

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pada penelitian sebelumnya (Nugraheni, 2011), dengan judul Simulasi Pelepasan Beban Dengan Menggunakan Rele Frekuensi Pada Sistem Tenaga Listrik CNOOC SES Ltd. melakukan penelitian pelepasan beban guna memperbaiki frekuensi saat terjadinya beban lebih akibat lepasnya generator pada sistem pembangkit listrik. Adapun perbedaan yang pada penelitian ini adalah pada penelitian sebelumnya jenis pembangkit yang digunakan adalah pembangkit listrik tenaga gas dengan frekuensi 60 Hz sedangkan penelitian yang akan dilakukan pada pembangkit listrik tenaga uap dengan frekuensi 50 Hz, yang kemudian dilanjutkan dengan analisa perubahan frekuensi setelah dilakukannya proses pelepasan beban.

Kemudian pada penelitian yang dilakukan oleh (Parohon, 2012) dengan judul Analisa Kestabilan Transien dengan Pelepasan Pembangkit dan Beban (*Generation/Load Shedding*) Pada Sistem Jaringan Distribusi Tragi Sibolga 150/20KV(Studi Kasus Pada Penyulang Tragi Sibolga, Sumut), pada penelitian tersebut dibahas mengenai proses pelepasan beban pada jaringan distribusi di Sumatra Utara yang bersumber dari beberapa pembangkit, serta dijelaskan pula mengenai pelepasan yang terjadi antar pembangkit yang dilakukan dengan simulasi. Dari hasil simulasi yang didapat kemudian dijelaskan pula mengenai kerugian akibat pelepasan beban.

Selain itu pada penelitian yang dilakukan oleh (Mawar, 2009), Dengan judul Pelepasan Beban Menggunakan *Under Frequency Relay* Pada Pusat Pembangkit Tello. Menjelaskan mengenai pemulihan frekuensi saat terjadi pelepasan beban secara otomatis dengan menggunakan rele frekuensi yang diatur persekian detik.

Jika terjadi gangguan dalam sistem yang menyebabkan daya yang tersedia tidak dapat melayani beban, misalnya disebabkan oleh adanya unit pembangkit yang trip, maka untuk mencegah terjadinya *collapse* pada sistem perlu dilakukan pelepasan beban. Kondisi jatuhnya salah satu unit pembangkit dapat dideteksi dengan adanya penurunan frekuensi sistem yang drastis.

2.2 Sistem Tenaga Listrik

Sebuah sistem dalam rangkaian proses pembangkitan, penyaluran dan pemanfaatan energi listrik hingga energi tersebut dapat dikonsumsi oleh masyarakat secara luas dan aman disebut dengan sistem tenaga listrik. Energi listrik mula-mula dihasilkan oleh sebuah generator dengan memanfaatkan berbagai penggerak utama (*Prime mover*). Penggerak utama tersebut menghasilkan sebuah energi mekanis yang memanfaatkan sumber daya alam seperti air, uap, dan gas. Dalam hal ini generator menghasilkan tegangan dan arus yang nantinya akan ditransmisikan ke beban. Tahap sebelum tegangan listrik dikonsumsi oleh konsumen adalah sistem transmisi. Sistem transmisi adalah proses dimana tegangan akan disalurkan melalui sebuah saluran transmisi dan memiliki komponen penting lainnya yaitu transformator penaik tegangan (*transformator step up*). Hal ini dikarenakan pada umumnya letak pembangkit dengan konsumen sangat jauh sehingga untuk mengurangi rugi-rugi daya dalam proses penyaluran tenaga

listrik tegangan perlu dinaikan sehingga arus pada transmisi kecil. Tegangan pada sistem transmisi kemudian disalurkan ke sistem distribusi ke wilayah-wilayah seluruh Indonesia, oleh karena itu sebelum tegangan listrik digunakan pada peralatan listrik oleh konsumen tegangan pada sistem transmisi harus diturunkan komponen penting disini yaitu transformator penurun tegangan (*transformator step down*). Untuk mendapatkan energi listrik yang andal dan aman bagi pemakainya, maka rangkaian sistem ini dilengkapi dengan sistem proteksi.

Pada sistem pembangkit tenaga listrik komponen utama yang digunakan adalah generator dan penggerak utama (*prime mover*). Generator merupakan sebuah alat yang berfungsi mengubah energi kinetik menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Sedangkan penggerak utama (*prime mover*) berfungsi sebagai pemutar rotor generator untuk menghasilkan energi listrik. penggerak utama (*prime mover*) sebuah alat yang berfungsi menghasilkan energi mekanik alat tersebut berupa sebuah turbin. Turbin dikopel dengan rotor generator dan bekerja dengan memanfaatkan berbagai macam sumber energi, baik air, uap, gas, dan diesel (mesin berbahan bakar minyak).

Generator yang umum digunakan oleh sistem pembangkit listrik adalah generator sinkron. Pemilihan generator sinkron sebagai pembangkit tenaga listrik disebabkan oleh karakteristik mesinnya yang mampu menghasilkan tegangan yang relatif konstan. Pemberian suplai tegangan yang tidak stabil atau fluktuatif akan memberikan efek negatif kepada komponen dari peralatan listrik yang digunakan konsumen. Dengan suplai tegangan yang tidak stabil, usia pakai dari suatu

peralatan listrik semakin lama akan semakin berkurang. Tentu hal ini merugikan konsumen.

2.2.1 Generator Sinkron

Generator sinkron merupakan mesin listrik arus bolak balik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik AC sinkron. Energi mekanik diperoleh dari penggerak mula (*prime mover*) yang dihubungkan dengan rotor generator, sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang melibatkan kumparan rotor dan kumparan stator. Mesin listrik arus bolak-balik ini disebut sinkron karena rotor berputar secara sinkron atau berputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan medan magnet putar.

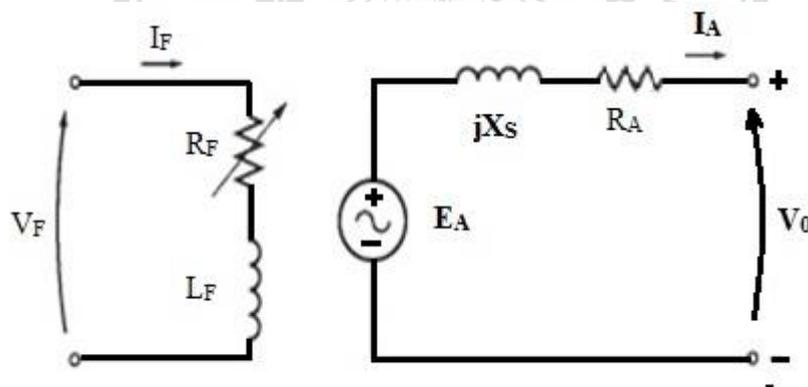
Generator sinkron secara umum dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk rotornya, yaitu generator turbo atau *cylindrical-rotor* generator dan *salient pole* generator. Generator yang digunakan pada pembangkit listrik yang besar biasanya merupakan jenis generator turbo yang beroperasi pada kecepatan tinggi dan dikopel dengan turbin gas atau uap. Sedangkan generator *salient-pole* biasanya digunakan untuk pembangkit listrik kecil dan menengah.

Pada generator sinkron, arus searah dialirkan pada kumparan rotor yang kemudian menghasilkan medan magnet rotor. Rotor pada generator kemudian diputar oleh *prime mover*, lalu menghasilkan medan magnet putar di dalam mesin. Pada stator generator juga terdapat kumparan. Medan magnet putar menyebabkan medan magnet yang melingkupi kumparan stator berubah secara kontinu. Perubahan medan magnet secara kontinu ini menginduksikan tegangan pada

kumparan stator. Tegangan induksi ini akan berbentuk sinusoidal dan besarnya bergantung pada kekuatan medan magnet serta kecepatan putaran dari rotor. Untuk membuat generator tiga fasa, pada stator ditempatkan tiga buah kumparan yang terpisah sejauh 120° satu sama lain, sehingga tegangan yang diinduksikan akan terpisah sejauh 120° satu sama lain pula.

2.2.1.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Pada generator sinkron, suatu sumber arus DC dihubungkan dengan kumparan rotor atau kumparan medan. Hal ini mampu menghasilkan suatu medan magnet rotor. Rotor tersebut kemudian diputar oleh suatu penggerak utama (*prime mover*) sehingga muncul medan magnet putar pada mesin. Medan magnet putar tersebut menembus stator sehingga menghasilkan fluks magnet.



Gambar 2.1 Rangkaian ekuivalen generator sinkron

Ketika rotor berputar maka terjadi perubahan sudut yang dibentuk oleh normal bidang yang ditembus fluks (*stator*) dan kerapatan fluks setiap detiknya. Perubahan tersebut akan menghasilkan suatu ggl (gaya gerak listrik) induksi.

GGL induksi tersebut mampu menghasilkan arus apabila generator dihubungkan dengan suatu beban sehingga membentuk suatu rangkaian tertutup. Apabila beban yang dihubungkan dengan generator bersifat induktif maka arus yang dihasilkan dihubungkan bersifat kapasitif tegangan, begitu juga apabila beban yang dihubungkan bersifat kapasitif maka arus yang dihasilkan mendahului (*leading*) tegangan.

Arus-arus pada stator dapat menghasilkan medan magnet stator. Medan magnet stator menghasilkan tegangan stator. Tegangan output dari generator adalah resultan tegangan induksi dan tegangan stator. Tegangan ini merupakan tegangan AC (*alteranating current*), karena terdapat 3 kumparan jangkar pada stator yang dipasang melingkar dan membentuk sudut 120° satu sama lain. Pemasangan tipe kumparan tersebut menghasilkan tegangan AC 3 fasa.

Besar kecepatan medan putar stator dan kecepatan putar rotor sama sehingga generator jenis ini disebut generator sinkron. Kecepatan ini dipengaruhi oleh frekuensi dan jumlah kutub magnet generator tersebut. Hal ini dapat dinyatakan sebagai pada persamaan (2.1).

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2.1)$$

Keterangan : n_s = kecepatan sinkron (rpm)

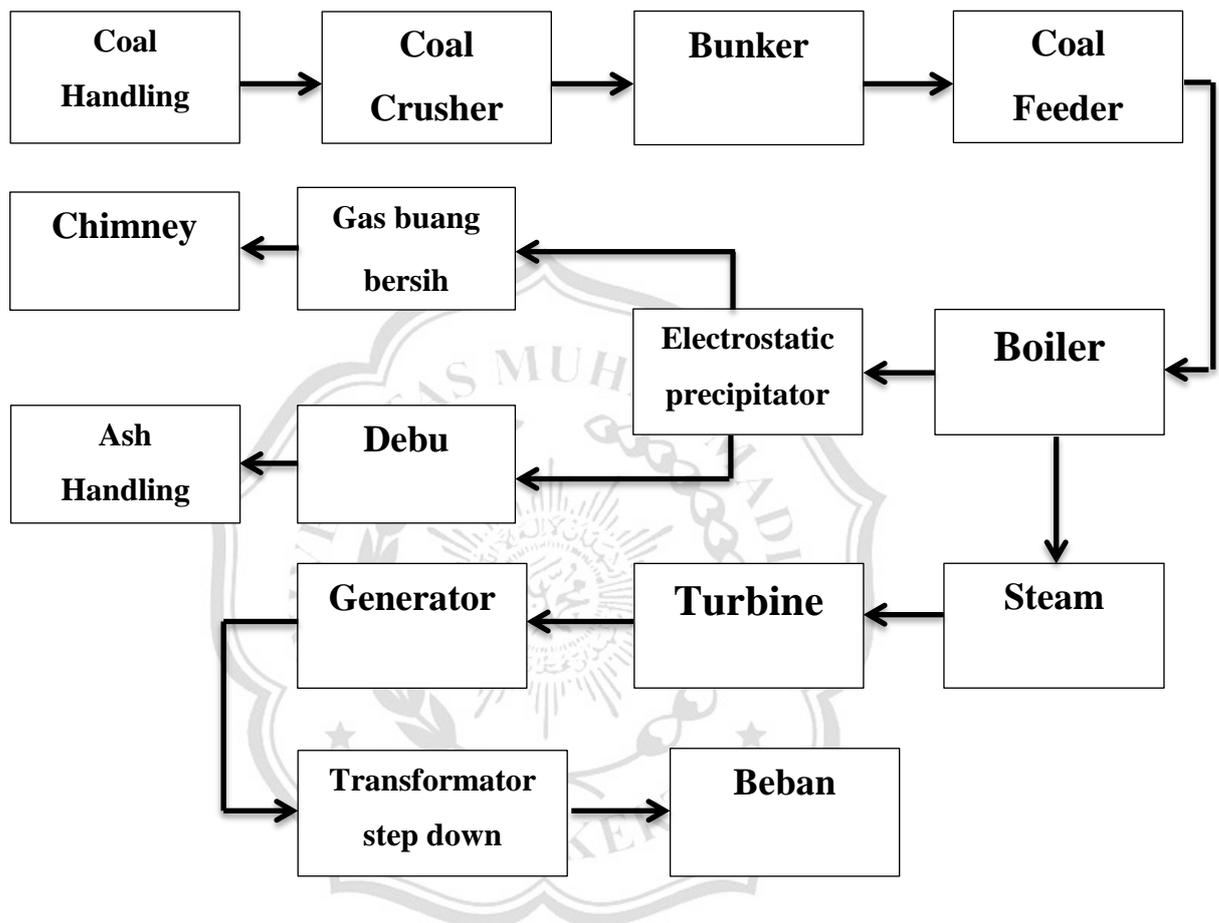
f = frekuensi (Hz)

P = jumlah kutub magnet

2.2.2 Mekanisme Kerja PLTU

Pembangkit Listrik Tenaga Uap adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama pembangkit listrik jenis ini adalah generator yang dihubungkan ke turbin dimana untuk memutar turbin diperlukan energi kinetik dari uap panas atau kering. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan berbagai macam bahan bakar terutama batu-bara dan minyak bakar serta MFO untuk start awal. Sistem kerja PLTU menggunakan bahan bakar minyak residu/MFO (*solar*) dan gas alam. Kelebihan dari PLTU adalah daya yang dihasilkan sangat besar. Konsumsi energi pada peralatan PLTU bersumber dari putaran turbin uap. PLTU adalah suatu pembangkit yang menggunakan uap sebagai penggerak utama (*prime mover*). Untuk menghasilkan uap, maka haruslah ada proses pembakaran untuk memanaskan air. PLTU merupakan suatu sistem pembangkit tenaga listrik yang mengkonversikan energi kimia menjadi energi listrik dengan menggunakan uap air sebagai fluida kerjanya, yaitu dengan memanfaatkan energi kinetik uap untuk menggerakkan proses sudu-sudu turbin menggerakkan poros turbin, untuk selanjutnya poros turbin menggerakkan generator yang kemudian dibangkitkannya energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan akan menyuplai alat-alat yang disebut beban.

Komponen-komponen pada pembangkit listrik tenaga uap tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.2 Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga uap

Prinsip kerja dari PLTU adalah dengan menggunakan siklus air-uap-air yang merupakan suatu sistem tertutup air dari kondensat atau air dari hasil proses pengondensasian dikondensor dan air yang dimurnikan dipompa oleh condensator pump ke pemanas tekanan rendah. Disini air dipanasi kemudian dimasukkan oleh *deaerator* untuk menghilangkan oksigen, kemudian air ini dipompa oleh boiler

feed water pump masuk ke *economizer*. Dari *economizer* yang selanjutnya dialirkan ke pipa untuk dipanaskan pada tube boiler.

Pada tube, air dipanasi berbentuk uap air. Uap air ini dikumpulkan kembali pada steam drum, kemudian dipanaskan lebih lanjut pada *superheater* sudah berubah menjadi uap kering yang mempunyai tekanan dan temperatur tinggi, dan selanjutnya uap ini digunakan untuk menggerakkan sudu turbin tekanan tinggi, untuk sudu turbin menggerakkan poros turbin. Hasil dari putaran poros turbin kemudian memutar poros generator yang dihubungkan dengan coupling, dari putaran ini dihasilkan energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan dari generator disalurkan dan didistribusikan lebih lanjut ke pelanggan. Uap bebas dari turbin selanjutnya dikondensasikan dari kondensor dan bersama air dari make up water pump dipompa lagi oleh pompa kondensat masuk ke pemanas tekanan rendah, daerator, boiler feed water pump, pemanas tekanan tinggi, *economizer*, dan akhirnya menuju boiler untuk dipanaskan menjadi uap lagi. Proses ini akan terjadi berulang-ulang.

Pengaturan putaran turbin ketika mulai bergerak hingga menapai kondisi stabil dilakukan oleh *governor*. *Governor* merupakan suatu katup yang berfungsi mengatur banyak sedikitnya bahan bakar yang dialirkan ke ruang bakar.

Mode kerja *governor* menurut karakteristik tanggapan *governor* perubahan beban yang disuplai terbagi menjadi 2, yaitu :

a. Droop

Merupakan suatu mode *governor* yang mengatur kecepatan turbin pada berbagai variasi beban yang dapat menghasilkan daya aktif keluaran generator tetap. Ketika terjadi gangguan yang mengakibatkan lepasnya beberapa beban, agar tidak terjadi pemborosan daya yang diabaikan pengaturan kembali sistem droop pada generator (*power adjusting*) 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 didalam rentang yang diijinkan.

2.3 Gangguan Beban Lebih

Terjadinya gangguan beban lebih suatu sistem tenaga listrik antara lain adalah akibat adanya pembangkit yang dapat mensuplai daya yang sangat besar keluar dari sistem sehingga menyebabkan terjadinya kelebihan beban pada beban yang disuplai dan besarnya daya yang dihasilkan generator tidak seimbang. Akibatnya frekuensi generator semakin lama semakin turun. Turunnya frekuensi

tersebut dapat mempengaruhi kinerja generator sehingga hal ini tidak boleh dibiarkan terjadi dalam waktu yang lama.

2.3.1. Penanggulangan Untuk Beban Lebih

Suatu sistem tenaga listrik hendaknya memiliki daya dihasilkan oleh pembangkit minimal sama dengan beban yang ditanggungnya termasuk juga rugi daya yang mungkin terjadi pada sistem tersebut. Namun demi keamanan dan keandalan sistem, sistem pembangkit lebih baik menyiapkan cadangan daya. Ketika suatu sistem interkoneksi tenaga listrik memiliki kondisi dimana daya yang dibangkitkan tidak lagi memenuhi kebutuhan daya beban karena ada pembangkit yang keluar dari sistem, frekuensi generator yang masih bisa beroperasi semakin lama akan semakin menurun karena putaran generator semakin melambat akibat beban yang ditanggungnya semakin besar.

Penurunan frekuensi berkelanjutan akan mengakibatkan pemadaman total pada sistem untuk menghindari kerusakan pada sistem pembangkitan. Hal-hal yang dapat dilakukan untuk mengatasi hal tersebut adalah :

a. Mengoptimalkan kapasitas pembangkit yang masih beroperasi

Dalam hal ini adalah mengoptimalkan cadangan daya pembangkit yang masih belum dimanfaatkan ketika seluruh pembangkit beroperasi dengan normal. Cadangan daya tersebut terdiri dari 3 macam yaitu cadangan berputar (*spinning reserve*), cadangan panas, dan cadangan dingin. Pengoptimalan daya ini dilakukan oleh pengaturan *governor*.

b. Pelepasan Beban (*Load Shedding*)

Ketika beban lebih terjadi pada sistem tenaga listrik yang telah mengoptimalkan seluruh kapasitas daya pembangkitnya diperlukan suatu pelepasan beban untuk memperbaiki frekuensinya. Pelepasan beban ini dilakukan secara bertahap sesuai dengan tingkatan turunya frekuensi.

c. Pemisiahan Sistem (*Islanding*)

Ketika penurunan frekuensi terjadi secara drastis dan pelepasan beban tidak mampu mengatasi hal tersebut, hal yang paling mungkin dilakukan sebelum pemadaman total adalah memisahkan sistem pembangkit dan beban yang masih mampu mensuplai ke dalam kelompok-kelompok kecil (tidak interkoneksi). Hal ini bertujuan untuk menyelamatkan sistem tenaga listrik yang masih bisa beroperasi dengan normal.

2.3.2 Hubungan Antara Frekuensi dan Daya Aktif

Suatu generator bekerja menghasilkan suatu daya keluaran yang disalurkan ke beban. Pada umumnya daya yang dihasilkan generator besarnya sesuai dengan permintaan daya pada beban. Namun, kenyataannya daya yang dihasilkan generator lebih besar bila dibandingkan dengan permintaan daya beban karena terdapat rugi-rugi daya disepanjang saluran transmisi dan distribusi.

Daya dalam gerak lurus dapat didefinisikan sebagai gaya yang dialami suatu benda yang bergerak pada jarak tertentu persatuan waktu. Hal ini juga berlaku bagi daya yang dihasilkan generator. Generator memiliki bagian yang berputar, sehingga tinjauan daya yang dihasilkan generator adalah daya yang dihasilkan oleh suatu benda berputar (*rotasi*) dan bukan merupakan benda statis. Oleh sebab

itu, daya yang dihasilkan generator dapat didefinisikan sebagai momen gaya (*torsi*) yang dialami generator yang berputar sebesar sudut tertentu per satuan waktu seperti pada persamaan (2.2)

$$P = \tau \frac{d\theta}{dt} \quad (2.2)$$

Besarnya perubahan sudut rotasi dari bagian generator yang berputar per satuan waktu merupakan nilai dari kecepatan sudut generator tersebut.

$$P = \tau \omega = \tau \cdot 2\pi f \quad (2.3)$$

$$P \approx \tau \quad (2.4)$$

keterangan : P = Daya yang dibangkitkan generator (Watt)

τ = Momen gaya/ kopel mekanik generator(Nm)

θ = Sudut rotasi (rad)

t = Waktu (s)

f = Frekuensi

ω = Kecepatan sudut putar (Rad/s)

Dari persamaan (2.2) terlihat bahwa perubahan daya aktif yang dibangkitkan generator akan menyebabkan perubahan pada *torsi* kerja. Perubahan torsi kerja ini akan mempengaruhi frekuensi sistem. Perubahan daya aktif yang dihasilkan generator terjadi apabila permintaan daya oleh beban berubah. Hal ini tidak boleh dibiarkan terjadi apabila terjadi karena generator memiliki rentang

frekuensi kerja, maka generator tersebut akan lebih cepat mengalami kerusakan. Oleh sebab itu, untuk mempertahankan besarnya frekuensi sistem diperlukan pengaturan pada besarnya kopel mekanis penggerak generator.

Kopel mekanis penggerak generator berkaitan dengan besarnya bahan bakar yang digunakan untuk menggerakkan prime mover atau turbin. Pengaturan ini dilakukan oleh *governor*. Untuk mendapatkan frekuensi konstan, besarnya kopel mekanis penggerak generator sama dengan besarnya torsi beban ketika kopel mekanis penggerak generator kurang dari torsi beban maka frekuensi generator semakin lama semakin menurun. Ketika kopel mekanis penggerak generator lebih besar daripada torsi beban maka semakin lama frekuensi generator semakin meningkat. Frekuensi yang diinginkan adalah konstan di rentang yang diijinkan, untuk mendapatkan keadaan tersebut, hal ini merupakan tugas *governor* untuk mengatur banyaknya bahan bakar yang digunakan.

Hal ini dapat dinyatakan sebagai dalam persamaan (2.5)

$$T_G - T_B = J \frac{d\omega}{dt} = J 2\pi \frac{d\omega}{dt} \quad (2.5)$$

Keterangan : T_G = kopel penggerak mekanik generator (Nm)

T_B = Torsi Beban (Nm)

J = Momen Inersia penggerak mekanik generator (kg m^2)

ω = Kecepatan Sudut putar generator (rad/s)

T = waktu (s)

Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa :

- a. Jika kopel penggerak mekanik generator lebih besar daripada torsi beban maka perubahan kecepatan sudut putar generator terhadap waktu bernilai positif, artinya frekuensi generator semakin meningkat.
- b. Jika kopel penggerak mekanik generator bernilai sama dengan torsi beban maka perubahan kecepatan sudut putar generator terhadap waktu bernilai nol, artinya kecepatan sudut tetap setiap satuan waktu akibatnya frekuensi sistem konstan.
- c. Jika kopel penggerak mekanik generator bernilai lebih kecil daripada torsi beban maka perubahan kecepatan sudut putar generator terhadap waktu bernilai negatif, artinya kecepatan sudut putar semakin lama semakin melambat dan frekuensinya semakin turun.

2.3.3 Kestabilan Transien Pada Sistem Tenaga

Arus yang mengalir pada sebuah generator AC atau motor serempak bergantung pada besarnya tegangan yang dibangkitkan, pada sudut fasa tegangan dalam (*internal*) relatif terhadap sudut fasa tegangan dalam pada semua mesin lain yang ada pada sistem, dan pada karakteristik jaringan dan beban.

Sudut fasa tegangan dalam tergantung pada posisi relatif rotor-rotor mesin. Jika keadaan serempak dari generator-generator pada suatu sistem tidak dipelihara, sudut fasa dari tegangan dalamnya akan selalu berubah-ubah satu terhadap yang lainnya, dan keadaan ini tidak akan memungkinkan pengoprasian yang baik. Sudut fasa tegangan-dalam pada mesin-mesin serempak dapat tetap

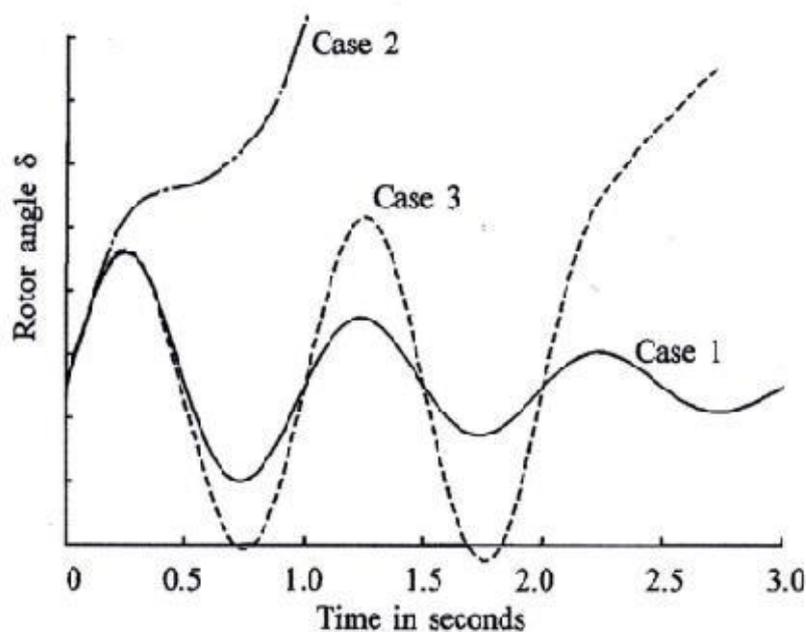
konstan hanya jika kecepatan semua mesin tetap konstan, yaitu sama dengan kecepatan yang sesuai dengan frekuensi fasa acuan. Jika beban pada salah satu generator atau pada keseluruhan sistem berubah, arus yang mengalir pada generator atau pada keseluruhan sistem yang berubah. Jika perubahan arus tidak menyebabkan perubahan pada besarnya tegangan-dalam mesin, sudut fasa tegangan-dalam harus berubah. Jadi perubahan sesaat pada kecepatan diperlukan untuk mendapatkan pengaturan sudut fasa tegangan yang satu terhadap yang lain, karena sudut fasa ditentukan oleh posisi relatif rotor-rotornya. Jika mesin-mesin sudah menyesuaikan diri masing-masing pada sudut fasa yang baru, atau jika suatu gangguan yang mengakibatkan perubahan sesaat pada kecepatan sudah ditiadakan, mesin-mesin tersebut harus kembali beroperasi pada kecepatan serempak. Jika salah satu mesin tidak tetap serempak dengan keseluruhan sistem, terjadilah arus sirkulasi (*circulating current*) yang besar. Dalam suatu sistem yang dirancang cukup baik, beroprasinya rele dan pemutus arus akan melepaskan mesin ini dari keseluruhan sistem. Masalah kestabilan adalah masalah pemeliharaan keadaan serempak dari generator-generator dan motor-motor dalam suatu sistem, studi kestabilan terbagi dalam studi untuk kondisi keadaan-tetap dan kondisi peralihan.

Kestabilan transien adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisme ketika terjadi gangguan transien yang besar. Respon sistem yang dihasilkan menyangkut sudut rotor generator dan dipengaruhi oleh hubungan sudut daya yang tidak linier. Kestabilan tergantung pada kondisi awal operasi sistem dan tingkat dari gangguan tersebut. Biasanya sistem tersebut

akan diubah setelah terjadi gangguan kondisi stabil berbeda dari sebelum terjadi gangguan.

Gangguan secara luas dengan berbagai tingkat kerusakan dan kemungkinan dapat terjadi pada sistem. Sistem ini dirancang dan dioperasikan sedemikian rupa untuk menjadi stabil pada set yang kemungkinan sudah dipilih. Kemungkinan yang biasanya dipertimbangkan adalah hubung singkat fasa-fasa, fasa-fasa-tanah, atau tiga fasa. Biasanya terjadi pada sistem transmisi, tetapi dapat juga terjadi pada bus dan transformator, gangguan biasanya diatasi dengan pemutusan oleh *circuit breaker* untuk mengamankan peralatan.

Pada Gambar 2.3 mengilustrasikan kondisi mesin sinkron dalam keadaan stabil dan tidak stabil, ini memperlihatkan respon dari sudut rotor pada kondisi stabil dan tidak stabil. Pada kasus pertama sudut rotor meningkat mejadi maksimum, kemudian menurun dan berosilasi dengan penurunan amplitude hingga mencapai kondisi yang stabil. Pada kasus ke-2 sudut rotor terus meningkat sampai kehilangan sinkron. Ketidak stabilan ini merupakan ketidak stabilan ayunan pertama disebabkan tidak cukupnya torsi sinkronisasi. Pada kasus ke-3 sistem stabil pada ayunan pertama tapi menjadi tidak stabil akibat dari meningkatnya osilasi pada kondisi akhir



Gambar 2.3 Respon Sudut rotor terhadap gangguan transien

2.4 Pelepasan Beban

Pelepasan beban merupakan salah satu fenomena yang terjadi disuatu sistem tenaga listrik yang mengijinkan adanya beberapa beban keluar dari sistem sehingga menghasilkan kestabilan sisem tenaga listrik. Hal ini biasanya disebabkan oleh beban lebih pada sistem, sehingga untuk dapat mengembalikan kondisi sistem seperti sediakala diperlukan pelepasan beberapa beban tertentu.

Adanya ketidaknormalan yang disebabkan oleh terjadinya beban lebih pada umumnya dipicu oleh beberapa hal, antara lain :

- a. Adanya pembangkit yang lepas dari sistem yang mengakibatkan beban yang seharusnya disuplai oleh pembangkit tersebut menjadi tanggungan pembangkit lain.

- b. Adanya gangguan pada saluran transmisi sehingga ada beberapa beban yang tidak dapat suplai oleh salah satu pembangkit dalam sistem interkoneksi.

2.4.1 Akibat Beban Lebih pada Sistem Tenaga Listrik

Gangguan berupa beban lebih, dapat mempengaruhi keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dan permintaan beban sehingga menyebabkan beberapa hal yang dapat mengganggu kestabilan sistem, yaitu :

- a. Penurunan tegangan sistem
- b. Penurunan frekuensi

Suatu sistem tenaga listrik beserta komponennya memiliki spesifikasi aman tertentu berkaitan dengan tegangan. setiap komponen memiliki nilai batas bawah dan batas atas tegangan operasi sistem. Hal ini berkaitan dengan pengaruh ketidakstabilan dan kualitas tegangan yang dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan.

Sebagian besar beban pada suatu sistem tenaga listrik memiliki faktor daya tertinggal (lagging) sehingga membutuhkan suplai daya reaktif yang cukup tinggi. Ketika terjadi gangguan pada salah satu generator dalam sistem interkoneksi maka pada generator yang lain akan terjadi kelebihan beban. Sehingga kebutuhan daya reaktif akan semakin meningkat, bahkan lebih besar bila dibandingkan dengan yang mampu dihasilkan oleh generator dan arus yang ditarik pun semakin meningkat. Akibatnya turun tegangan yang terjadi semakin besar dan menyebabkan kondisi yang tidak aman bagi generator. Untuk mengatasi hal

tersebut diperlukan suatu pelepasan beban. Namun, turun tegangan bisa juga diakibatkan oleh adanya gangguan lain seperti misalnya gangguan hubung singkat. Sehingga dalam hal ini penurunan frekuensi merupakan acuan yang lebih baik untuk melakukan pelepasan beban.

Pada dasarnya setiap generator memiliki spesifikasi tertentu berkaitan dengan rentang frekuensi kerja yang diijinkan beserta waktu operasi dari frekuensi tersebut. Penurunan frekuensi yang disebabkan oleh adanya beban lebih sangat membahayakan generator. Hal ini diakibatkan oleh kondisi generator yang mengalami kekurangan daya aktif sehingga daya aktif yang dihasilkan generator tidak dapat memenuhi permintaan beban. Akibatnya frekuensi yang dimiliki generator semakin lama semakin menurun. Ketika laju penurunan frekuensi menurun tajam, hal terburuk yang mungkin terjadi adalah pemadaman total (*black out*). Namun, apabila laju penurunan frekuensi tidak terlalu tajam, dapat segera dilakukan pelepasan beban.

2.4.2 Pelepasan Beban Akibat Penurunan Frekuensi

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

a. Pelepasan beban manual

Pelepasan beban 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 disematkan dengan cepat tanpa harus menunggu operator bekerja. Pelepasan beban otomatis biasanya didukung dengan beberapa komponen, seperti misalnya penggunaan rele frekuensi.

Pelepasan beban yang dilakukan akibat penurunan frekuensi yang merupakan efek beban lebih penting dilakukan. Selain untuk menghindari terjadinya pemadaman total, pelepasan beban dapat mencegah :

a. Penuaan yang semakin cepat dari komponen mekanik generator

Penurunan frekuensi yang cukup parah menimbulkan getaran (*vibrasi*) yang berlebihan pada sudu turbin. Hal ini mampu memperpendek usia pakai peralatan.

b. Pertimbangan pemanasan

Berkurangnya frekuensi menyebabkan berkurangnya kecepatan putaran motor pendingin generator, berakibat berkurangnya sirkulasi udara (*ventilasi*) yang dapat menyebabkan pemanasan pada generator.

c. Terjadinya eksitasi lebih

ketika terjadi penurunan frekuensi pada generator pada terganggan normal, arus eksitasi generator semakin meningkat hal ini memicu terjadinya eksitasi lebih. eksitasi lebih ini ditandai dengan fluks berlebih yang dapat menyebabkan munculnya arus pusar. Arus pusar tersebut dapat menyebabkan pemanasan pada inti generator.

2.4.3 Syarat Pelepasan Beban

Sebelum dilakukan suatu pelepasan beban yang bertujuan untuk pemulihan frekuensi, hendaknya pelepasan beban ini memnuhi beberapa kriteria antara lain :

- a. Pelepasan beban dilakukan secara bertahap dengan tujuan apabila pada pelepasan tahap pertama frekuensi belum juga pulih masih dapat dilakukan pelepasan beban tahap berikutnya, untuk memperbaiki frekuensi.
- b. Jumlah beban yang dilepaskan hendaknya seminimal mungkin sesuai dengan kebutuhan sitem tenaga listrik dalam memperbaiki frekuensi.
- c. Beban yang dilepaskan adalah beban yang memiliki prioritas paling rendah dibandingkan beban lain dalam suatu sistem tenaga listrik. Oleh sebab itu seluruh beban terlebih dahulu diklasifikasikan menurut kriteria-kriteria tertentu.
- d. Pelepasan beban harus dilakukan tepat guna. Oleh akrenanya harus ditentukan waktu tunda minimum rele untuk mendeteksi apakah penurunan frekuensi generator akibat beban lebih atau pengaruh lain

seperti misalnya masuknya beban yang sangat besar ke dalam sistem secara tiba-tiba.

Keempat kriteria tersebut harus terpenuhi, dengan begitu pelepasan beban aman untuk dilakukan.

2.5 Penurunan Frekuensi Akibat Beban Lebih

Suatu generator akan berputar dengan frekuensi yang semakin menurun apabila kopel penggerak mekanik generator besarnya kurang dari torsi beban. Ketika terdapat generator pembangkit lain yang berada dalam suatu interkoneksi lepas atau keluar dari sistem, secara otomatis beban yang ditanggung pembangkit yang lepas 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 peningkatan kopel mekanik penggerak generator dengan melakukan pengaturan pada *governor* untuk mempertahankan frekuensi kerja sistem tetap konstan. Namun, ada saat ketika *governor* telah dibuka secara maksimal untuk mengalirkan sumber energi penggerak turbin, 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 di antaranya adalah pelepasan beban.

2.5.1 Laju Penurunan Frekuensi

Penurunan frekuensi suatu generator dapat disebabkan oleh lepasnya salah satu pembangkit yang berkapasitas besar dari sistem tenaga listrik maupun gangguan hubung singkat. Terjadinya gangguan hubung singkat mengakibatkan penurunan frekuensi dalam waktu singkat, setelah itu frekuensi dapat pulih dengan sendirinya dengan bantuan pengaturan *governor*. Sedangkan penurunan frekuensi akibat beban lebih yang sangat besar diperlukan suatu pelepasan beban untuk memulihkan frekuensi.

Besarnya laju penurunan frekuensi sangat berpengaruh terhadap beberapa hal, antara lain :

a. Jenis Pelepasan Beban yang Dilakukan

Ketika tingkat laju penurunan frekuensi yang terjadi rendah maka pelepasan beban dilakukan secara manual oleh operator. Namun, bila laju penurunan frekuensi tinggi maka diperlukan pelepasan beban secara otomatis.

b. Waktu Tunda Rele

Laju penurunan frekuensi mempengaruhi pengaturan waktu tunda rele. Untuk laju penurunan frekuensi yang tinggi tentu diatur agar waktu tunda yang dimiliki rele sesingkat mungkin. Semakin lama waktu tunda rele, tentu penurunan frekuensi yang terjadi semakin besar.

c. Jumlah Beban yang Dilepas

Penurunan frekuensi yang besar harus diimbangi dengan pelepasan beban yang besar, hal ini bertujuan agar mempercepat pemulihan frekuensi. Sedangkan ketika laju penurunan frekuensi rendah, dimungkinkan untuk melakukan pelepasan beban dalam jumlah besar namun bertahap. Hal ini bertujuan untuk meminimalisasi jumlah beban yang dilepaskan.

Demikian berpengaruhnya besar laju penurunan frekuensi terhadap pelepasan beban, maka perlu diketahui faktor-faktor yang mempengaruhi besar penurunan frekuensi. Faktor-faktor tersebut antara lain:

- a. Konstanta inersia
- b. Daya mekanik generator
- c. Daya elektrik yang dibutuhkan beban

Faktor-faktor tersebut dapat digunakan untuk memperkirakan laju penurunan frekuensi. Dengan perkiraan tersebut, dapat juga ditentukan besar frekuensi akhir sesaat sebelum pemutus tenaga terbuka. Selanjutnya, jumlah beban yang harus dilepaskan untuk pemulihan frekuensi pun dapat ditentukan.

2.5.2 Pengaruh Konstanta Inersia Terhadap Penurunan Frekuensi

Setiap benda memiliki kemampuan untuk mempertahankan diri dari gangguan yang diberikan kepadanya. Untuk benda yang bergerak secara mendatar (*translasi*), besarnya kemampuan untuk mempertahankan diri tersebut dipengaruhi oleh massa. Sedangkan untuk benda berotasi kemampuan atau kecenderungan untuk mempertahankan diri tidak hanya bergantung pada massa

tetapi juga kepada momen inersia. Suatu benda yang memiliki momen inersia semakin besar artinya memiliki kemampuan yang semakin tinggi untuk mempertahankan diri. Generator merupakan benda berotasi sehingga memiliki nilai momen inersia.

$$I = \int r^2 dm \quad (2.6)$$

Keterangan : I = momen inersia

r = jarak partikel ke sumbu putar

m = Massa benda

suatu benda yang bergerak menghasilkan energi kinetik. Energi tersebut bergantung pada massa dan kecepatan bergerak benda. sedangkan energi yang dihasilkan pada kecepatan sinkron per volt-ampere dari rating generator disebut dengan kontanta inersia. Ketika suatu generator menerima tambahan beban akibat adanya gangguan pada sistem transmisi maupun generator lain yang lepas dari sistem, kestabilan dari generator tersebut akan terganggu. Beban lebih yang diterima oleh generator secara tidak langsung merupakan gangguan bagi generator. Tanggapan dari gangguan tersebut adalah terjadinya penurunan frekuensi. Besarnya tanggapan dari gangguan tersebut adalah terjadinya penurunan frekuensi, besarnya tanggapan ini bergantung pada kemampuan generator untuk mempertahankan diri dari gangguan. Semakin besar momen inersia suatu generator tersebut untuk frekuensi kerja dan rating MVA yang sama.

Tingginya nilai momen inersia suatu benda dapat memberikan ketahanan yang lebih tinggi menanggapi terjadinya gangguan.

Salah satu faktor yang mempengaruhi besar laju penurunan frekuensi suatu generator adalah konstanta inersia. Semakin besar nilai konstanta inersia maka kemampuan suatu generator dalam mempertahankan diri dalam menghadapi gangguan dalam hal ini adalah respon frekuensi terhadap kelebihan beban semakin tinggi.

2.5.3 Pengaruh Kelebihan Beban

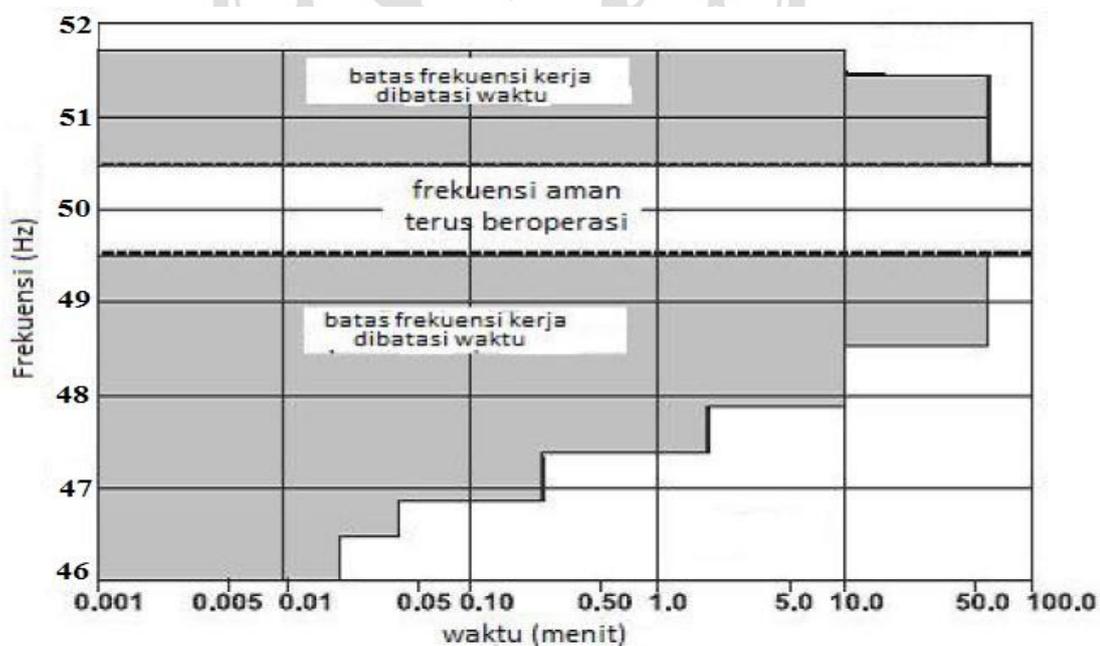
Ketidakseimbangan antara daya yang dihasilkan oleh pembangkit dan kebutuhan daya beban berakibat pada terjadinya penyimpangan frekuensi. Ketika daya yang dihasilkan generator lebih besar dibandingkan kebutuhan daya beban maka frekuensi generator semakin lama akan semakin meningkat. Sebaliknya, bila daya yang dihasilkan oleh generator lebih kecil dibandingkan dengan kebutuhan daya beban maka frekuensi semakin lama akan semakin menurun.

2.6 Standar Frekuensi Kerja Generator Turbin Uap

Peralatan listrik memiliki batas-batas operasi tertentu berkaitan dengan parameter kerja masing-masing peralatan. Hal ini bertujuan agar unjuk kerja yang dihasilkan peralatan tetap terjaga dengan baik dan umur penggunaan peralatan bisa bertahan lebih lama. Begitu juga dengan generator agar unjuk kerja generator dan masa penggunaannya sesuai dengan yang dianjurkan pabrik maka generator memiliki batas-batas operasi berkaitan dengan parameter frekuensi kerja.

Masing-masing sistem pembangkit memiliki beberapa komponen penting yang harus dimiliki yaitu generator, turbin dan motor-motor pendukung kinerja generator dan turbin. Setiap pembangkit memiliki karakteristik turbin yang berbeda bergantung kepada jenis sumber energi yang dimanfaatkan oleh pembangkit tersebut. Seperti misalnya PLTU menggunakan turbin uap, PLTA menggunakan turbin hidro. Perbedaan ini meliputi bentuk fisik serta karakteristik operasional turbin.

Generator turbin uap memiliki karakteristik frekuensi tertentu, karakteristik frekuensi kerja tersebut 50 Hz dan waktu operasi yang diijinkan telah diatur dalam beberapa standar, antara lain ANSI/IEEE C37.106-1987 dan ANSI/IEEE C37-106-2003 tentang standar frekuensi abnormal yang digunakan dalam pemasangan rele frekuensi.



Gambar 2.3 ANSI/IEEE C37-106-2003 standar frekuensi kerja

Sesuai standar (ANSI/IEEE C37.106-1987 dan ANSI/IEEE C37.106-2003) frekuensi kerja yang diijinkan adalah 0 ± 0.5 Hz. Ketika generator bekerja diluar batas frekuensi tersebut maka terdapat batas waktu operasi yang diijinkan.

2.7 Pengaturan *Under Frequency Relay*

Pada pelepasan beban yang diakibatkan oleh penurunan frekuensi dibutuhkan suatu *under frequency relay* yang dapat mendeteksi ketidaknormalan tersebut sinyal ketidaknormalan tersebut selanjutnya disampaikan ke pemutus tenaga yang terpasang di beban yang ingin dilepaskan. Agar memberikan performa maksimal terhadap sistem, perlu dilakukan beberapa pengaturan terhadap *under frequency relay*. Beberapa parameter yang harus diatur terlebih dahulu antara lain:

- a. Frekuensi kerja rele
- b. Waktu operasi rele
- c. Koordinasi dengan pemutus tenaga

Apabila terjadi pelepasan beban diharapkan tidak terjadi kelebihan beban yang dilepaskan karena hal ini mengakibatkan kerugian bagi pembangkit maupun pengguna oleh sebab itu, diperlukan beberapa tahapan pelepasan beban untuk menghindari hal tersebut. Tahap-tahap tersebut diatur pada *under frequency relay*. tahapan frekuensi tersebut dapat diperkirakan dengan melalui beberapa perhitungan.

Dalam menanggapi sinyal frekuensi rendah, rele membutuhkan waktu tunda untuk memastikan apakah penurunan tersebut disebabkan oleh beban lebih atau

peyebab yang lain setelah dipastikan bahwa penurunan tersebut disebabkan oleh beban lebih, rele juga membutuhkan waktu untuk beroperasi. Pada umumnya, masing-masing rele frekuensi memiliki karakteristik waktu operasi tertentu yang dipengaruhi oleh laju penurunan frekuensi. Sehingga untuk mendapatkan hasil yang optimal, pengaturan waktu tunda dapat disesuaikan dengan karakteristik rele.

Rele frekuensi berfungsi untuk memberikan sinyal kepada pemutus tenaga beban untuk membuka. Ketika pemutus tenaga bekerja maka jaringan beban yang terhubung dengannya lepas dari sistem. Oleh karena pemilihan beban yang akan dilepaskan berdasarkan prioritas nilai ekonomi dan keandalan sistem, beban yang akan dilepaskan terletak menyebar diseluruh sistem. Untuk mengatasi hal tersebut tentu perlu pertimbangan khusus untuk memilih letak pemasangan rele frekuensi.

2.7.1 Perkiraan Tahapan Frekuensi Acuan

Frekuensi kerja optimal suatu generator telah ditetapkan oleh beberapa standar yang telah dibahas sebelumnya. Rentang frekuensi tersebut dibuat untuk menghindari terjadinya gangguan atau ketidaknormalan kerja pada generator akibat *under frequency* atau *over frequency*. Ketika frekuensi beberapa pada rentang tersebut, generator mampu bekerja secara kontinyu (tanpa batas waktu), namun ketika terjadi gangguan sehingga frekuensi generator melampaui atau kurang dari frekuensi seharusnya durasi kerja generator menjadi terbatas untuk menghindari terjadinya kerusakan. Diharapkan selama durasi waktu yang diijinkan tersebut frekuensi kerja generator belum pulih atau bahkan semakin

merupakan dibutuhkan suatu acuan frekuensi minimal untuk mengoperasikan rele frekuensi agar dapat melakukan pelepasan beban sesaat kemudian. Dengan dilakukan pelepasan beban, diharapkan frekuensi kerja generator lebih cepat pulih dan tidak membahayakan sistem.

Tingkat frekuensi acuan pengoperasian *under frequency relay* dapat diperkirakan berdasarkan besar kelebihan yang terjadi. Ketika generator telah memasuki titik frekuensi abnormal akibat beban lebih hendaknya sesegera mungkin dilakukan pelepasan beban. Suatu pelepasan beban yang baik adalah pelepasan sejumlah beban yang tepat, tepat dari segi waktu pemulihan maupun jumlah yang dilepas. Untuk menghindari kelebihan beban yang dilepas maka pelepasan beban dilakukan secara bertahap sesuai dengan kebutuhan frekuensi.

2.7.1.1 Penentuan Frekuensi Acuan Tahap Pertama

Mulai bekerjanya suatu *Under Frequency Relay* adalah ketika frekuensi generator memasuki wilayah tidak normal. Untuk mendapatkan keandalan yang tinggi dari sistem tersebut maka harus dipilih tingkat frekuensi tertinggi untuk rele bekerja. Nilai frekuensi tersebut tidak boleh terlalu jauh dengan batas bawah frekuensi nominal.

Pemilihan tingkat frekuensi pertama kali bekerja mutlak ditentukan oleh pengguna. Tentu saja pemilihan frekuensi tertinggi ini melalui pertimbangan-pertimbangan khusus seperti keamanan sistem yang diberikan, kapasitas generator serta kemampuan sistem untuk bertahan pada frekuensi tersebut.

2.7.1.2 Penentuan Frekuensi Acuan Tahap Kedua dan Seterusnya

Setelah frekuensi tertinggi untuk rele bekerja ditentukan, ketika terjadi beban lebih pada sistem dan frekuensi pun turun akibat ketidakmampuan governor untuk menyediakan torsi mekanik tambahan untuk melayani kebutuhan beban maka ketika frekuensi memasuki daerah frekuensi trip akan terjadi pelepasan beban untuk pemulihan frekuensi. Beban yang dilepaskan ini diasumsikan telah ditentukan sebelumnya. Ada saat dimana jumlah beban yang dilepaskan belum cukup untuk memulihkan frekuensi sehingga frekuensi masih terus menurun. Oleh sebab itu diperlukan beberapa tingkatan frekuensi yang diatur pada rele frekuensi yang besarnya lebih rendah daripada frekuensi acuan pertama untuk melepaskan beban yang lebih besar lagi. Hal ini dilakukan untuk menghindari adanya kekurangan beban yang dilepas pada tahap pertama.

Penentuan frekuensi acuan tahap kedua dan seterusnya bergantung pada besarnya perkiraan laju penurunan frekuensi yang terjadi dan waktu operasi rele pada tahap sebelumnya.

a. Laju penurunan frekuensi berdasarkan kelebihan beban yang terjadi

Langkah pertama untuk menentukan frekuensi acuan adalah menghitung besar laju penurunan frekuensi. Laju penurunan ini bergantung pada besarnya kelebihan beban yang terjadi, frekuensi nominal, rating MVA generator dalam keadaan ideal dan besarnya konstanta inersia.

$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{P_s}{2GH} \right) * f \quad (2.22)$$

Keterangan :

P_s = Selisih permintaan beban dan daya yang disuplai generator

G = Rating MVA generator

H = Konstanta Inersia

f = Frekuensi nominal

b. Waktu Bekerja Rele

Lamanya waktu trip dipengaruhi oleh 3 faktor yaitu :

1. Waktu Pick-up

Merupakan waktu yang dibutuhkan rele untuk mulai bekerja setelah terjadi penurunan frekuensi. Misal : frekuensi nominal 50 Hz, frekuensi rele trip yang pertama adalah 49 Hz. Sehingga waktu pick-up adalah waktu yang dihitung sesaat sebelum frekuensi turun yaitu ketika 50 Hz hingga frekuensi memasuki tahap trip yang pertama.

2. Waktu Rele

Merupakan waktu yang dibutuhkan rele untuk menghantarkan sinyal ke pemutus tenaga dan dihitung sejak terdeteksinya sinyal frekuensi trip hingga sinyal tersebut sampai di pemutus tenaga.

3. Waktu Pemutus Tenaga

Merupakan waktu yang dibutuhkan pemutus tenaga untuk menerima sinyal dari rele hingga pemutus tenaga terbuka dan beban yang dihubungkan ke jaringan oleh pemutus tenaga terlepas.

Perhitungan waktu ini digunakan untuk menentukan perkiraan frekuensi akhir dimana saat pelepasan beban dilakukan setelah frekuensi tertinggi untuk trip terdeteksi.

$$t_{trip} = t_{pick-up} + t_{cb} + t_{relay} \quad (2.23)$$

$$t_{pick-up} = \frac{f_0 - f_1}{\frac{df}{dt}} \quad (2.24)$$

Dengan f_1 adalah frekuensi acuan pelepasan beban.

Setelah laju penurunan frekuensi dan waktu trip tahap sebelumnya didapatkan, nilai frekuensi ketika terjadi pelepasan beban adalah :

$$f_{load\ shedding} = \left[f_0 - \frac{df}{dt} (t_{trip}) \right] \quad (2.25)$$

Kemudian untuk frekuensi trip tahap berikutnya harus bernilai sedikit lebih kecil daripada frekuensi saat pelepasan beban dari frekuensi trip tahap sebelumnya.

2.7.1.3 Pengaturan Frekuensi Minimum

Pengeturan frekuensi yang dilakukan Under Frequency Relay juga harus memperhatikan kestabilan sistem. Oleh sebab itu, frekuensi acuan rele untuk trip paling rendah perlu dipertimbangkan dalam pemilihannya sehingga tidak menyebabkan ketidakstabilan sistem yang pada akhirnya dapat merusak kerja generator.

2.7.2 Koordinasi *Under Frequency Relay* dan Pemutus Tenaga

Dalam proses pelepasan beban akibat penurunan frekuensi dibutuhkan suatu *under frequency relay*. Rele tersebut berfungsi untuk mengirimkan sinyal penurunan frekuensi ke pemutus tenaga yang terletak pada sisi beban. Banyaknya rele yang dibutuhkan serta peletakan untuk melakukan suatu pelepasan beban bergantung kepada tingkat prioritas beban yang ingin dilepaskan apabila terjadi gangguan.

Rele frekuensi ketika bekerja hanya mengirimkan sinyal penurunan frekuensi kepada pemutus tenaga yang menghubungkan beban paling rendah tingkat prioritasnya baik dipandang dari segi ekonomi, keandalan sistem maupun daya yang dibutuhkan.

2.7.3 Pengaturan waktu tunda

Secara umum, penurunan frekuensi pada suatu sistem tenaga listrik dapat disebabkan oleh beberapa hal, antara lain adanya penambahan beban yang signifikan pada sistem, lepasnya suatu pembangkit dengan kapasitas yang besar,

dan gangguan hubung singkat. Oleh sebab itu, *under frequency relay* harus mampu membedakan penyebab penurunan frekuensi agar tidak terjadi kesalahan kerja pada rele. Ketika penurunan frekuensi disebabkan oleh gangguan hubung singkat durasi penurunan ini hanya sesaat dan dengan bantuan pengaturan governor frekuensi akan pulih dengan sendirinya, tentu tidak dibutuhkan suatu pelepasan beban untuk memulihkan frekuensi. Sedangkan ketika penurunan frekuensi disebabkan oleh suatu beban lebih dimana governor telah mengoptimalkan sisa cadangan generator, semakin lama nilai frekuensi generator akan semakin turun karena tidak mampu memulihkan frekuensinya sendiri. Apabila tidak dilakukan pelepasan beban, frekuensi generator akan mencapai titik nol. Oleh sebab itu, diperlukan waktu tunda bagi rele untuk mendefinisikan penyebab turunya frekuensi.

2.8 Prioritas Beban

Dalam suatu sistem tenaga listrik terdapat berbagai macam beban. Beban tersebut dapat berupa motor-motor induksi yang dimanfaatkan di lingkungan industri maupun lampu penerangan di bangunan dan jalan. Beban-beban tersebut memiliki nilai prioritas kebutuhan dan nilai ekonomi bagi penggunanya.

2.8.1 Jenis Beban yang Dilepaskan

Ketika terjadi penurunan frekuensi akibat beban lebih, salah satu hal yang dapat dilakukan untuk mengatasinya adalah pelepasan beban. Pelepasan beban ini diharapkan untuk dapat memperbaiki frekuensi secara cepat tanpa harus banyak merugikan pengguna secara ekonomi. Oleh sebab itu, beban-beban yang

disuplai oleh suatu generator sebaiknya diurutkan menurut parameter-parameter sebagai berikut :

- a. Sensitif terhadap kegiatan perekonomian.
- b. Tingkat kesulitan pengasutan (*starting*).
- c. Daya yang dibutuhkan.

Beberapa pertimbangan yang harus diperhatikan dalam memilih beban yang akan dilepaskan salah satunya apakah beban tersebut sensitif terhadap kegiatan perekonomian. Misalnya pada perusahaan kapas sintetis yang tidak sensitif terhadap kegiatan usaha adalah rumah tinggal atau penginapan dan beban penerangan pada bangunan. Sedangkan beban yang sangat sensitif terhadap kegiatan perekonomian antara lain motor-motor listrik untuk menjalankan mesin produksi.

Parameter lain yang harus diperhitungkan dalam memilih beban yang harus dilepaskan adalah tingkat kesulitan pengasutan. Suatu beban yang dipilih untuk dilepaskan adalah beban yang dapat dengan mudah dihubungkan lagi ke sistem apabila telah bekerja secara normal misalnya, kebutuhan pelepasan beban sangat tinggi sehingga tidak cukup apabila hanya melepaskan beban pemukiman. Maka, dibutuhkan pelepasan beban lain misalnya motor dari motor-motor yang ada tersebut dipilih jenis motor yang mudah *starting* kembali apabila sistem telah bekerja normal.

Parameter ketiga yang juga dipertimbangkan adalah daya yang diserap beban. Untuk memenuhi kebutuhan beban yang akan dilepaskan, terlebih dahulu

diperhitungkan besar beban yang harus dilepaskan setelah didapatkan perkiraan beban tersebut, maka dipilihlah beban yang sesuai dengan kebutuhan. Dari ketiga pertimbangan tersebut maka beban yang dilepas semakin spesifik.

Jika terjadi kondisi dimana beban yang besarnya sesuai dengan kebutuhan memiliki sifat *starting* yang sedikit lebih sulit dibandingkan dengan beban lain yang menyerap daya lebih besar, maka beban tersebut harus dipertimbangkan secara matang, mungkin pada saat pelepasan sistem cepat kembali normal dan tidak terjadi kelebihan suplai namun bila saat beban dihubungkan kembali dengan sistem akan menimbulkan permasalahan lain maka hal tersebut sebaiknya dihindari karena kerugian yang terjadi jauh lebih besar apabila beban yang dilepas lebih besar daripada yang dibutuhkan.

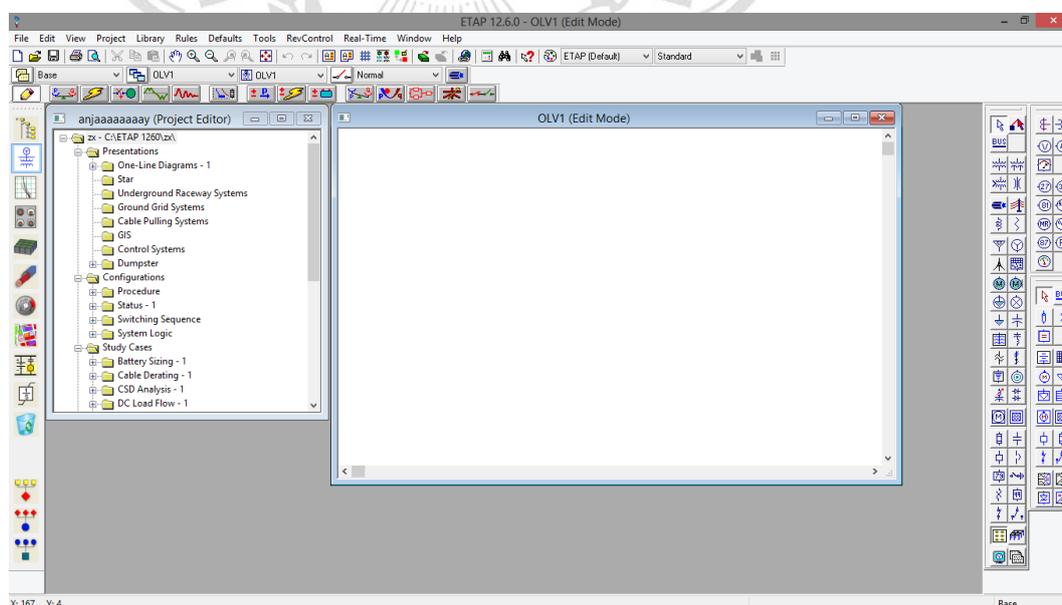
2.9 Etap (*Electrical Transient and Analysis Program*)

Etap merupakan perangkat lunak yang dapat digunakan untuk mensimulasikan suatu keadaan dalam sebuah sistem tenaga listrik. Perangkat ini dapat digunakan untuk merancang suatu sistem tenaga listrik seperti diagram tunggal baik sistem AC maupun DC dengan menggunakan 2 macam standar yaitu ANSI dan IEC. Perangkat ini mampu dijalankan secara offline untuk menjalankan simulasi sistem tenaga listrik, selain itu perangkat ini mampu digunakan secara online untuk mendapatkan data real time.

Beberapa fitur ETAP yang dapat digunakan dalam menjalankan simulasi antara lain :

- a. Analisa aliran daya (*load flow analysis*)
- b. Starting motor
- c. Optimal *Capacitor placement*
- d. Short Circuit analysis
- e. Koordinasi Proteksi
- f. Analisa kestabilan transien (*Transient Stability Analysis*)

Pada skripsi ini fitur yang digunakan untuk simulasi adalah fitur *transient stability analysis*, dengan simulasi ini dapat dilihat perubahan frekuensi generator mulai lepas hingga terjadinya pelepasan beban.



Gambar 2.4 User interface perangkat ETAP 12.6

2.9.1 Analisa Kestabilan Kondisi Transien

Analisis stabilitas transient pada ETAP digunakan untuk menginvestigasi batas stabilitas sistem tenaga pada saat sebelum, sesudah, maupun pada saat terjadi perubahan atau gangguan pada sistem. Pada simulasi stabilitas transien ini sistem dimodelkan secara dinamik, event dan action yang terjadi di-set oleh user, dan penyelesaian persamaan jaringan dan persamaan diferensial mesin diselesaikan secara interaktif dalam melihat respon sistem maupun mesin dalam kawasan waktu. Dari respon tersebut, kita dapat menentukan watak transien sistem, melakukan studi stabilitas, menentukan setting peralatan proteksi, dan mengaplikasikan suatu perubahan pada sistem untuk meningkatkan stabilitas. Performa dinamis sistem tenaga sangat penting dalam desain dan operasi. Studi transien dan stabilitas digunakan untuk menentukan sudut daya mesin / pergeseran kecepatan, frekuensi sistem, aliran daya aktif dan reaktif, dan level tegangan bus. Penyebab ketidakstabilan sistem antara lain :

- a. Hubung singkat.
- b. Lepasnya *tie-connection utility system*.
- c. Starting motor.
- d. Lepasnya salah satu generator.
- e. *Switching operation*.
- f. Perubahan mendadak pada pembangkitan atau beban.

Oleh karena stabilitas sistem tenaga merupakan fenomena elektromekanis, maka mesin sinkron memegang peranan penting. Pada saat terjadi gangguan dan

setelah terjadi gangguan, sudut rotor akan berosilasi dan menyebabkan osilasi aliran daya sistem. Osilasi ini dapat menjadikan ketidakstabilan pada sistem. Oleh sebab itu kestabilan sistem tenaga kadangkala dilihat dari stabilitas sudut rotor mesin sinkron.

Dalam skripsi ini pelepasan beban yang mengacu kepada penurunan frekuensi akibat beban lebih karena terjadinya lepasnya salah satu generator. Untuk dapat melepas beban digunakan rele frekuensi (*underfrequency relay*) yang akan mengirimkan sinyal kepada pemutus tenaga agar trip pada frekuensi tertentu. Untuk dapat menggunakan fitur ini dibutuhkan beberapa data :

- a. Generator
 1. Impedansi generator
 2. Konstanta inersia generator
 3. Model governoor turbin yang digunakan generator
 4. Model exiter generator
- b. Data kombinasi generator yang dilepaskan
- c. Jumlah iterasi yang sesuai
- d. Data jumlah beban yang harus dilepaskan sesuai dengan besarnya penurunan frekuensi.
- e. Data diagram satu jalur sistem pembangkit tenaga listrik