exhaust section adalah bagian akhir turbin gas yang berfungsi sebagai saluran pembuangan gas panas sisa yang keluar dari turbin gas. Exhaust section terdiri dari beberapa bagian yaitu : Exhaust Frame Assembly dan Exhaust gas keluar dari turbin gas melalui exhaust diffuser pada exhaust frame assembly, lalu mengalir ke exhaust plenum dan kemudian didifusikan dan dibuang ke atmosfer melalui exhaust stack, sebelum dibuang ke atmosfer gas panas sisa tersebut diukur dengan exhaust thermocouple dimana hasil pengukuran ini digunakan juga untuk data pengontrolan temperatur dan proteksi temperatur trip. Pada exhaust area terdapat 18 buah termokopel yaitu, 12 buah untuk temperatur kontrol dan 6 buah untuk temperatur trip.

6. Generator

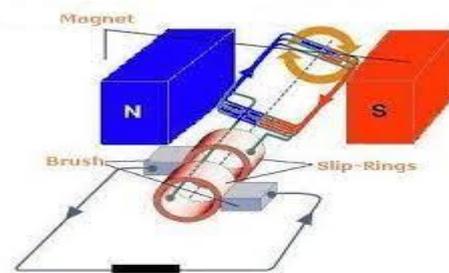
Generator merupakan suatu peralatan yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanik di peroleh dari energi mekanik yang dihasilkan oleh putaran turbin, selanjutnya energi mekanik tersebut digunakan untuk memutar poros rotor generator, selanjutnya dari putaran poros rotor generator ini menghasilkan energi listrik.

Prinsip kerja dari generator sesuai dengan hukum Lens, yaitu arus listrik yang diberikan pada stator akan menimbulkan momen elektromagnetik yang bersifat melawan putaran rotor sehingga menimbulkan EMF pada kumparan rotor, pada generator terdapat generator ac dan generator dc :



a. Generator AC

Generator arus bolak-balik yang kadang-kadang disebut dengan generator sinkron atau alternator adalah sebuah peralatan listrik yang berfungsi untuk mengubah energi gerak (mekanis) menjadi energi listrik AC dimana kecepatan putaran medan dan kecepatan putaran rotornya sama atau tidak ada slip. Kumparan medan pada generator sinkron terletak pada rotornya sedangkan kumparan jangkarnya terletak pada stator. Berikut contoh generator AC yang ditunjukkan pada gambar 2.3 di bawah ini:



Gambar 2. 3Generator AC

Pada mesin arus searah, kumparan medan yang berbentuk kutub sepatu merupakan stator (bagian tidak berputar) dan kumparan jangkar merupakan rotor (bagian yang berputar) bila kumparan jangkar berputar dalam medan magnet, akan dibangkitkan tegangan (ggl) yang berubah-ubah arah setiap setengah putaran, sehingga merupakan tegangan arus bolak-balik. Untuk tegangan arus searah diperlukan alat penyearah yang disebut komutator dan sikat.

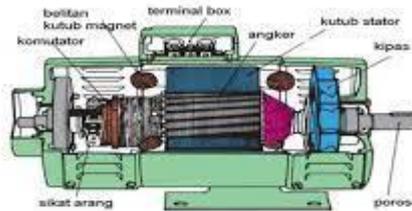
b. Generator DC

Generator DC merupakan sebuah perangkat mesin listrik dinamis yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Prinsip pembangkitan tegangan induksi oleh sebuah generator diperoleh melalui dua cara:

- Dengan menggunakan cincin-seret, menghasilkan tegangan induksi bolak-balik
- Dengan menggunakan komutator, menghasilkan tegangan DC



Generator DC



Gambar 2. 4 Generator DC

7. Sistem Bahan Bakar

Pada PLTG sistem bahan bakar merupakan salah satu sistem yang vital peranannya. Bahan bakar merupakan fluida di samping fluida udara yang nantinya akan diubah energinya sehingga kombinasi antara bahan bakar dan udara akan menghasilkan energi yang mampu memutar turbin. Pada PLTG ada dua jenis bahan bakar yang dapat digunakan yakni bahan bakar cair dan bahan bakar gas.

8. Sistem Pelumasan

Sistem pelumasan pada PLTG merupakan suatu sistem pada PLTG yang mendistribusikan minyak pelumas ke bearing dan untuk supply ke power oil system dan jacking oil system. Adapun minyak pelumas memiliki fungsi sebagai pendingin, perapat, peredam kejut, dan untuk mengurangi korosi.

9. Sistem Air Pendingin

Sistem air pendingin merupakan subsistem PLTG yang mendinginkan beberapa komponen PLTG diantaranya diesel start, lube oil heat exchanger, dan pre cooler. Prinsip kerja sistem air pendingin ini adalah menyirkulasikan air yang berada pada tangki air utama menuju komponen-komponen yang membutuhkan air pendingin seperti yang disebutkan di atas. Air yang telah digunakan untuk mendinginkan komponen-komponen tersebut kemudian didinginkan kembali oleh radiator.

10. Sistem Udara pendingin dan perapat

Di samping menghasilkan udara bertekanan, kompresor juga menghasilkan udara pendingin dan perapat. Udara tersebut digunakan untuk mendinginkan rotor,

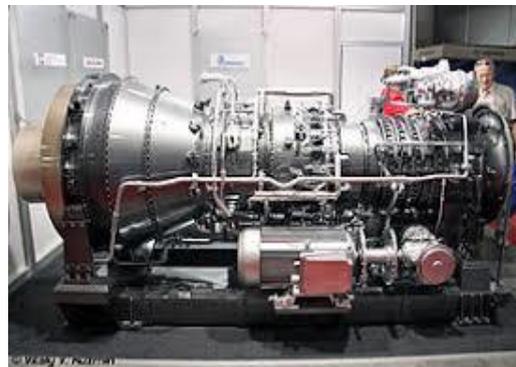


poros, komponen ruang pembakaran, perapat pada inlet kompresor, dan perapat pada bearing mencegah udara panas masuk ke bagian dalam bearing.

11. Turbin

Turbin adalah sebuah mesin berputar yang mengambil energi dari aliran fluida. Turbin sederhana memiliki satu bagian yang bergerak, “asembli rotorblade” fluida yang bergerak menjadikan baling-baling berputar dan menghasilkan energi untuk menggerakkan rotor. Contoh turbin awal adalah kincir angin dan roda air.

Turbin gas, uap dan air biasanya memiliki “casing” sekitar baling-baling yang memfokus dan mengontrol fluid. “casing” dan baling-baling mungkin memiliki geometri variabel yang dapat membuat operasi efisien untuk beberapa kondisi aliran fluida, gambaran generator turbin secara umum dapat dilihat pada gambar 2.5 di bawah ini:



Gambar 2. 5 Turbin Gas

2.1.3 Proses Pengoperasian PLTG

Proses yang terjadi pada PLTG saat start up adalah sebagai berikut :

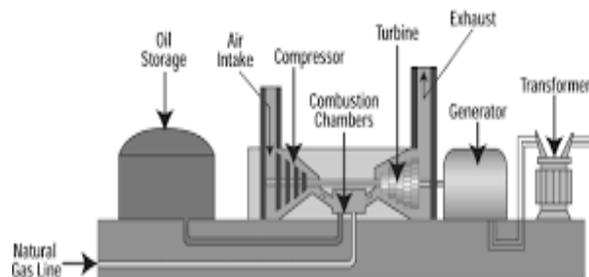
- a. Persiapan dan pemeriksaan sebelum start.
- b. Ready to start
- c. Starting device energized, terhubung ke turbin dan start
- d. Bahan bakar diinjeksikan ke ruang bakar dan terjadi penyalaan.
- e. Periode warming up, bahan bakar ditambah dan putaran naik
- f. PLTG mampu berputar sendiri, starting device akan lepas dan berhenti.
- g. Putaran bertambah dan mencapai Full Speed No Load (FSNL)
- h. Sinkronisasi generator



i. Pembebanan

2.1.4 Prinsip Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

Turbin gas suatu PLTG berfungsi untuk mengubah energi yang terkandung di dalam bahan bakar menjadi mekanis. Fluida kerja untuk memutar turbin gas adalah gas panas yang diperoleh dari proses pembakaran. Proses pembakaran memerlukan tiga unsur utama yaitu bahan bakar, udara dan panas. Skema proses pembangkitan generator turbin gas (GTG) dapat dilihat pada gambar 2.6 di bawah ini:



Gambar 2. 6 Skema Proses Pembangkitan Generator Turbin Gas

Udara masuk kedalam kompresor melalui saluran masuk udara (Air Intake). Kompresor berfungsi untuk menghisap dan menaikkan tekanan udara tersebut, sehingga temperatur udara juga meningkat. Kemudian udara bertekanan ini masuk kedalam ruang bakar (Combustion Chamber). Di dalam ruang bakar dilakukan proses pembakaran dengan cara mencampurkan udara bertekanan dan bahan bakar. Dalam proses pembakaran ini bahan bakar disuplai oleh pompa bahan bakar (Fuel Oil pump) apabila digunakan bahan bakar minyak, atau oleh kompresor gas apabila menggunakan bahan bakar gas alam. Pada umumnya kompresor gas disediakan oleh pemasok gas tersebut.

Proses pembakaran tersebut berlangsung dalam keadaan tekanan konstan sehingga dapat dikatakan ruang bakar hanya untuk menaikkan temperatur. Gas hasil pembakaran tersebut dialirkan ke turbin gas melalui suatu nozel yang berfungsi untuk mengarahkan aliran tersebut ke sudu-sudu turbin. Daya yang dihasilkan oleh turbin gas tersebut digunakan untuk memutar kompresornya sendiri dan memutar



beban lainnya seperti generator listrik. Setelah melewati turbin ini gas tersebut akan dibuang keluar melalui saluran buang (exhaust).

Secara umum proses yang terjadi pada suatu sistem turbin gas adalah sebagai berikut:

1. Pemampatan (compression) udara di hisap dan dimampatkan
2. Pembakaran (combustion) bahan bakar dicampurkan ke dalam ruang bakar dengan udara kemudian di bakar.
3. Pemuaian (expansion) gas hasil pembakaran memuai dan mengalir ke luar melalui nozel (nozzle).
4. Pembuangan gas (exhaust) gas hasil pembakaran dikeluarkan lewat saluran pembuangan.

Pada kenyataannya, tidak ada proses yang selalu ideal, tetap terjadi kerugian-kerugian yang dapat menyebabkan turunnya daya yang dihasilkan oleh turbin gas dan berakibat pada menurunnya performa turbin gas itu sendiri. Kerugian-kerugian tersebut dapat terjadi pada ketiga komponen sistem turbin gas. Sebab-sebab terjadinya kerugian antara lain:

1. Adanya gesekan fluida yang menyebabkan terjadinya kerugian tekanan (pressure losses) di ruang bakar.
2. Adanya kerja yang berlebih waktu proses kompresi yang menyebabkan terjadinya gesekan antara bantalan turbin dengan angin.
3. Berubahnya nilai C_p dari fluida kerja akibat terjadinya perubahan temperatur dan perubahan komposisi kimia dari fluida kerja.
4. Adanya mechanical loss.

2.1.5 Keunggulan Dan Kelemahan PLTG

Dari segi operasi, unit PLTG tergolong unit yang masa startnya singkat yaitu sekitar 15 ~ 30 menit dan umumnya dapat distart tanpa pasokan daya listrik dari luar, karena menggunakan mesin diesel sebagai penggerak awalnya. (Diesel engine motor start). Dari segi pemeliharaan, unit PLTG mempunyai selang waktu pemeliharaan (time between overhaul) yang pendek yaitu sekitar 4000 ~ 5000 jam



operasi. Selain ukuran jam operasi juga dapat dipakai jumlah start-stop sebagai acuan dalam penentuan waktu overhaul. Jadi walaupun belum mencapai 5000 jam operasi tetapi telah mencapai 300 kali start-stop maka unit PLTG tersebut sudah harus di-inspeksi untuk pemeliharaan. Dalam proses inspeksi, hal-hal yang perlu diperhatikan adalah bagian-bagian yang terkena aliran gas hasil pembakaran yang suhunya bisa mencapai 1.300 oC seperti ruang bakar, saluran gas panas (hot-gas-path) dan juga sudu-sudu turbin. Bagian-bagian ini umumnya mengalami kerusakan (retak) sehingga perlu dilas atau diganti bila perlu.

Proses start-stop akan mempercepat proses kerusakan (keretakan) karena proses start-stop menyebabkan proses pemuaihan dan pengerutan yang tidak kecil pada bagian-bagian yang disebutkan di atas. Hal ini disebabkan sewaktu unit PLTG dingin suhunya sama dengan suhu ruangan yaitu sekitar 30 oC namun pada saat beroperasi suhunya dapat mencapai hingga 1.300 oC, demikian pula sebaliknya. Pada saat unit PLTG shutdown, porosnya harus tetap diputar secara perlahan untuk menghindari terjadinya pembengkokan pada poros hingga suhunya dianggap cukup aman untuk itu. Dengan memperhatikan buku petunjuk dari pabrik, ada unit PLTG boleh dibebani lebih tinggi 10% dari ratingnya untuk waktu 2 jam yang diistilahkan sebagai Peak Operation. Pengoperasian dalam kondisi seperti ini perlu diperhitungkan sebagai proses pemendekan selang waktu inspeksi dan pemeliharaan karena peak operation ini menambah keausan yang terjadi pada turbin sebagai akibat kenaikan suhu operasi.

Dari segi aspek lingkungan, yang perlu mendapat perhatian adalah masalah kebisingan, jangan sampai melebihi ambang batas yang diizinkan. Masalah lainnya adalah masalah kebocoran instalasi bahan bakar yang perlu mendapat perhatian khususnya dari bahaya kebakaran.

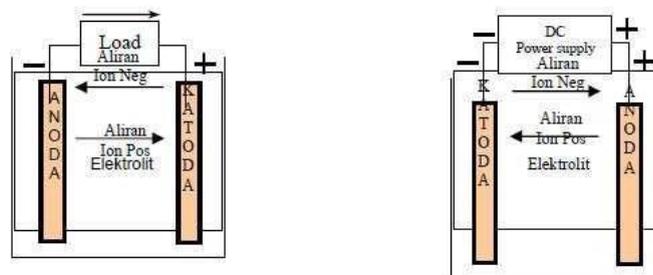
Unit PLTG umumnya merupakan unit pembangkit dengan efisiensi yang paling rendah, yaitu sekitar 15 ~ 25 % saja. Sementara ini sedang dikembangkan penggunaan Aero Derivative Gas Turbine yaitu turbin gas pesawat terbang yang dimodifikasi menjadi turbin penggerak generator. Hal ini dilakukan karena untuk daya output yang sama diperoleh dimensi yang lebih kecil.



2.2 Baterai

2.2.1 Sistem Baterai

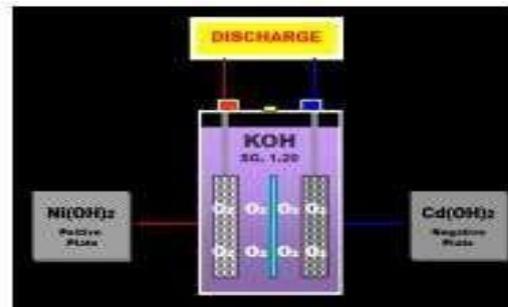
Baterai merupakan suatu sel listrik yang terdiri dari dua macam plat elektroda yaitu elektroda positif dan elektroda negative serta larutan elektrolit sebagai media penghantar didalamnya yang dapat menghasilkan energi listrik dari adanya proses elektrokimia berasal dari ketiga komponen baterai tersebut. Proses elektrokimia yang terjadi pada baterai adalah dapat berkebalikan yang berarti terdapat 2 kondisi yang dialami baterai yaitu proses dimana energi kimia yang dikonversikan menjadi energi listrik (*discharging*) dan proses energi listrik yang dikonversikan menjadi energi kimia (*charging*). Proses *charging* dan *discharging* yang berlangsung dilakukan dengan cara regenerasi dari elektroda-elektroda yang digunakan, dimana arus listrik akan dialirkan pada polaritas yang berlainan..



Gambar 2. 7 Proses Charging dan Discharging

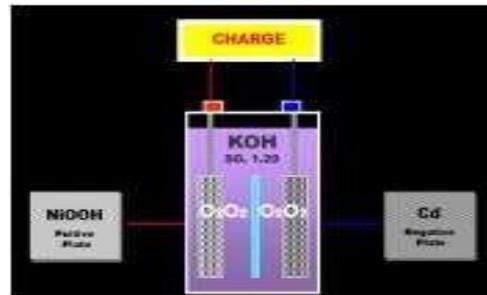
2.2.2 Prinsip Kerja Baterai

- a. Elektroda pada baterai terdiri dari elektroda positif dan elektroda negative. Ketika proses pengosongan (*discharging*) seperti yang terlihat pada skema di bawah Saat sel baterai dihubungkan dengan beban maka, elektron akan mengalir dari elektroda negatif (anoda) melewati beban menuju elektroda positif (katoda) baterai, kemudia ion-ion negatif mengalir ke elektroda negatif (anoda) dan ion-ion positif mengalir ke elektroda positif (katoda).



Gambar 2. 8 Discharging / Pengosongan

- b. Pada proses pengisian di bawah. Bila sel dihubungkan dengan suplai maka, elektroda positif menjadi anoda dan elektroda negatif menjadi katoda dan proses kimia yang terjadi adalah sebagai berikut:
- Aliran electron menjadi terbalik, mengalir dari anoda melalui power suplai ke katoda.
 - Ion-ion negatif mengalir dari katoda ke anoda.
 - Ion-ion positif mengalir dari anoda ke katoda



Gambar 2. 9 Charging / Pengisian

2.2.3 Jenis-jenis Baterai

a. Baterai Asam

Baterai asam timbal merupakan jenis baterai isi ulang pertama yang ditemukan oleh fisikawan Prancis Gaston Plante pada tahun 1859. Meskipun baterai ini tidak cocok untuk menyimpan banyak energi (karena rasio energi:berat yang kecil), baterai ini memiliki lonjakan arus yang tinggi ketika pertama kali dinyalakan (*inrush current*). Akibat sifat ini, baterai ini digunakan pada kendaraan bermotor untuk menyediakan arus tinggi saat proses menyalakan mesin (*starter*).



Karena baterai jenis ini lebih murah dibanding dengan baterai yang berteknologi lebih baru, baterai asam timbal banyak digunakan (meskipun *inrush current* tidak terlalu dibutuhkan, ataupun baterai jenis lain memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi). Baterai asam timbal digunakan sebagai sumber listrik cadangan pada tower BTS, rumah sakit, dan pembangkit

Baterai asam bahan elektrolitnya adalah larutan asam belerang (sulphuric acid = H_2SO_4). Didalam baterai asam elektroda-elektrodanya terdiri dari plat-plat timah peroksida PbO_2 (lead peroxide) sebagai anoda (kutub positif) dan timah murni Pb (lead sponge) sebagai katoda (kutubnegatif).



Gambar 2. 10 Baterai Asam

Ciri-ciri umum Baterei Asam (tergantung pabrik pembuat) sebagai berikut:

- Tegangan nominal per sel 2 volt
- Nilai berat jenis elektrolit sebanding dengan kapasitas baterei semakin tinggi suhu elektrolit maka semakin rendah berat jenisnya dan sebaliknya.
- Nilai standar berat jenis elektrolit tergantung pada pabrik pembuatnya.
- Umur tegangan tergantung pada operasi dan pemeliharaan
- Tegangan pengisian per sel
- Tegangan akhir pengosong per sel (discharge) 2,0-1,8 volt.
 - Pengisian secara terapung (floating) 2,10-2,20 volt.
 - Pengisian secara cepat (equalizing) 2,25-2,30 volt.
 - Pengisian dengan harga tinggi (boosting) 2,35-2,40 volt.

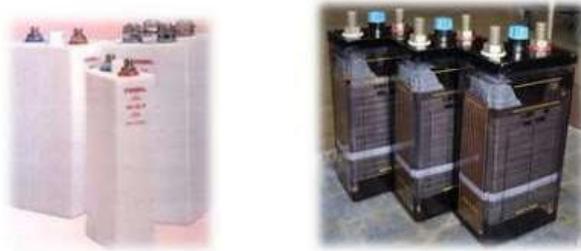
b. Baterai Alkali

Baterai alkali bahan elektrolitnya adalah larutan alkali (potassium



hidroxide) terdiri dari:

- Nickel-Iron Alkaline Baterai (Ni-Fe baterai)
- Nickel Cadium Alkaline Baterai (Ni-Cd baterai)



Gambar 2. 11 Baterai Alkali

Umum yang banyak diinstalasi PLN adalah baterai alkali nickel- cadmium (Ni-Cd). Ciri-ciri umum (tergantung pabrik pembuatnya)

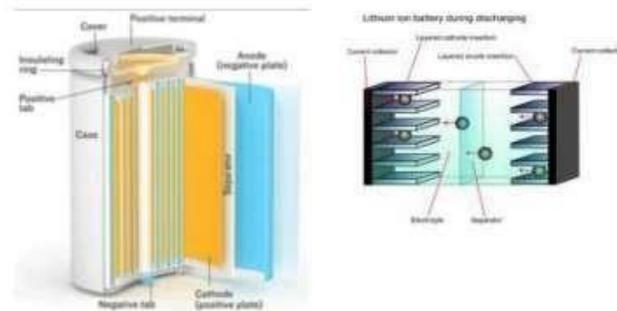
- Tegangan secara terapung (floating) 1,40-1,44 volt
- Nilai berat jenis elektrolitnya tidak sebanding dengan kapasitas baterei
- Umur baterei tergantung pada operasi dan pemeliharaan
- Tegangan pengosongan akhir (end voltage) per sel 1 volt
- Tegangan pengisian
 - Pengisian secara terapung (floating) 1,40-1,44 volt
 - Pengisian secara cepat (equalizing) 1,50-1,60 volt
 - Pengisian dengan harga tinggi (boosting) 1,65-1,70 volt

c. Baterai Kering/ Lithium

Baterai kering / lithium adalah baterai yang digerakan oleh ion lithium. Anoda dan katoda baterai lithium-ion terbuat dari karbon dan oksida lithium. Sedangkan elektrolit terbuat dari garam lithium yang dilarutkan dalam pelarut organik. Bahan pembuat anoda sebagai besar merupakan garfit sedangkan katoda terbuat dari salah satu bahan berikut:lithium kobalt oksida (LiCoO_2) lithium besi fosfat (LiFePO_4) atau lithium oksida mangan (LiMn_2O_4). Elektrolit yang umum digunakan adalah garam lithium seperti lithium hexafluorophosphate (LiPF_6)



lithium tetrafluoroborate (LiBF_4), dan lithium perklorat (LiClO_4) yang dilarutkan dalam pelarut organik seperti etilen karbonat, dimetil karbonat, dan dietil karbonat.



Gambar 2. 12 Baterai Kering/ Lithium

2. 2.4 Bagian Utama Baterai

a. Elektroda

Tiap sel baterai terdiri dari 2 (dua) elektroda, yaitu elektroda positif dan negatif, direndam dalam suatu larutan kimia yang berfungsi sebagai media perpindahan elektron pada saat berlangsung *charge discharge*.

Elektroda positif dan negatif tersusun dari beberapa *Grid* yang berupa rangka besi berfungsi sebagai tempat material aktif. Material aktif berfungsi sebagai material yang bereaksi secara kimia untuk menghasilkan energi listrik.



Gambar 2. 13 a) Plat Grid, b) Material Aktif, c) Grid Rangka Besi, d) Terakit Dalam Plastic Container

b. Elektrolit



Elektrolit adalah cairan atau larutan senyawa kimia yang berfungsi menghantarkan arus listrik, larutan tersebut dapat menghasilkan muatan listrik positif dan negatif. Bagian yang bermuatan positif tersebut ion positif dan bagian yang bermuatan negatif disebut ion negatif. Sel Baterai berfungsi sebagai tempat untuk menyimpan elektrolit dan elektroda. Bahan bejana (*container*) yang digunakan terdiri dari 2 (dua) macam:

1. Larutan asam sulfat (H_2SO_4) digunakan pada baterai asam.
2. Larutan kalium hidroksida (KOH) digunakan pada baterai alkali.

c. Sel Baeterei

Sel baterai berfungsi sebagai tempat untuk menyimpan elektrolit dan elektroda. Bahan bejana (*container*) yang digunakan terdiri dari 2 (dua) macam:

- Steel Container

Sel baterai dengan bejana (*container*) terbuat dari steel ditempatkan dalam rak kayu, hal ini untuk menghindari terjadi hubung singkat antar sel baterai dan hubung tanah.

- Plastik Container

Sel baterai dengan bejana (*container*) terbuat dari plastic ditempatkan dalam rak besi yang diisolasi, hal ini untuk menghindari terjadi hubung singkat antar sel baterai atau hubung tanah apabila terjadi kerusakan/kebocoran elektrolit baterai.



Gambar 2. 14 Plastik Cointainer dan Steel Container

d. Terminal dan Penghubung Baterai

Terminal dan klem pada sel baterai berfungsi untuk menghubungkan kutub-kutub sel baterai, menggunakan bahan *nickel plated steel* atau *cooper* sedangkan



penghubung antar unti atau grup baterai menggunakan bahan *nickel plated* atau berupa kabel yang terisolasi (*Insulated Flexible Cable*).



Gambar 2. 15 Terminal Penghubung Baterai

e. Ruang Baterai

Pada pemasangan baterai di ruang tertutup, maka diperlukan adanya sirkulasi udara yang cukup di ruang baterai tersebut. Selain dilengkapi dengan exhaust fan juga membutuhkan ventilasi udara yang masuk. Ventilasi udara masuk ini harus di desain khusus (dilengkapi penyaring udara) agar ruang baterai tidak mudah kotor dan oksigen (eksplosif) yang timbul akibat proses kimia baterai. Untuk ventilasi atau volume udara yang mengalir adalah sebagai berikut:

- Untuk instalasi di darat (Land Instalation)

$$Q = 55 \times n \times I \quad (2.1)$$

- Untuk instalasi di laut (Marine Instalation)

$$Q = 110 \times n \times I \quad (2.2)$$

Keterangan :

Q = Volume udara (Liter/jam)

N = Jumlah sel baterei

I = Arus pengisian pada akhir pengisian atau dalam kondisi pengisian floating (Ampere)



Gambar 2. 16 Ruang Baterei

f. Kontruksi Baterei

Di dalam baterai terdapat elektrolit asam sulfat, elektroda positif dan negatif dalam bentuk plat. Plat-plat dibuat dari timah atau berasal dari timah. Karena itu materi tipe ini sering disebut baterai timah. Ruangan didalamnya dibagi menjadi beberapa bagian sel (biasanya 6 sel, untuk baterai mobil) dan didalam masing-masing sel terdapat beberapa elemen yang terendam didalam elektrolit.

Konstruksi dari baterai terdiri dari beberapa bagian, antara lain elektrolit, plat positif, plat negatif, separator, sel baterai, penghubung sel, pembatas sel, kotak baterai, tutup baterai dan terminal baterai.



Gambar 2. 17 Kontruksi dan bagian-bagian baterai

Baterai terdiri dari beberapa komponen antara lain kotak baterai, terminal baterai, elektrolit baterai, lubang elektrolit baterai, tutup baterai dan sel baterai. dalam satu baterai terdiri dari beberapa sel baterai, tiap sel menghasilkan tegangan 2-2,2 V. Baterai 12 V mempunyai 6 sel baterai dirangkai secara seri.

Tiap sel baterai mempunyai lubang untuk mengisi elektrolit baterai, lubang tersebut ditutup dengan tutup baterai, pada tutup terdapat lubang ventilasi yang digunakan untuk mengalirkan uap dari elektrolit ke baterai. Tiap sel baterai terdapat



plat positif, separator dan plat negatif, plat positif berwarna coklat gelap (dark brown) dan plat negatif berwarna abu-abu metalik (metallic gray).

g. Kotak Baterai

Kotak baterai merupakan bagian yang berfungsi untuk menampung elektrolit dan elemen baterai. Pada baterai, ruangan di dalam kotak baterai dibagi menjadi 6 bagian atau 6 sel.

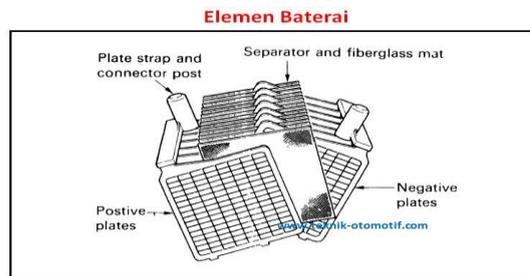
Pada kotak baterai juga terdapat tanda batas permukaan atas (upper level) dan tanda permukaan bawah (lower level). Selain itu, juga terdapat spesifikasi baterai yang ditulis pada kotak baterai.



Gambar 2. 18 kotak Baterai

h. Plat Baterai

Di dalam baterai terdapat dua jenis plat yaitu plat positif dan plat negatif. Kedua plat ini memiliki grid yang terbuat dari antimoni dan paduan timah. Bahan yang digunakan untuk membuat plat positif adalah antimoni yang dilapisi dengan lapisan aktif oksida timah (lead dioxide, PbO_2) yang memiliki warna coklat. Sedangkan plat negatif terbuat dari sponge lead (Pb) yang memiliki warna abu-abu. Salah satu hal yang mempengaruhi kemampuan dari baterai untuk dapat mengalirkan arus adalah jumlah dan ukuran dari plat-plat baterai. Semakin besar plat-plat baterai dan semakin banyak plat-plat baterai maka semakin besar pula arus yang dapat dihasilkan.



Gambar 2. 19 Plat Baterai

i. Separator

Separator atau penyekat merupakan komponen yang berada di dalam kotak baterai. Separator ini terletak di antara plat positif dan plat negatif. Pada separator terdapat pori-pori yang dapat memungkinkan elektrolit dapat melewatinya. Bagian separator ini juga berfungsi untuk mencegah terjadinya hubungan singkat antara plat positif dengan plat negatif.

j. Sel baterai

Sel baterai atau elemen baterai terdiri dari plat positif dan plat negatif dan diantara kedua plat tersebut dibatasi dengan separator. Sel-sel yang terdapat dalam baterai saling dihubungkan secara seri sehingga jumlah dari sel-sel baterai akan menentukan besar tegangan dari baterai tersebut. Satu buah sel dapat menghasilkan tegangan sekitar 2,1 volt sehingga pada baterai yang memiliki 6 buah sel, maka tegangan pada baterai tersebut sekitar 12,6 volt.

k. Penghubung sel

Penghubung sel atau cell connector merupakan bagian yang menghubungkan plat-plat yang ada di dalam baterai. Penghubung antara plat-plat negati dan positif dihubungkan secara seri.

l. Pemisah sel

Pemisah sel atau cell partition merupakan bagian di dalam baterai yang berfungsi untuk memisahkan tiap-tiap sel yang ada di dalam baterai.

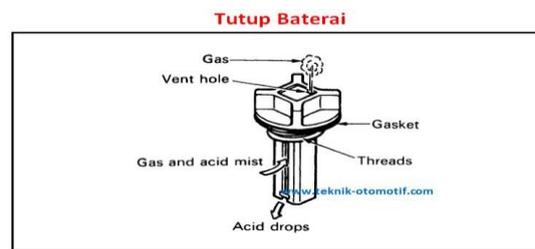
m. Terminal baterai

Terminal baterai terdiri dari dua buah terminal yaitu terminal positif dan terminal negatif. Terminal-terminal ini terletak pada bagian atas baterai.



n. Tutup baterai

Tutup baterai berfungsi untuk menutup lubang pengisian elektrolit baterai. Selain itu, pada tutup baterai terdapat lubang ventilasi yang berfungsi untuk keluarnya gas hidrogen yang terbentuk saat proses pengisian sehingga gas tersebut tidak berada di dalam baterai. Bila gas hidrogen tidak dikeluarkan maka dapat berakibat baterai meledak.



Gambar 2. 20 tutup baterai

2.2.5 klasifikasi baterai

2.2.5.1 Menurut kapasitas baterai

Kapasitas baterai dinyatakan sebagai kemampuan baterai untuk memberikan energi listrik, dengan tegangan waktu tertentu yang dinyatakan pada Amper- hour (AH) kapasitas baterai dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$C = I \times t \quad (2.3)$$

C = Kapasitas baterai (ah)

I = Arus pengujian (A)

T = Waktu pengujian (hour)

Kapasitas baterai ditentukan dengan menghitung semua faktor yang menyangkut penurunannya selama dipakai, perubahannya terhadap perubahan suhu dan jatuh tegangan, keperluan kapasitas yang diperlukan dengan memperkirakan beban terus-menerus dan beban terputus-putus (continous and intermittent load) yang harus dilayani selama terputusnya pelayanan normal, serta lama nya pemutusan pelayanan.

1. Berdasarkan kapasitasnya suatu baterai dibedakan menjadi 2 macam, yaitu Kapasitas dengan harga rendah/menengah.



Besarnya kapasitas baterai sampai 235Ah, dengan lama pengosongan selama 8 jam pada suhu 25oC. Baterai ini dapat digunakan sebagai sumber searah DC untuk :

- Alat kontrol, tanda-tanda isyarat
- Telekomunikasi
- Proteksi
- Penerangan darurat
- Sumber tenaga DC motor PMT,PMS

2. Kapasitas dengan harga tinggi.

Baterai ini mempunyai kapasitas 235 Ah sampai 450 Ah dengan lama pengosongan 5 jam pada suhu 25oC. Baterai ini juga dapat digunakan sebagai sumber DC untuk :

- Menjalankan motor listrik
- Penerangan darurat

2.2.5.2 Rangkaian baterei dan pengisian baterei

Untuk memberikan arus listrik pengisian (charging current) pada baterei diperlukan suatu sumber listrik arus searah (DC) Sumber arus-searah ini didapatkan dari penyearah (rectifier) atau pengisian baterai (baterai charger). Alat pengisi baterai ini harus dihubungkan ke baterai dengan hubungan kutub-kutub yang sama. Pada rangkaian kerja baterai ini penyearah (rectifier) digunakan pada rangkaian normal yang dihubungkan ke beban, sedangkan pengisi baterai (battery charger) digunakan untuk mengisi baterai dan juga mensupply beban. Macam kerja rangkaian baterai dengan penyearah (rectifier), dapat dibagi dalam beberapa bagian :

a. Sistem sederhana

Baterai selalau dihubungkan dengan pengisi baterai (charger) dalam pengisian pemeliharaan. Baterai hanya sewaktu-waktu dihubungkan ke beban, misalnya untuk start motor listrik (engine starting)

b. Sistem cadangan (standby system)



Pada operasi kerja normal beban langsung dihubungkan dengan penyearah (rectifier), dan baterai dihubungkan dengan pengisi baterai (battery charger) dalam pengisian pemeliharaan, maka bila sumber AC terganggu, secara otomatis beban akan terhubung ke baterai. Sistem ini umumnya digunakan untuk lampu-lampu darurat.

c. Sistem terapung (floating system)

Pada operasi kerja normal beban terhubung ke pengisi baterai (battery charger) dan baterai, maka bila sumber arus-searah (DC) dari pengisi baterai terganggu, beban langsung akan di-supply dari baterai

d. Sistem ganda (duplicate system)

Pada sistem ganda ini terdapat 2 (dua) buah pengisi baterai (battery charger) yang dihubungkan dengan ke-2 (dua) unit baterai. Disini beban baterai dapat disupply dengan menggunakan 2 (dua) unit baterai atau salah satu unit baterai.

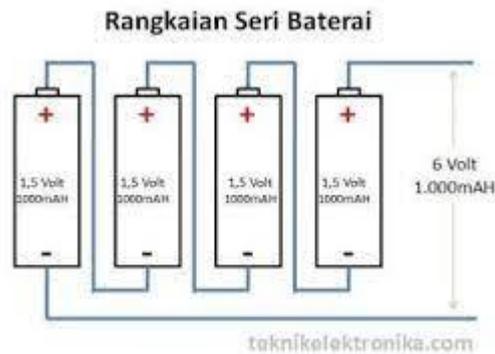
2.2.5.3 Rangkaian Baterei

Suatu sel baterei memiliki tegangan yang terbatas sehingga dibutuhkan suatu cara agar baterei mampu memenuhi kebutuhan tegangan kerja peralatan sebagaimana yang diharapkan meningkatkan kapasitas serta keandalan penggunaan baterei dengan cara merangkai baterei dalam beberapa hubungan salah satunya yaitu :

2.2.5.4 Hubungan Seri

Baterei dihubungkan secara seri berfungsi untuk dapat meningkatkan jumlah tegangan baterei sesuai dengan kebutuhan tegangan kerja peralatan. Apabila suatu peralatan membutuhkan tegangan sebesar 110 volt dengan tegangan sel baterei sebesar 1,4 volt maka diperlukan sejumlah ± 84 sel baterei yang terhubung seri untuk dapat memenuhi kebutuhan peralatan tersebut.

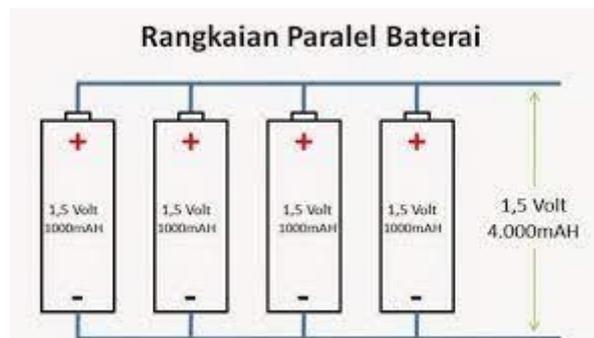
Namun ketika hubungan seri pada baterei memiliki kekurangan yaitu apabila salah satu sel baterei mengalami kelainan maka akan berdampak pada keseluruhan baterei sehingga dapat menyebabkan suplai DC ke beban terputus.



Gambar 2. 21 rangkaian seri baterai

2.2.5.5 Hubungan Paralel

Baterai dihubungkan secara paralel berfungsi untuk meningkatkan arus baterai dan menjaga keandalan beban DC pada sistem. Dimana apabila salah satu sel baterai mengalami anomali maka tidak berdampak pada sel baterai yang lainnya sehingga baterai tetap mampu mensuplai tenaga ke peralatan, dalam arti lain tidak berdampak pada baterai secara keseluruhan. Namun baterai hubungan paralel memiliki kekurangan yaitu dapat menurunkan kapasitas daya.



Gambar 2. 22 rangkaian paralel baterai

2.2.5.6 Pengisian baterai yang beroperasi

Setelah terjadi pengosongan baterai/pemakaian (discharge) baterai perlu pengisian ulang adapun beberapa macam pengisian ulang baterai adalah :

a. Cycle charging

Pengisian dengan cara cycle-charging adalah mengisi (charging) kembali baterai setelah pengosongan (discharge) sebagian atau pengosongan secara normal. Untuk pengisian cara ini biasanya dibutuhkan waktu antara 5



sampai 10 jam. Jika pengisian sudah penuh kemudian pengisian dihentikan, umumnya secara otomatis. Cara cycle-charging umumnya banyak digunakan pada baterai diesel (electric industrial truck service).

b. Boost & quick charging

Pengisian dengan cara boost & quick charging adalah untuk pengisian baterai yang dipakai di pabrik-pabrik, juga untuk baterai diesel (industrial truck service) dimana diperlukan tambahan pengisian dalam periode yang singkat misalnya pada jam-jam istirahat. Pengisian cara ini cukup untuk pelayanan satu hari. Arus yang diberikan ke baterai tidak boleh melebihi harga ampere-jamnya. Untuk menjaga pengisian yang berlebihan dan arus yang terlalu besar, biasanya alat pengisi ini mempunyai automatic out-off yang mana memberhentikan pengisian pada waktu baterai mencapai suhu tinggi.

c. Floating charging

Pengisian dengan cara ini, dimana baterai secara terus-menerus tersambung pada rangkain luar (sumber AC), alat pengisi baterai (battery charge) dan beban. Alat pengisi baterai ini direncanakan untuk menjaga suatu tegangan konstan dari baterai yang tersambung ke beban. Biasanya tegangan yang diberikan untuk mengalirkan arus untuk mengatasi kerugian dalam baterai dan menjaga baterai selalu dalam keadaan pengisian penuh (full-charge) adalah tetap (konstan) untuk :

- Baterei timah :2,18 volt/sel
- Baterei alkali : 1,40-1,42 volt/sel

Pengoperasian baterai secara pengisian terapung (floating charging) umumnya digunakan di gardu induk dan pusat-pusat pembangkit tenaga listrik, dimana baterai dan alat pengisian baterai dihubungkan paralel dengan busbar umum dari supply arus searah (DC)

d. Equalizing charging



Dalam sel-sel dari suatu baterai yang beroperasi dengan pengisian terapung (floating charge) akan selalu terjadi sedikit perbedaan (yang tidak dapat dihindarkan) dalam kondisi kimia (chemical condition) antara satu sel dengan sel yang lainnya. Equalizing charge dilaksanakan dengan cara menaikkan tegangan baterai sesuai dengan yang ditentukan dalam buku petunjuk masing-masing pabrik. Pengisian ini berlangsung sampai semua sel berhenti mengeluarkan gas (gas freely) dan pembacaan tegangan serta berat jenis elektrolitnya menunjukkan bahwa baterai telah diisi penuh (full charge) sesuai dengan harga yang ditentukan dalam petunjuk masing-masing pabrik.

2.2.6 Rating Kapasitas Baterai

Energi yang tersimpan dalam baterai harus cukup kuat untuk stater, untuk itu baterai harus terisi penuh. Kapasitas baterai menunjukkan jumlah listrik yang disimpan baterai yang dapat dilepaskan sebagai sumber listrik. Kapasitas baterai dipengaruhi oleh ukuran plat, jumlah plat, jumlah sel dan jumlah elektrolit baterai terdapat 3 ukuran yang sering menunjukkan kapasitas baterai yaitu:

- 1) Cranking Current Ampere (CCA)
- 2) Reserve Capacity
- 3) Ampere Hour

2.2.6.1 Cold Cranking Ampere (CCA)

Pada baterai terdapat istilah CCA yang menunjukkan kemampuan baterai saat masih terisi penuh untuk mengeluarkan arus listrik (dalam satuan ampere) pada saat kondisi dingin (-17,8 derajat celcius) selama 30 detik. Tegangan pada tiap-tiap sel baterai akan dipertahankan sebesar 1,2 volt atau lebih dan apabila pada baterai terdapat 6 buah sel maka tegangan keseluruhan minimum yang dipertahankan adalah 7,2 volt. Atau lebih mudahnya dapat diartikan sebagai kemampuan baterai saat terisi penuh untuk mengeluarkan arus listrik yang digunakan untuk menghidupkan mesin dalam kondisi dingin selama 30 detik.



2.2.6.2 Reserve capacity

Reserve capacity atau kapasitas cadangan untuk mensuplai kebutuhan arus listrik ke sistem pengapian dan kelistrikan body apabila sistem pengisian tidak bekerja. Reserve capacity merupakan banyaknya waktu (dalam satuan menit) pada baterai saat terisi penuh dapat memberikan arus listrik sebesar 25 Ampere pada suhu 27 derajat celcius.

Tegangan tiap sel baterai tidak boleh turun dibawah 1,75 volt atau apabila baterai tersebut memiliki 6 sel maka tegangan minimumnya adalah 10,3 volt.

Rumus menentukan kapasitas baterai adalah :

$$AH = A \text{ (amper)} \times H \text{ (jam)} \quad (2.4)$$

2.2.6.3 Ampere Hour

Ampere Hour menyatakan kapasitas baterai, kapasitas baterai merupakan seberapa lama aki tersebut dapat bertahan mensuplai arus untuk beban/load. Amper Hour menyatakan besarnya arus yang dapat mengalir dalam waktu 20 jam pada temperatur 27 derajat celcius tanpa adanya penurunan tegangan tiap sel dibawah 1,75 volt.

2.2.6.4 Reaksi Kimia pada Baterai

Baterai merupakan pembangkitan listrik secara kimia. Listrik dibangkitkan akibat reaksi kimia antara plat positif dan plat negatif. Saat baterai dihubungkan dengan sumber listrik arus searah maka akan terjadi proses pengisian (charge).

Proses tersebut secara kimia dapat dirumuskan sebagai berikut :



Pada saat sistem starter berfungsi maka energi listrik yang tersimpan di baterai akan mengalir ke beban, proses ini sering disebut proses pengosongan (discharge), proses pengosongan secara kimia dapat dirumuskan sebagai berikut.





Dari reaksi kimia tersebut terdapat perbedaan dimana pada saat baterai penuh elektrolit terdiri dari $2H_2SO_4$, sedangkan saat kosong elektrolit baterai adalah $2H_2O$.

2.3 Generator Sinkron

Generator arus bolak-balik (AC) atau disebut dengan alternator adalah suatu peralatan yang berfungsi untuk mengkonversi energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik (elektrik) dengan perantara induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat terbangkitnya tegangan pada generator).

Dikatakan generator sinkron karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator.



Gambar 2. 23 Generator Sinkron

2.3.1 Konstruksi Generator Sinkron

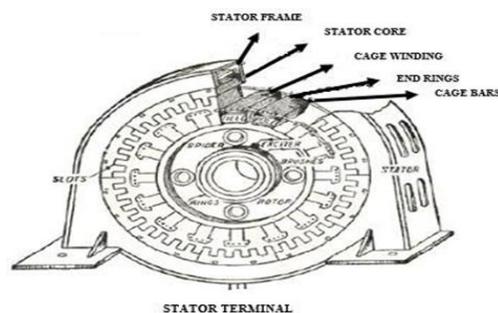
Secara umum konstruksi generator sinkron terdiri dari stator (bagian yang diam) dan rotor (bagian yang bergerak). Keduanya merupakan rangkaian magnetik yang berbentuk simetris dan silindris. Selain itu generator sinkron memiliki celah udara ruang antara stator dan rotor yang berfungsi sebagai tempat terjadinya fluksi atau induksi energi listrik dari rotor ke stator seperti gambar (Marsudi, 2005).

Konstruksi generator AC adalah sebagai berikut :

1. Rangka stator merupakan rumah stator tersebut.



2. Stator, Stator adalah bagian yang diam. Memiliki alur-alur sebagai tempat meletakkan lilitan stator. Lilitan stator berfungsi sebagai tempat Gaya Gerak Listrik (GGL) induksi.
3. Rotor, Rotor adalah bagian yang berputar, pada bagian ini terdapat kutub-kutub magnet dengan lilitannya yang dialiri arus searah, melewati cincin geser dan sikat-sikat.
4. Cincin geser, terbuat dari bahan kuningan atau tembaga yang dipasang pada poros dengan memakai bahan isolasi. *Slip ring* ini berputar bersama-sama dengan poros dan rotor.
5. Generator penguat, Generator penguat merupakan generator arus searah yang dipakai sebagai sumber arus.



Gambar 2. 24 Kontruksi Generator Sinkron

2.3.1.1 Stator

Stator merupakan bagian yang diam (statis) dan merupakan gulungan kawat penghantar yang disusun sedemikian rupa dan ditempatkan pada alur-alur inti besi yang disebut dengan belitan jangkar. Pada penghantar tersebut adalah tempat terbentuknya GGL induksi yang diakibatkan dari medan magnet putar dari rotor yang memotong kumparan penghantar stator.



Gambar 2. 25 Inti Stator dan Alur Pada Stator

2.3.1.2 Rotor

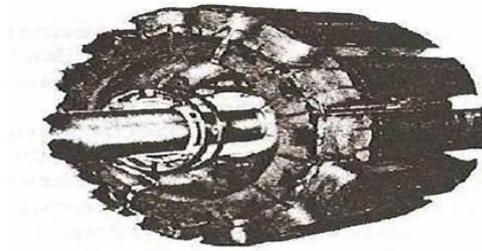
Rotor merupakan bagian yang bergerak (dinamis). Rotor berfungsi untuk membangkitkan medan magnet sehingga menghasilkan tegangan kemudian akan diinduksikan ke stator. Rotor pada generator juga berfungsi sebagai tempat belitan medan (eksitasi). Dimana kumparan medan magnet disusun pada alur-alur inti besi rotor, sehingga apabila pada kumparan tersebut dialirkan arus searah (DC) maka akan membentuk kutub-kutub magnet Utara dan Selatan pada inti rotor.

Generator sinkron memiliki dua tipe rotor, yaitu :

a. Rotor Kutub Sepatu Atau Menonjol (Salient Pole Rotor)

Pada rotor kutub menonjol ini mempunyai kutub yang jumlahnya banyak. Pada kumparannya dibelitkan pada tangkai kutub, dimana kutub-kutub diberi laminasi untuk mengurangi panas yang ditimbulkan oleh eddy current. Pada belitan-belitan medannya dihubung seri, sehingga ketika belitan medan ini disupply oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub yang berlawanan.

Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putaran rendah dibawah 700 rpm dan putaran menengah dari 750-1500 rpm, sehingga kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi yang besar dan mengeluarkan suara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi.



Gambar 2. 26 Rotor Kutub Menonjol

b. Rotor Kutub Silindris (Non Salient Pole Rotor)

Rotor kutub silindris umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putaran tinggi diantara 1500-3000 rpm. Rotor kutub tak menonjol ini dibuat dari plat baja berbentuk silinder yang mempunyai sejumlah slot sebagai tempat kumparan. Karena adanya slot-slot dan juga kumparan medan pada rotor maka mengakibatkan jumlah kutub pun sedikit terbentuk. Konstruksi ini memberikan keseimbangan mekanis yang lebih baik karena rugi-rugi anginnya lebih kecil dibandingkan rotor kutub menonjol.

Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putaran tinggi karena distribusi disekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol dan juga konstruksinya memiliki kekuatan mekanik pada kecepatan putar tinggi .

Gambar bentuk kutub silinder generator sinkron tampak seperti pada gambar 2.27



Gambar 2. 27 Rotor Kutub Silinder

2.3.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang akan disuplai oleh arus searah sehingga menimbulkan fluks yang besarnya tetap terhadap waktu. Kemudian penggerak mula (prime mover) yang



sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya.

$$n = \frac{120.f}{p} \quad (2.6)$$

Keterangan:

n = Kecepatan putar rotor (rpm)

p = Jumlah kutub rotor

f = Frekuensi (Hz)

Perputaran rotor tersebut sekaligus akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada rotor akan menginduksikan tegangan tiga fasa pada kumparan jangkar sehingga akan menimbulkan medan putar pada stator. Perputaran tersebut menghasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah besarnya terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan GGL induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut.

GGL induksi (E_a) pada alternator akan terinduksi pada kumparan jangkar alternator bila rotor diputar di sekitar stator. Besarnya kuat medan pada rotor dapat diatur dengan cara mengatur arus medan (I_f) yang diberikan pada rotor. Besarnya GGL induksi (E) rata-rata yang dihasilkan kumparan jangkar alternator ini dapat dilihat dalam persamaan sebagai berikut (Marsudi, 2005).

$$E = 4,44 . f . \Phi . T \quad (2.7)$$

Jika, $n = \frac{120.f}{p}$, maka :

$$E = 4,44 . \frac{np}{120} . \Phi . T$$

Bila, $C = \frac{4,44.p.T}{120}$, maka :

$$E = Cn\Phi$$

Keterangan :

E = GGL induksi (Volt)

C = Konstanta



p = Jumlah kutub

n = Putaran (rpm) = Fluks magnetik (weber)

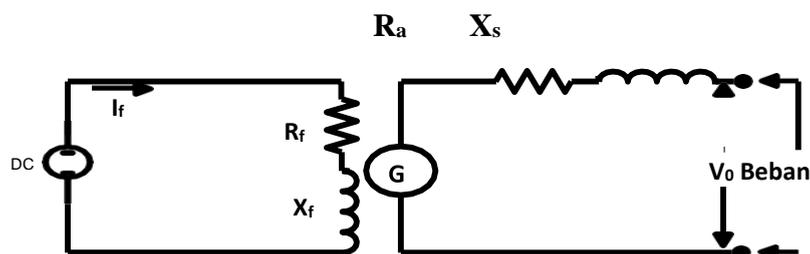
T = Banyaknya lilitan /fase = $1/2 Z$

Z = Banyak sisi kumparan

2.3.3 Generator Berbeban

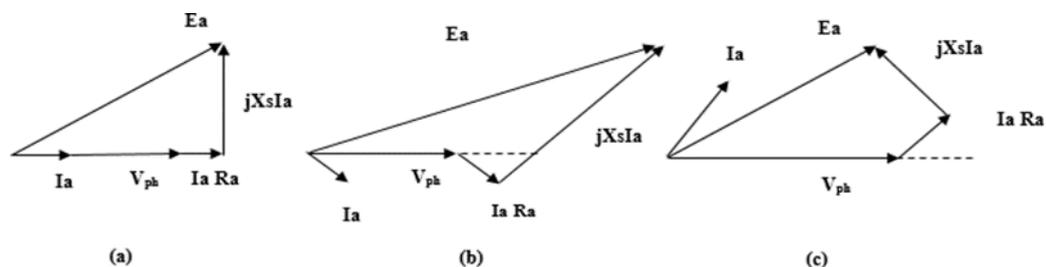
Pada keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaktansi jangkar bersifat reaktif dan disebut juga sebagai reaktansi permanen (X_m). Reaktansi permanen ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor (X_a) sebagai reaktansi sinkron (X_s) (Marsudi, 2005).

$$X_s = X_m + X_a$$



Gambar 2. 28 Rangkaian Ekuivalen Generator Berbeban

Secara umum sifat beban yang dipikul oleh alternator dapat bersifat resistif, induktif dan kapasitif. Bentuk hubungan beban ini akan mempengaruhi arus yang mengalir pada alternator. Arus ini bisa menjadi sefasa, tertinggal, atau mendahului dari tegangan, tergantung dari jenis beban yang diberikan pada terminal generator. Adapun diagram fasor generator pada faktor daya satu, terbelakang dan mendahului adalah seperti gambar 2.29.



Gambar 2. 29 Hubungan berbagai kondisi beban terhadap arus dan tegangan yang terjadi pada generator : (a). resistif (b). induktif (c).kapasitif



Dengan memisalkan generator dihubungkan ke sistem besar (busbar), pada gambar 2.29 bagian (a) merupakan diagram vektor dari generator dengan faktor daya satu (sefasa) dapat terlihat jatuh tegangan $I_a \cdot R_a$ sefasa dengan I_a dan $I_a \cdot X_s$ mendahului I_a sejauh 90°. Seperti persamaan sebagai berikut :

$$I_a \cdot Z_s = I_a \cdot R_a + I_a \cdot jX_s$$

(2.8)

$$E_a = V + I_a \cdot Z_s$$

Keterangan :

V = Tegangan konstan sistem

I_a = Arus alternator

R_a = Tahanan alternator

Z_s = Impedansi sistem

Jika arus eksitasi alternator dinaikkan dari eksitasi normal pada faktor daya satu (sefasa), maka E_a akan bertambah sedangkan jumlah vektor antara V dan $I_a \cdot Z_s$ tetap tidak berubah ($E_a \neq V + I_a \cdot Z_s$). Perbedaan ini timbul akibat arus reaktif terbelakang dimana daya keluaran pada generator tidak berpengaruh sehingga menimbulkan jatuh tegangan $I_r \cdot Z_s$ yang terbelakang 90° dari $I_a \cdot Z_s$.

Pada gambar 2.29 bagian (b) terdapat diagram vektor, dimana bila diberi penguatan yang lebih (over excited) maka generator bekerja pada faktor daya terbelakang (lagging) sehingga menyebabkan arus akan terbelakang dari tegangan yang mengakibatkan generator sinkron membangkitkan daya reaktif induktif. Namun bila arus penguatan dikurangi (under excited), E_a tentukan akan menjadi kecil, sehingga terdapat perbedaan jumlah vektor V dan $I_a \cdot Z_s$ tetap tidak berubah. Perbedaan ini timbul akibat arus reaktif terbelakang, sehingga menimbulkan jatuh tegangan $I_r \cdot Z_s$ yang mendahului 90° dari $I_a \cdot Z_s$.

Pada gambar 2.23 bagian (c) terdapat diagram vektor, dimana bila arus penguatan dikurangi, maka alternator bekerja pada faktor daya mendahului (leading) sehingga menyebabkan arus akan mendahului dari tegangan yang mengakibatkan daya reaktif kapasitif. Pada alternator dengan daya keluaran



konstan, maka jatuh tegangan $I_a Z_s$ akan konstan pula. Jika arus penguatannya dibuat bervariasi, maka I_a tetap tidak akan berubah, tetapi I_r dan $I_r Z_s$ akan berubah nilainya.

2.3.4 Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron

Eksitasi atau biasa disebut sistem penguatan adalah suatu perangkat yang memberikan arus penguat (I_f) kepada kumparan medan arus bolak-balik (*alternating current*) yang dijalankan dengan cara membangkitkan medan magnetnya dengan bantuan arus searah. Arus eksitasi adalah pemberian arus listrik pada kutub magnetik. Dengan mengatur besar kecilnya arus listrik tersebut kita dapat mengatur besar tegangan output generator atau dapat juga mengatur besar daya reaktif yang diinginkan pada generator yang sedang paralel dengan sistem jaringan besar (*infinite bus*).

Sistem eksitasi dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu sistem eksitasi dengan menggunakan sikat dan sistem eksitasi tanpa sikat (Marsudi, 2005).

2.3.4.1 Sistem Eksitasi Menggunakan Sikat

Sistem eksitasi dengan menggunakan sikat terdiri dari:

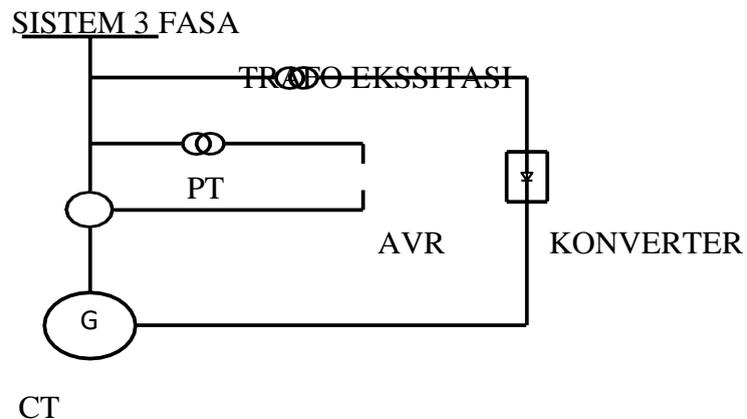
1. Sistem Eksitasi Statis

Sistem eksitasi statis adalah sistem eksitasi generator dengan menggunakan menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak, yang berarti bahwa peralatan eksitasi tidak ikut berputaran bersama rotor generator sinkron. Sistem eksitasi ini disebut juga dengan *self excitation* merupakan sistem eksitasi yang tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi generator sinkron dan sebagai gantinya sumber eksitasi berasal dari keluaran generator sinkron itu sendiri yang diserahkan terlebih dahulu dengan menggunakan *rectifier*.

Awalnya pada rotor ada sedikit magnet yang tersisa, magnet yang sisa ini akan menimbulkan tegangan pada stator, tegangan ini kemudian masuk dalam penyearah dan dimasukkan kembali pada rotor, akibatnya medan magnet yang



dihasilkan makin besar dan tegangan AC naik demikian seterusnya sampai dicapai tegangan nominal dari generator AC tersebut. Biasanya penyearah itu mempunyai pengatur sehingga tegangan generator dapat diatur konstan menggunakan AVR Rangkaian sistem eksitasi statik seperti gambar 2.30 berikut :



Gambar 2. 30 Sistem Eksitasi Statik

2. Sistem Eksitasi Dinamik

Sistem eksitasi dinamik adalah sistem eksitasi generator tersebut disuplai dari eksiter yang merupakan mesin bergerak seperti gambar 2.24. Sebagai eksiternya menggunakan generator DC atau menggunakan generator AC yang disearahkan menggunakan *rectifier*. *Slip ring* digunakan untuk menyalurkan arus dari generator penguat pertama ke medan penguat generator penguat kedua (marsudi, 2005).



Syarat yang harus dipenuhi dalam melakukan sinkronisasi generator ini ialah (Marsudi, 2005) :

- a. Tegangan kedua generator harus sama

Dimana tegangan generator (yang akan diparalel) dengan tegangan sistem jaringan harus diatur dengan mengatur arus eksitasinya. Pada saat generator bekerja paralel, perubahan arus eksitasi akan merubah faktor daya.

- b. Frekuensi kedua generator harus sama

Frekuensi generator dan frekuensi sistem harus sama. Untuk menyamakannya, maka putaran generator harus diatur, yaitu dengan cara mengatur katup *governor* (aliran uap masuk turbin).

- c. Mempunyai urutan dan sudut fasa yang sama

Urutan fasa dan sudut fasa generator sinkron yang akan di paralelkan harus sama, sebab jika adanya perbedaan fasa maka akan tidak dapat dilakukan penyinkronan. Mempunyai sudut fasa yang sama bisa diartikan, kedua fasa dari 2 generator mempunyai sudut fasa yang berhimpit sama atau 0 derajat. Dengan kata lain urutan fasa dari generator yang diparalelkan harus sama dengan fasa pada sistem (*busbar*).

2.3.6 Sistem Kerja Paralel Generator Sinkron

Apabila generator dihubungkan dengan sistem jaringan yang kapasitasnya besar (*infinite bus*), maka dengan mengatur putaran (n) dan arus eksitasi (I_f) maka tidak akan mempengaruhi frekuensi sistem jaringan tersebut. Pada kondisi tersebut pengaturan putaran adalah hanya mengatur pembebanan daya aktif sedangkan pengaturan arus eksitasi hanya mengatur aliran daya reaktif atau faktor daya generator tersebut

Untuk menyuplai beban yang ada pada kedua generator yang bekerja paralel, maka jumlah daya aktif dan reaktif yang disuplai generator tersebut harus sama dengan daya aktif dan reaktif yang ada pada beban. Adapun rumus daya aktif dan reaktif yang harus disuplai oleh kedua generator adalah (Marsudi, 2005):

$$P_{Load} = P_{G1} + P_{G2}$$



$$Q_{Load} = Q_{G1} + Q_{G2} \quad (2.9)$$

Keterangan : Pload = Beban Aktif Generator

Qload = Beban Reaktif Generator

P_{G1} = Daya Aktif Generator 1

P_{G2} = Daya Aktif Generator 2

2.3.7 Efek Pengaturan Arus Eksitasi

Dalam pengaturan arus eksitasi tersebut maka besar nilai dari fluks magnetik (Φ) akan berubah seiring dengan perubahan arus eksitasi.

Jika generator beroperasi secara paralel, dimana dengan diaturnya arus eksitasi sedangkan nilai putaran (n) tetap, maka akan mengakibatkan kenaikan nilai dari fluks magnetik sehingga mengubah daya reaktif yang dibutuhkan namun besar daya aktifnya tidak akan berubah sehingga akan merubah nilai faktor daya.

Jika generator G_1 dan G_2 bekerja paralel maka masing-masing alternator akan memasok beban setengah dari daya aktif dan setengah dari daya reaktif. Masing-masing alternator memasok arus sebesar I , sehingga arus beban yang di pasok sebesar 2 kali dari I .

Bila penguatan eksitasi G_1 dinaikkan maka besarnya E_1 akan lebih dari besaran awalnya sehingga $\bar{E}_1 > \bar{E}_2$. Hal ini menyebabkan adanya arus sirkulasi. Dimana arus sirkulasi (Marsudi, 2005) :

$$I_s = \frac{E_1 - E_2}{Z_1 - Z_2} \quad (2.10)$$

Keterangan :

I_s = Arus sirkulasi

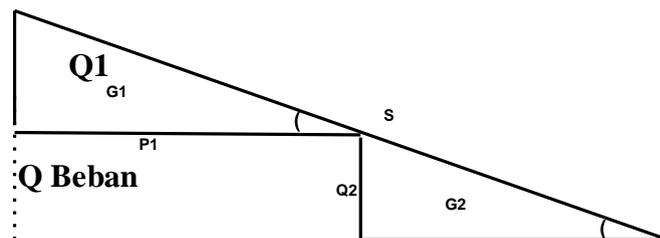
E_{12} = Tegangan induksi generator

Z_{12} = Impedansi generator

Arus I_s ini akan mempengaruhi arus beban pada G_1 dan G_2 secara vektoris, sehingga besarnya arus pada G_1 sebesar I_1 dengan $\cos \theta_1$ dan arus pada G_2 sebesar I_2 dengan $\cos \theta_2$. Perubahan ini hampir tidak mempengaruhi pada besarnya daya

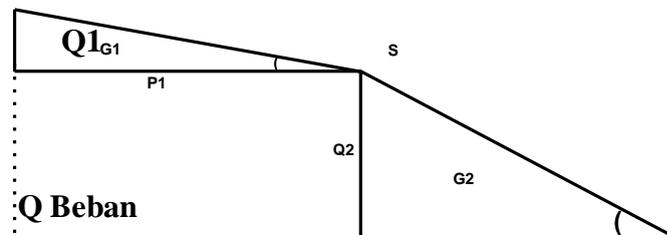


aktif beban, tapi berpengaruh pada perubahan daya reaktif yang di pikul oleh alternator. Gambar 2.32 berikut ini segitiga daya akibat perubahan eksitasi pada alternator yang bekerja secara paralel :



P Beban **P2**

a. Kondisi 1



P2

P Beban

b. Kondisi 2

2. 32 Segitiga daya generator yang terhubung paralel akibat efek perubahan penguatan

Pada kondisi 1, beban yang di pikul G_1 dan G_2 sama besarnya, sehingga beban daya aktif dan daya reaktif di bagi rata memberikan segitiga daya aktif yang



sama tetapi jika penguatan G_1 dinaikkan, dan arus penguatan G_2 maka akan merubah pembagian daya reaktif pada masing-masing alternator sehingga berpengaruh terhadap faktor daya pada masing-masing alternator. Hal ini dapat dilihat pada kondisi 2.

2.3.8 Komponen Penunjang Generator Turbin Gas

Adapun beberapa komponen penunjang dalam sistem turbin gas adalah sebagai berikut:

a. Starting Equipment

Berfungsi untuk melakukan start up sebelum turbin bekerja. Jenis-jenis starting equipment yang digunakan di unit-unit turbin gas pada umumnya seperti diesel engine (PG-9001 A/B), induction motor (PG901 C/H dan KGT 4X01, 4X02 dan 4X03), dan gas expansion turbine.

b. Coupling dan Accessory Gear.

Berfungsi untuk memindahkan daya dan putaran dari poros yang bergerak ke poros yang akan digerakkan. Ada tiga jenis coupling yang digunakan, yaitu:

- Jaw Cluth, menghubungkan starting turbine dengan accessory gear dan HP turbin rotor.
- Accessory Gear Coupling, menghubungkan accessory gear dengan HP turbin rotor
- Load Coupling, menghubungkan LP turbin rotor dengan kompressor beban.

c. Fuel System.

Bahan bakar yang digunakan berasal dari fuel gas system dengan tekanan sekitar 15 kg/cm². Fuel gas yang digunakan sebagai bahan bakar harus bebas dari cairan kondensat dan partikel-partikel padat. Untuk mendapatkan kondisi tersebut diatas maka sistem ini dilengkapi dengan knock out drum yang berfungsi untuk memisahkan cairan-cairan yang masih terdapat pada fuel gas

d. Lube Oil System

Lube oil system berfungsi untuk melakukan pelumasan secara kontinu pada setiap komponen sistem turbin gas. Lube oil disirkulasikan pada bagian-bagian



utama turbin gas dan trush bearing juga untuk accessory gear dan yang lainnya.

Lube oil system terdiri dari:

- Oil Tank (Lube Oil Reservoir)
- Oil Quantity
- Pompa
- Filter System
- Valving System
- Piping System
- Instrumen untuk oil

Pada turbin gas terdapat tiga buah pompa yang digunakan untuk mensuplai lube oil guna keperluan lubrikasi, yaitu:

- Main Lube Oil Pump, merupakan pompa utama yang digerakkan oleh HP shaft pada gear box yang mengatur tekanan discharge lube oil.
- Auxilary Lube Oil Pump, merupakan pompa lube oil yang digerakkan oleh tenaga listrik, beroperasi apabila tekanan dari main pump turun.
- Emergency Lube Oil Pump, merupakan pompa yang beroperasi jika kedua pompa diatas tidak mampu menyediakan lube oil.

e. Cooling System

Sistem pendingin yang digunakan pada turbin gas adalah air dan udara. Udara dipakai untuk mendinginkan berbagai komponen pada section dan bearing.

Komponen-komponen utama dari cooling system adalah:

- Off base Water Cooling Unit
- Lube Oil Cooler
- Main Cooling Water Pump
- Temperatur Regulation Valve
- Auxilary Water Pump



2.3.9 Faktor Daya

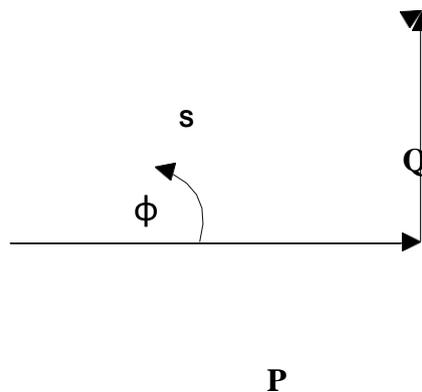
Faktor daya yang sering disebut sebagai $\cos \phi$ didefinisikan sebagai perbandingan daya aktif (W) dan daya semu ($V.A$). Atau sebagai perbandingan antara arus yang dapat menghasilkan kerja didalam suatu rangkaian terhadap arus total yang masuk kedalam rangkaian.

$$\text{Faktor daya} = \cos \phi = \frac{P(W)}{S(V.A)} \quad (2.11)$$

Keterangan :

P = Daya aktif (Watt)

S = Daya semu (Volt Ampere)



Gambar 2. 33 Segitiga daya

Faktor daya mempunyai pengertian sebagai besaran yang menunjukkan seberapa efisien jaringan yang dimiliki dalam menyalurkan daya yang bisa dimanfaatkan. Faktor daya rendah juga merugikan karena mengakibatkan arus beban akan menjadi lebih tinggi.

Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energi listrik yang digunakan untuk melakukan usaha. Untuk sistem arus AC tiga fasa, dikenal 3 daya yaitu :

- a. Daya semu (*apparent power*)

Daya semu dikatakan daya total dari kapasitas daya maksimal generator atau dapat diartikan sebagai penjumlahan daya aktif dan daya reaktif.



$$S = V.I$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.12)$$

b. Daya aktif (*Active Power*)

Daya aktif disebut juga daya nyata memiliki satuan Watt yang mempunyai pengertian merupakan daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Daya ini sering digunakan secara umum oleh konsumen dan sebagai satuan yang digunakan untuk daya listrik dan dikonversikan dalam bentuk kerja.

Persamaan dalam perhitungan fasa :

$$P = V.I.\cos\varphi \text{ (1 Fasa)}$$

$$P = \sqrt{3}.V.I.\cos\varphi \text{ (3 Fasa)} \quad (2.13)$$

c. Daya Reaktif (*reactive power*)

Daya reaktif dengan satuan VAR, memiliki pengertian daya yang di *supply* oleh komponen reaktif, atau disebut juga jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet.

Persamaan dalam perhitungan fasa :

$$Q = V.I.\sin\varphi \text{ (1 Fasa)} \quad (2.14)$$

$$Q = \sqrt{3}.V.I.\sin\varphi \text{ (3 Fasa)}$$

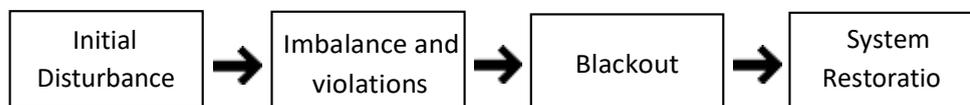
Daya reaktif yang tinggi mengakibatkan meningkatnya sudut segitiga daya sehingga menghasilkan faktor daya rendah, begitu juga daya reaktif yang kecil menghasilkan faktor daya yang tinggi.

2.4 Kehilangan Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik

Kehilangan tegangan pada sistem tenaga listrik dapat diistilahkan dengan *blackout*. *Blackout* merupakan keadaan pemadaman meluas sistem tenaga listrik dengan dampak yang merugikan baik materi maupun non materi (Hudah, 2014). *Blackout* dapat dideskripsikan sebagai gangguan kaskade atau gangguan besar, proses terjadinya *blackout* dapat dilihat pada gambar 2.35, terlihat pada gambar



bahwa penyebab awal *blackout* adalah adanya pemicu gangguan. Pemicu munculnya gangguan dapat berupa bencana alam, kejadian tak terduga, misoperasi fasilitas dan ketidakseimbangan sistem. Hal ini lah yang menyebabkan trip nya fasilitas sistem seperti transmisi, transformator dan generator. Setelah pemadaman telah terjadi, pemulihan sistem dengan cara yang tepat harus segera dilaksanakan (Goo, dkk, 2016).



Gambar 2. 34 Prosedur khas blackout (Goo, dkk, 2016)

Sebagian besar *blackout* yang sering terjadi adalah *blackout* sistem sebagian, *blackout* sistem sebagian berarti dapat dipulihkan dengan bantuan sistem lain (sistem tetangga) yang sudah terinterkoneksi dengan sistem yang *blackout* tadi. Namun jika *blackout* total terjadi, seluruh sistem akan padam, sistem dari tetangga tersebut tentu tidak bisa membantu sistem lainnya karena di sana juga terjadi *blackout*. Ketika hal itu terjadi, pemulihan dapat dilakukan dengan cara membagi sistem menjadi beberapa subsistem, setelah masing-masing subsistem telah pulih maka semua subsistem akan diparalelkan. Sehingga dengan metode seperti itu diharapkan sistem dapat pulih secepat mungkin. Dengan demikian jika *blackout* total terjadi setiap sub sistem setidaknya harus memiliki sekurang nya 1 unit *black start*, agar subsistem tersebut dapat segera pulih tanpa menunggu daya listrik dari sub sistem lain.

2.4.1 Gangguan Besar Penyebab Kehilangan Tegangan

Yang dimaksud dengan gangguan besar adalah gangguan yang meliputi sebagian besar dari sistem, termasuk pula gangguan total yaitu gangguan yang menyebabkan seluruh sistem padam. Gangguan besar pada umumnya gangguan



kaskade, yaitu gangguan yang menyebabkan *tripnya* sebuah atau dua buah PMT kemudian disusul dengan *tripnya* banyak PMT dalam sistem. Gangguan besar pada umumnya disebabkan oleh (Marsudi, 2015) :

a. *Trip* unit pembangkit yang besar

Tripnya unit pembangkit yang besar menyebabkan beban yang sebelumnya diambil oleh unit yang *trip* beralih ke unit pembangkit yang lain sehingga menyebabkan unit pembangkit lain mengalami beban lebih dan ikut *trip*. Hal ini terutama terjadi apabila cadangan berputar dalam sistem lebih kecil dibandingkan dengan daya yang dibangkitkan oleh unit pembangkit yang mengalami gangguan. Proses pemindahan beban ini mungkin juga menyebabkan ada saluran transmisi mengalami beban lebih dan ikut *trip*, tergantung situasi aliran daya dalam sistem.

b. *Tripnya* saluran transmisi yang tinggi bebannya

Tripnya saluran transmisi yang tinggi bebannya mempunyai dampak yang serupa seperti *tripnya* unit pembangkit yang besar, khususnya untuk bagian sistem yang menerima daya dari saluran transmisi tersebut.

Sehubungan dengan uraian di atas mengenai sebab-sebab gangguan besar, di dalam sistem perlu dipasang *Under Frequency Relay* sebanyak mungkin. *Under Frequency Relay* sebaiknya dipasang sebanyak mungkin untuk melepas penyulang distribusi terlebih dahulu sehingga diharapkan tidak ada unit pembangkit yang ikut *trip*. Hal ini akan mempercepat proses menormalkan sistem setelah terjadinya gangguan.

Di samping memasang *Under Frequency Relay* juga perlu diusahakan agar cadangan berputar selalu cukup dan diusahakan agar aliran daya dalam sistem menunggu daya listrik dari sub sistem lain (Goo, dkk, 2016).

tidak menimbulkan *trip* kaskade apabila ada unit pembangkit atau saluran transmisi mengalami gangguan.

Gangguan kaskade, menyusul *tripnya* PMT unit pembangkit atau *tripnya* PMT saluran transmisi dapat disebabkan karena terjadi ayunan daya dalam sistem sebagai akibat kurang stabilnya sistem. Untuk mencegah *tripnya* PMT dalam



kondisi ayunan daya dapat dilakukan dengan memasang *blocking relay* atau *anti hunting relay* yang bekerja selama masa ayunan daya.

2.4.2 Pemulihan Pasca Kehilangan Tegangan Pada Sistem

“Kontinuitas Penyaluran” adalah tujuan dari pemulihan sistem tenaga listrik, yang berarti memasok beban dalam waktu sesingkat mungkin. Namun, prosedur itu sendiri memiliki kemungkinan kegagalan intrinsik yang harus diminimalkan. Selain itu, *blackout* adalah peristiwa langka sehingga operator pengatur sistem tenaga tidak terlatih secara efektif untuk mengatur sistem dalam fase pemulihan. Oleh karena itu sangat penting bahwa operator pengatur sistem tenaga listrik mengembangkan rencana pemulihan sistem tenaga listrik terperinci yang harus diikuti sehingga proses pemulihan dapat berjalan dengan cepat dan efektif (Barsali, dkk, 2008).

Dua strategi dasar telah dipakai secara luas dalam prosedur pemulihan sistem tenaga listrik yaitu metode *restoration by path* dan metode *restoration by zones*. Metode *restoration by path* mengutamakan pengisian tegangan dari satu unit ke unit lain. Tujuan utama dari metode *restoration by path* adalah untuk memparalelkan sebanyak mungkin pembangkit tenaga listrik sebelum menormalkan kembali beban secara keseluruhan. Sebuah teknik yang berbeda jika menggunakan metode *restoration by zones*, sistem tenaga listrik akan dibagi menjadi beberapa zona (*island*) pemulihan. Setiap zona pemulihan memiliki minimal satu unit *black start*. Nantinya zona-zona yang telah pulih akan diparalelkan seluruhnya. Kriteria untuk memilih salah satu metode pemulihan dari keduanya sangat dipengaruhi jenis pembangkit dari sistem tenaga listrik yang *blackout* dan juga dipengaruhi oleh jumlah unit *black start* nya. Pemulihan dengan metode *restoration by zones* lebih cocok untuk sistem yang memiliki beberapa unit *black start*, sementara pemulihan dengan metode *restoration by path* cocok untuk kasus di mana unit *black start* nya hanya berada pada daerah tertentu saja. (Barsali, dkk, 2008).



2.4.3 Persiapan Untuk Mengatasi Gangguan Besar

2.4.3.1 Menyusun SOP (Standing Operation Procedures)

Dalam SOP (Standing Operation Procedures) harus disebutkan unit-unit pembangkit yang harus blackstart. Harus diperhatikan dalam penyusunan jadwal pemeliharaan, agar selalu ada unit yang bisa blackstart yang siap operasi atau bekerja.

2.4.3.2 Menyusun Ketentuan Konfigurasi Jaringan

Di setiap busbar pusat listrik maupun busbar gardu induk yang menyangkut posisi saluran transmisi, dalam kaitannya dengan pengiriman dengan penerima tegangan.

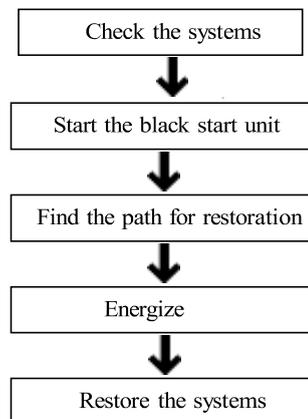
2.4.3.1 Ketentuan PMT Yang dibuka Saat Terjadi Blackout

Dalam persiapan mengatasi blackout harus ada ketentuan PMT yang harus bekerja duluan dalam mengatasi blackout agar dapat menghindari kerusakan sistem yang lebih parah lagi.

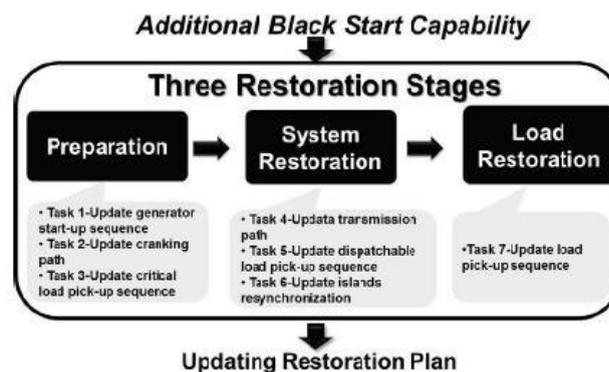
2.5 Black Start

Berdasarkan kebutuhan daya pada proses start-up, unit dapat dibagi menjadi dua kelompok: Black Start Unit, misalnya PLTA dan PLTG, yang dapat melakukan start dengan sumber listrik internal, dan Non Black Start Unit, seperti PLTU yang memerlukan sumber listrik eksternal (sun, dkk, 2011)

Untuk mencapai waktu pemulihan sistem tenaga listrik yang lebih cepat setelah gangguan blackout, penambahan unit black start mungkin berguna untuk mempercepat proses pemulihan. Untuk prosedur umum black start dapat dilihat pada gambar 2.17. setelah penambatan black start unit langkah-langkah pemulihan sistem tenaga listrik seperti urutan start unit-unit pembangkit, pemeliharaan jalur transmisi, dan urutan pemulihan beban, akan berubah. Kemudian masing-masing tahap pemulihan akan menyesuaikan langkah-langkah pemulihan untuk mengakomodasi unit black start yang baru dipasang. Ada tujuh tugas dalam tiga tahap restorasi dapat dilakukan untuk memperbaiki rencana pemulihan dengan pemasangan unit black start baru (sun, dkk, 2011) sebagaimana gambar 2.28



Gambar 2. 35 Prosedur umum dari black start (Goo, dkk, 2016)



Gambar 2. 36 Update rencana pemulihan setelah penambahan unit blackstart

Selain itu, pemulihan sistem pasca blackout juga tergantung dari lama start unit pembangkit. Proses start PLTA memerlukan waktu sekitar 4 menit, PLTG membutuhkan waktu sekitar 8-15 menit sementara turbin uap dapat membutuhkan waktu beberapa puluhan menit hingga hitungan jam (Sun, dkk, 2011).

$$\text{Kemampuan Pembangkit (\%)} = \frac{\text{Daya Terbaca (MW)}}{\text{Daya Maksimal (MW)}} \times 100\% \quad (2.15)$$

2. 6 Kebutuhan Daya Start Pembangkit Listrik (Cranking Power)

Semua unit pembangkit membutuhkan daya listrik untuk dapat melakukan proses *start*, daya ini sering diistilahkan dengan *cranking power*. Daya ini digunakan untuk mengoperasikan peralatan bantu unit pembangkit sehingga unit tersebut mampu memunculkan sinyal *ready to start*. Karena belum adanya data



yang valid mengenai cranking power unit pembangkit maka cranking power unit peembangkit dalam sistem 150 kv PLN Sktor Keramasan Palembang mengacu pada penelitian-penelitian sebelumnya, menurut jurnal penelitian IEEE “Black Start Capability Assesment in Power System Restoration” yang ditulis oleh Wei Sun, Chen Chiung Liu dan Shanshan Liu serta dari jurnal penelitian Electric power system research “Restoration Island Supplied by Gas Turbines” yang ditulis oleh S.Barsali,D. Poli dan A. Pratico jumlah daya yang dibutuhkan tergantung pada jenis unit pembangkit yakni:

- a. Kurang 1% dari daya terpasang pembangkit hidro, hanya beberapa ratus kilowatt untuk 100 MW pembangkit hidro
- b. 1% - 2% dari daya terpasang pembangkit turbin gas dan pembangkit geothermal
- c. 3% sampai 10% dari daya terpasang pembangkit turbin uap.
- d. Untuk cranking power unit PLTMG disamakan dengan persentasi unit turbin gas

sehingga kebutuhan cdaya start atau cranking power (CP) pembangkit listrik dapat dinyatakan dengan persamaan

$$CP = n\% \times \text{Daya Terpasang Pembangkit} \quad (2.16)$$

Keterangan :

CP = Cranking Power

n% = Nilai persentase tergantung jenis pembangkit yang akan dicari nilai cranking powernya

2.7 Interkoneksi Sistem Tenaga Listrik

Pusat listrik yang besar umumnya beroperasi dalam sistem interkoneksi. Pada sistem interkoneksi terdapat banyak pusat listrik dan banyak pusat beban yang disebut Gardu Induk yang dihubungkan satu sama lain oleh saluran transmisi. Di setiap GI terdapat beban berupa jaringan distribusi yang melayani para konsumen tenaga listrik. Jaringan distribusi berta konsumen ini merupakan suatu subsistem distribusi. Sub sistem dari setiap GI umumnya tidak mempunyai hubungan listrik satu sama lain, Karena operasi pusat-pusat listrik dalam sistem interkoneksi saling



mempengaruhi satu sama lain, maka perlu ada koordinasi. Koordinasi operasi ini dilakukan oleh pusat pengatur beban. Koordinasi terutama meliputi :

- a. Koordinasi pemeliharaan
- b. Pembagian beban yang ekonomis
- c. Pengaturan frekuensi
- d. Pengaturan tegangan
- e. Prosedur mengatasi gangguan

Pengaturan tegangan yang dilakukan tidak terlepas dari adanya potensi jatuh tegangan atau drop tegangan (ΔV) yang terjadi. Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu pengantar. Jatuh tegangan pada transmisi tenaga listrik berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban. Jatuh tegangan merupakan selisih antara tegangan kirim (V_K) dengan tegangan terima (V_T) yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Jatuh Tegangan} = \Delta V = V_K - V_T \quad (2.17)$$

2.8 Load Shedding

Load shedding atau pelepasan beban merupakan suatu skenario yang dilakukan untuk pengendalian dampak gangguan yang berpotensi menyebabkan gangguan *blackout*. Pelepasan beban dilakukan secara bertahap sesuai dengan tingkat turunnya frekuensi sistem tenaga listrik (Nugraheni, 2011).

Terjadinya pelepasan beban pada umumnya disebabkan oleh adanya beban lebih pada sistem, agar sistem menjadi seimbang kembali yakni seimbang antara *supply* daya oleh pembangkit dan permintaan beban oleh pelanggan maka dilakukanlah pelepasan beberapa beban. Sistem tenaga listrik yang bekerja stabil memiliki daya yang dihasilkan pembangkit memiliki besar yang sama dengan jumlah daya permintaan beban.

Suatu generator akan berputar dengan frekuensi yang semakin menurun jika kopel penggerak mekanik generator besarnya kurang dari torsi beban. Ketika suatu generator pembangkit yang berada dalam suatu interkoneksi lepas sistem, secara otomatis beban yang awalnya menjadi tanggungan pembangkit yang lepas sistem akan menjadi tanggungan generator yang masih bekerja dalam sistem. Dengan



demikian torsi beban pada generator yang masih mampu bekerja akan bertambah. Peningkatan torsi beban pada generator ini akan diimbangi dengan kopel mekanik penggerak generator dengan melakukan pengaturan pada governor untuk mempertahankan frekuensi kerja sistem tetap konstan. Namun ada saat ketika governor telah dibuka maksimal, kopel penggerak mekanik generator besarnya masih kurang dari torsi beban. Hal inilah yang menjadikan frekuensi generator menjadi turun. Untuk mengatasi hal tersebut tentu diperlukan suatu pengurangan torsi beban dengan beberapa cara diantaranya adalah pelepasan beban (Nugraheni, 2011).

Ketika akan dilakukan pelepasan beban yang bertujuan untuk pemulihan frekuensi, hendaknya memenuhi beberapa syarat antara lain :

- a. Pelepasan beban dilakukan secara bertahap yang bertujuan apabila pada pelepasan pada tahap pertama frekuensi yang normal belum juga pulih masih dapat dilakukan pelepasan beban tahap berikutnya untuk menormalkan frekuensi.
- b. Jumlah beban yang dilepas hendaknya seminimal mungkin sesuai dengan kebutuhan sistem dalam memperbaiki frekuensi.
- c. Beban yang dilepas adalah beban yang prioritasnya paling rendah dibandingkan beban lain dalam suatu sistem. Oleh sebab itu seluruh beban terlebih dahulu diklasifikasikan menurut kriteria-kriteria tertentu.
- d. Pelepasan beban harus dilakukan tepat guna. Oleh karenanya harus ditentukan waktu tunda minimum relai untuk mendeteksi apakah penurunan frekuensi generator akibat beban lebih atau pengaruh lain seperti masuknya beban yang sangat besar ke dalam sistem secara tiba-tiba (Nugraheni, 2011).

Pelepasan beban akibat penurunan frekuensi diklasifikasikan menjadi 2 macam berdasarkan laju penurunannya yaitu :

- a. Pelepasan beban manual

Pelepasan secara manual dilakukan apabila laju penurunan frekuensi sangat rendah. Sehingga untuk memperbaiki frekuensi tidak membutuhkan waktu cepat



karena sistem dirasa aman untuk jangka waktu yang cukup lama. Pelepasan beban secara manual ini akan membutuhkan beberapa operator yang cukup banyak, waktu yang dibutuhkan pun cukup lama bila dibandingkan dengan pelepasan beban otomatis.

b. Pelepasan beban otomatis

Pelepasan beban otomatis dilakukan ketika laju penurunan frekuensi cukup tinggi. Dengan adanya pelepasan beban otomatis maka sistem secara keseluruhan dapat diselamatkan dengan cepat tanpa harus menunggu operator bekerja. Pelepasan beban otomatis biasanya didukung dengan beberapa komponen, seperti misalnya penggunaan rele frekuensi (Nugraheni, 2011).

2.9 Pengaturan Frekuensi

Dalam pemulihan sistem tenaga listrik pengaturan frekuensi sangat perlu diperhatikan karena beban yang dipulihkan harus seimbang dengan daya mampu unit *black start*. Penyimpangan frekuensi dari nilai nominal harus selalu dalam batas toleransi yang diperbolehkan. Daya aktif mempunyai hubungan erat dengan nilai frekuensi dalam sistem.

Menurut hukum Newton ada hubungan antara kopel mekanis penggerak generator dengan perputaran generator (Marsudi, 2015), yaitu :

$$T_G - T_B = Hx \frac{d\omega}{dt} \quad (2.18)$$

T_G = Kopel penggerak generator (N.m)

T_B = Kopel beban yang membebani generator (N.m)

H = Momen inersia dari generator beserta mesin penggerakannya (kg.m^2)

ω = Kecepatan sudut perputaran generator (rad/s) Sedangkan frekuensi yang dihasilkan generator adalah :

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

Hal ini berarti bahwa pengaturan frekuensi dalam sistem berarti pula pengaturan kopel penggerak generator atau juga berarti pengaturan daya aktif generator.



2.9.1 Peran Governor Dalam Pengaturan Frekuensi

Dalam pembangkit listrik, pengaturan putaran peggerak generator adalah menggunakan turbin. Pengaturan turbin ketika mulai bergerak hingga mencapai kondisi stabil dilakukan oleh governor. Governor merupakan suatu katup yang berfungsi mengatur banyak sedikitnya jumlah (debit) air ke turbin air, jumlah (entalpi) uap/gas ke turbin uap/gas atau bahan bakar solar yang dialirkan ke ruang bakar mesin diesel. Bila tidak ada governor maka mesin-mesin penggerak utama generator akan mengalami *overspeed* bila beban turun mendadak dan akan mengalami *overload* bila beban listrik naik.

Governor bekerja secara hidrolis/mekanis, sedangkan sinyal masukan dari keluaran arus generator berupa elektris, sehingga masukan ini perlu diubah ke mekanis dengan menggunakan elektrik *actuator* untuk menggerakkan motor listrik yang menghasilkan gerakan mekanis yang diperlukan oleh governor.

Pada beberapa generator yang beroperasi paralel, setelah sebelumnya disamakan tegangan, frekuensi, beda fasa dan urutan phasanya, perubahan beban listrik tidak akan dirasakan oleh masing-masing generator pada besaran tegangan dan frekuensinya selama beban masih dibawah kapasitas total paralelnya, sehingga tegangan dan frekuensi ini tidak digunakan sebagai sumber sinyal bagi governor. Untuk itu digunakan arus keluaran dari masing-masing generator sebagai sumber sinyal pembagian beban sistem paralel generator-generator tersebut. Mode kerja governor menurut karakteristik tanggapan governor terhadap penambahan beban yang *disupply* terbagi menjadi dua yaitu :

a. *Governor Droop*

Merupakan suatu mode governor yang mengatur kecepatan turbin pada berbagai variasi beban dapat menghasilkan daya aktif keluaran generator tetap. Ketika terjadi gangguan yang menyebabkan lepasnya beberapa beban, agar tidak terjadi pemborosan daya yang dikeluarkan pengaturan kembali sistem *droop* generator harus diatur oleh operator.

b. *Isochronous*

Merupakan suatu mode governor yang mengatur kecepatan turbin agar



dapat menghasilkan daya aktif keluaran sesuai permintaan beban. Dengan begitu daya yang dihasilkan generator sesuai dengan kondisi beban. Sehingga apabila terjadi perubahan beban, maka governor akan memelihara putaran turbin agar frekuensinya tetap berada di dalam rentang yang diizinkan.

Pada saat terjadi penambahan beban secara mendadak dalam masa pemulihan, governor pada unit black start akan merespon secara otomatis menstabilkan putaran generator, putaran generator mempengaruhi frekuensi sistem. Untuk membaca frekuensi simulasi dalam bentuk satuan hertz dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut :

$$Frekuensi (HZ) = Frekuensi\ terbaca\ (pun) \times Frekuensi\ Nominal\ (Hz)$$

2.9.2 Speed Droop Governor

Speed droop adalah bilangan presentase yang menyatakan kepekaan turbin merespon perubahan frekuensi. Semakin kecil nilai presentase speed droop maka semakin peka terhadap perubahan frekuensi. Speed droop merupakan salah satu karakteristik governor yang perlu diperhatikan dalam pengaturan frekuensi. Sistem yang terdiri dari banyak unit pembangkit apabila terjadi perubahan beban maka unit pembangkit yang mempunyai speed droop kecil yang mengalami penambahan beban yang lebih besar daripada unit pembangkit yang mempunyai speed droop besar. Sistem yang terdiri dari banyak unit pembangkit sesungguhnya dapat dianalogikan dengan sebuah unit pembangkit besar yang mempunyai speed droop tertentu. Dalam hal ini sering dipergunakan istilah statisme dari sistem yaitu suatu angka yang menggambarkan berapa MW yang diperlukan untuk menurunkan frekuensi sistem satu hertz. Statisme ini tergantung kepada banyaknya unit pembangkit yang beroperasi dalam sistem serta penyetelan speed droop-nya, statisme dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\frac{F_1 - F_2}{F_2 - F_3} = \frac{-(P_1 - P_2)}{-(P_2 - P_3)} \quad (2.19)$$



Dimana $F1-F2$ = turunnya frekuensi karena beban naik dari $P1$ menjadi $P2$ dan $F2-F3$ = turunnya frekuensi karena beban naik dari $P2$ menjadi $P3$. Tanda negatif menunjukkan frekuensi F turun apabila beban P naik.

Jika statisme kita beri tanda k sedangkan $F1-F2 = \Delta F1$ dan $F2-F3 = \Delta F2$ sedangkan $P1-P2 = \Delta P1$ dan $P2-P3 = \Delta P2$, maka persamaan dapat ditulis :

$$K = \frac{\Delta F1}{\Delta F2} = \frac{-\Delta F1}{\Delta P2} \quad (2.20)$$

Secara umum persamaan :

$$K = \frac{\Delta F}{-\Delta p} \text{ atau } \Delta P + \frac{\Delta F}{k} = 0 \quad (2.21)$$

Kebalikan dari statisme adalah $\frac{1}{k}$ dapat ditulis K_f sehingga didapat :

$$\Delta P + K_f \Delta F = 0$$

$$\text{Dimana } K_f = \frac{1}{k} = -\frac{\Delta P1}{-\Delta P2}$$

Konstanta K_f disebut energi pengaturan dari sistem dan dinyatakan dalam MW/Hertz. Apabila suatu pembangkit atau sistem diinterkoneksi dengan pembangkit atau sistem lain maka akan konstanta K_f dari masing-masing pembangkit atau sistem yang diinterkoneksi dapat ditinjau sebagai berikut.

Untuk masing-masing sistem berlaku persamaan :

$$\Delta P = -(K_f \Delta F) \quad (2.22)$$

Sedangkan ΔP untuk sistem interkoneksi adalah jumlah dari ΔP yang terjadi pada setiap sistem atau :

$$\Delta P \text{ interkoneksi} = \sum \Delta P1 \quad (2.23)$$

Karena frekuensi dalam seluruh sistem yang diinterkoneksi adalah sama, menjadi :

$$\begin{aligned} \Delta P \text{ interkoneksi} &= K_f \text{ interkoneksi } \Delta F \\ &= \sum \Delta P1 = \sum -K_f \Delta F \end{aligned}$$

Jadi didapat :

$$K_f \text{ interkoneksi} = \sum K_f$$



Dari persamaan bahwa energi pengaturan sistem interkoneksi merupakan jumlah energi pengaturan dari masing-masing pembangkit atau sistem terkoneksi. Persamaan () memiliki arti fisik bahwa pada sistem interkoneksi perubahan frekuensi lebih sukar terjadi, memerlukan perubahan beban yang lebih besar daripada sistem yang tidak diinterkoneksi. Konstanta K_f tergantung kepada penyetelan speed droop masing-masing governor yang ada dalam sistem, kalau speed droop-nya kecil, peka terhadap perubahan beban, maka K_f menjadi besar begitupun sebaliknya apabila speed droop disetel besar akan menghasilkan K_f yang kecil (Marsudi, 2015)

2.10 DigSILENT Power Factory 15.1

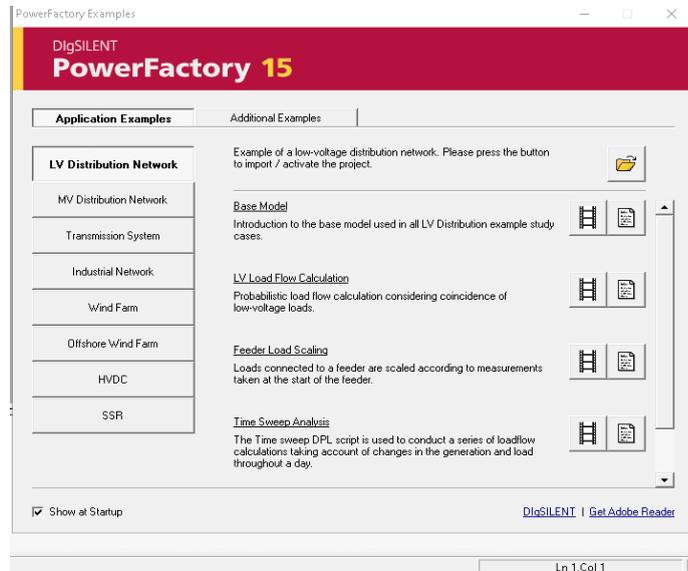
DIGSILENT Power Factory merupakan software engineering tool yang digunakan untuk analisis industri, utilitas, dan analisa sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ini dirancang sebagai paket perangkat lunak canggih yang terintegrasi dan interaktif yang didedikasikan untuk sistem tenaga listrik dan analisis kontrol dalam rangka mencapai tujuan utama perencanaan dan optimasi operasi.

DIGSILENT atau Digital Simulation and Electrical Network Calculation Program. DIGSILENT dirancang dan dikembangkan oleh para insinyur berkualitas dan programmer dengan pengalaman bertahun-tahun di kedua bidang analisis sistem tenaga listrik dan bidang pemrograman. Akurasi dan validitas dari hasil yang diperoleh dengan perangkat lunak ini telah dikonfirmasi dalam sejumlah besar dan diimplementasikan oleh organisasi-organisasi yang terlibat dalam perencanaan dan operasi sistem tenaga.

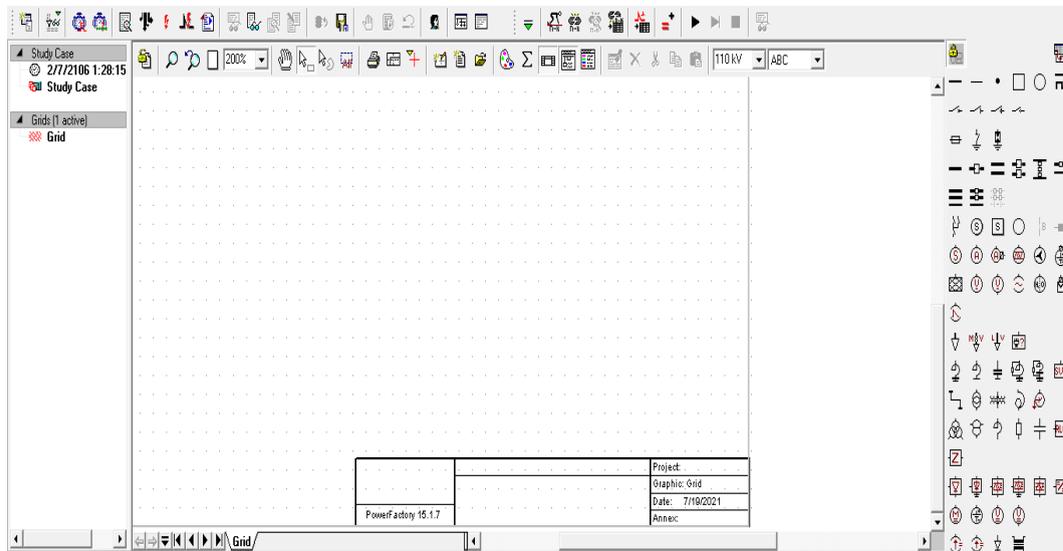
Dalam rangka memenuhi kebutuhan analisis sistem tenaga listrik saat ini, kekuatan sistem paket perhitungan DIGSILENT dirancang sebagai alat rekayasa terpadu yang menyediakan teknik lengkap “walk-around” melalui semua fungsi yang tersedia. Dengan hanya menggunakan satu database, yang berisi semua data yang dibutuhkan untuk semua peralatan dalam sistem tenaga (misalnya data busbar, data generator, data proteksi, data controller), DIGSILENT dapat dengan mudah



mengeksekusi salah satu atau semua fungsi yang tersedia, semua dalam lingkup program yang sama. Pada penelitian ini digunakan software DIgSILENT 15.1



Gambar 2. 37 Tampilan Program DIgSILENT 15.1



Gambar 2. 38 Tampilan icon program DIgSILENT 15.1

