

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Rujukan penelitian yang pernah dilakukan untuk mendukung penulisan tugas akhir ini antara lain:

- a. Berdasarkan hasil penelitian Denny Yusuf Sepriawan (2014) tentang Analisis Stabilitas Transien dan Perancangan Pelepasan Beban pada *Joint Operating Body Pertamina-Petrochina East Java* (JOB P-PEJ) Tuban, dapat disimpulkan bahwa pada operasi sistem tenaga listrik, kestabilan sistem adalah hal yang sangat penting untuk melayani beban secara kontinyu dengan tegangan, frekuensi yang memenuhi standar. Jika terjadi gangguan pada sistem yang menyebabkan besarnya suplai daya yang dihasilkan oleh pembangkit tidak mencukupi kebutuhan beban misalnya karena adanya pembangkit yang lepas (*trip*), maka untuk mencegah terjadinya ketidakstabilan sistem perlu dilakukan pelepasan beban (*load shedding*). Keadaan yang kritis pada sistem dapat dideteksi melalui frekuensi sistem yang menurun dengan cepat. Standar yang digunakan untuk pengendalian frekuensi diatur oleh pemerintah melalui peraturan menteri energi dan sumber daya mineral nomor: 03 tahun 2007. Yang diatur dalam aturan operasi OC.3 tentang pengendalian frekuensi. Disebutkan bahwa, frekuensi sistem dipertahankan kisaran +/- 0,2 Hz atau 99,6% di sekitar 50 Hz, kecuali dalam periode singkat, dimana penyimpangan sebesar +/- 0,5 Hz atau 99% diizinkan selama kondisi darurat.

- b. Menurut Ovi Eka Putri (2016) dalam penelitian tentang Evaluasi Mekanisme Pelepasan Beban Pada Sistem Tenaga Listrik PT Pertamina RU IV Cilacap. Berdasarkan penelitian tersebut disimpulkan bahwa, apabila terdapat generator lepas dari sistem dalam keadaan pembangkitan normal maupun pembangkitan minimum, maka suplai energi dari generator dan permintaan beban menjadi tidak seimbang dan frekuensi sistem akan turun. Bahkan, ketika tiap-tiap governor dari generator tidak mampu memulihkan frekuensi ke frekuensi normal, pemadaman total akan terjadi. Untuk mengatasi kondisi tersebut, pelepasan beban dapat melindungi sistem secara efektif dari penurunan frekuensi.
- c. Menurut Chairy Wahyu Winanti (2011) dalam penelitian tentang Analisis Statis dan Dinamis Stabilitas Tegangan Sistem Tenaga Listrik CNOOC SES Ltd. Berdasarkan penelitian tersebut disimpulkan bahwa gangguan pada sistem tenaga listrik dapat memicu ketidakstabilan tegangan sistem. Ketidakstabilan tegangan sistem dapat menyebabkan runtuh tegangan yang kemudian berakhir dengan *black out* sebagian atau seluruh sistem. Sehingga penting untuk menjaga stabilitas tegangan sistem. Analisis statis dan dinamis stabilitas tegangan sistem tenaga listrik CNOOC SES Ltd. menggunakan skema pelepasan beban *undervoltage*.
- d. Menurut Aryo Nugroho (2011) dalam penelitian tentang Analisa *Transient Stability* dan pelepasan beban pengembangan sistem integrasi 33 kV di PT Pertamina RU IV Cilacap, disimpulkan bahwa PT. Pertamina RU IV Cilacap merupakan salah satu unit pengolahan kilang minyak yang ada di PT

Pertamina. PT Pertamina RU IV Cilacap mengoperasikan pembangkit listrik dengan kapasitas 4 x 8 MW dan 4 x 20 MW. Akibat dari penambahan beban pada PT Pertamina RU IV Cilacap mengakibatkan adanya penambahan pembangkit baru dengan kapasitas 3 x 15 MW pada sistem kelistrikan di lingkungan PT Pertamina RU IV Cilacap, maka dari itu diperlukan pemodelan sistem yang dapat digunakan untuk menganalisa kinerja secara keseluruhan akibat adanya perubahan konfigurasi maupun pengembangan jaringan.

- e. Menurut Gede Arjana Permana Putra (2012) dalam penelitiannya tentang Analisis Stabilitas *Transient* pada Sistem Tenaga Listrik Dengan Mempertimbangkan Beban Non-Linier, disimpulkan bahwa kestabilan menjadi hal yang utama dalam operasi sistem tenaga listrik. Banyak hal yang dapat mempengaruhi kestabilan sistem tenaga listrik, salah satunya adalah beban *nonlinear* yang mempengaruhi kestabilan transien. Dimana disini beban *nonlinear* memberikan dampak fluktuasi terhadap tegangan dan arus pada sistem tenaga listrik. Sehingga terjadi ketimpangan antara daya *input* mekanis (*prime mover*) dengan daya *output* elektris (beban), yang secara tidak langsung mempengaruhi putaran rotor generator, sehingga menyebabkan percepatan (*acceleration*) dan perlambatan (*deceleration*).

Berdasarkan penelusuran terhadap judul penelitian tugas akhir (skripsi) yang ada pada program studi teknik elektro tentang stabilitas sistem tenaga listrik dalam hal ini yang menjadi objek penelitian adalah sistem tenaga listrik PT

Pertamina RU IV Cilacap, ditemukan sedikitnya dua (2) judul penelitian tugas akhir (skripsi) yaitu:

1. Penelitian tugas akhir (Skripsi) atas nama Ovi Eka Putri (2016) dengan judul Evaluasi Mekanisme Pelepasan Beban Pada Sistem Tenaga Listrik PT Pertamina RU IV Cilacap.
2. Penelitian tugas akhir (Skripsi) atas nama Aryo Nugroho (2011) dengan judul tentang Analisa *Transient Stability* dan Pelepasan Beban Pengembangan Sistem Integrasi 33 kV di PT Pertamina RU IV Cilacap.

Penelitian tugas akhir (Skripsi) ini berbeda dengan penelitian tugas akhir (Skripsi) tersebut diatas. Penelitian tugas akhir (Skripsi) yang pertama fokus pada evaluasi mekanisme pelepasan beban berdasarkan penurunan frekuensi dan perbandingan skenario pembangkitan minimum dengan pembangkitan normal serta analisis penerapan standar IEEE C37-106 2003 pada mekanisme pelepasan beban sistem tenaga listrik PT Pertamina RU IV Cilacap, tetapi tidak membahas tentang analisis stabilitas transien dan *load shedding* pada sistem tenaga listrik PT Pertamina RU IV Cilacap dengan berbagai macam variasi pembangkit lepas dari sistem tenaga listrik. Sementara penelitian tugas akhir (Skripsi) yang kedua mengarah pada analisis stabilitas transien dan pelepasan beban pengembangan sistem integrasi 33 kV di PT Pertamina RU IV Cilacap dengan penambahan sistem integrasi 3 pembangkit yang berkapasitas masing-masing pembangkit 15 MW.

Oleh karena itu, keaslian penelitian tugas akhir ini dapat dipertanggungjawabkan dan sesuai dengan asas-asas keilmuan yang harus dijunjung tinggi yaitu kejujuran, rasional, objektif serta terbuka. Hal ini merupakan

implikasi etis dari proses menemukan kebenaran ilmiah sehingga dengan demikian penelitian ini dapat dipertanggungjawabkan kebenarannya secara ilmiah, keilmuan, dan terbuka untuk kritisi yang sifatnya konstruktif (membangun).

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus memenuhi beberapa syarat, seperti *reliability*, *quality*, dan *stability* (Rosalina, 2010).

Reliability adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus (Rosalina, 2010).

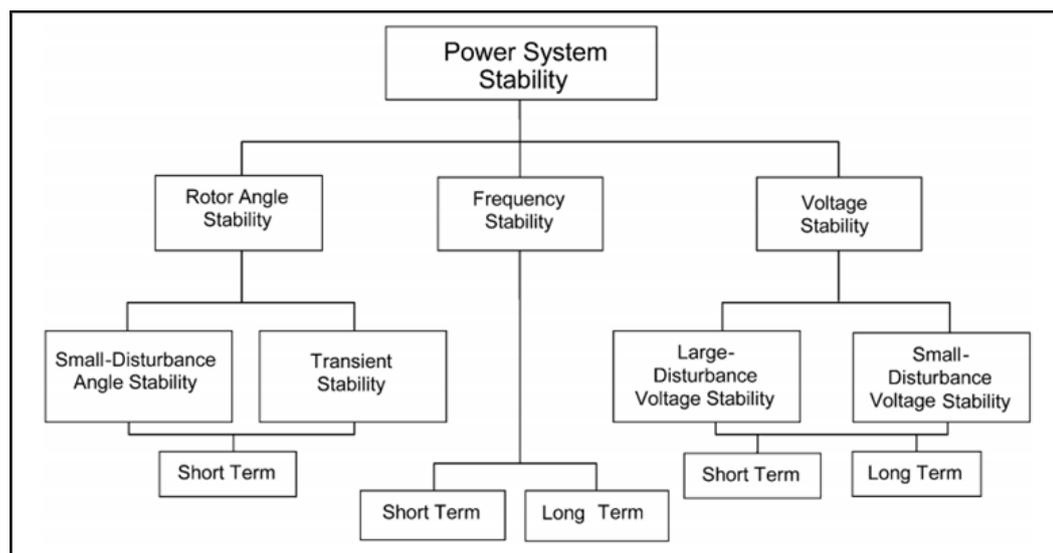
Quality adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi (Rosalina, 2010).

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk memberikan reaksinya terhadap gangguan dalam keadaan kerja normal serta kembali normal dalam keadaan semula. Stabilitas sistem tenaga listrik digolongkan menjadi tiga jenis yaitu kestabilan transien, kestabilan dinamis, dan kestabilan keadaan tetap (Stevenson, 1983).

Sistem tenaga listrik merupakan sekumpulan pusat listrik dan gardu induk atau pusat beban yang satu sama lain dihubungkan oleh jaringan transmisi sehingga merupakan sebuah kesatuan interkoneksi. Komponen tersebut mempunyai fungsi yang saling berkaitan untuk menghasilkan energi listrik yang disalurkan ke konsumen dengan kualitas yang baik. Beberapa gangguan yang terjadi pada sistem

tidak akan berpengaruh pada sistem yang lain apabila didukung dengan proteksi yang memenuhi syarat (Marsudi, 2016).

Respon sistem tenaga listrik terhadap gangguan dapat mempengaruhi kondisi peralatan. Sebuah gangguan pada elemen yang kritis dapat menyebabkan variasi pada aliran daya, tegangan bus jaringan, dan kecepatan rotor mesin. Variasi tegangan akan mengaktifkan *exciter* pada generator, variasi beban akan mengaktifkan governor untuk menyesuaikan kecepatan generator, serta variasi tegangan dan frekuensi akan mempengaruhi beban sistem menjadi bervariasi bergantung pada karakteristik masing-masing. Divais yang digunakan untuk melindungi peralatan tertentu dapat memberikan respon pada variasi variabel sistem dan mempengaruhi unjuk kerja sistem tenaga listrik. Sehingga, ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik mungkin terjadi dalam bentuk yang berbeda bergantung pada topologi sistem, mode operasi, dan bentuk gangguan (Winanti, 2011).



Gambar 2.1 Klasifikasi stabilitas sistem tenaga listrik

Gambar 2.1 menunjukkan sebuah kemungkinan klasifikasi stabilitas sistem tenaga listrik ke dalam tiga bagian, yaitu stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi, dan stabilitas tegangan (Winanti, 2011).

Stabilitas sudut rotor dihubungkan dengan kemampuan mesin sinkron yang terinterkoneksi dalam sebuah sistem tenaga listrik untuk berada dalam keadaan sinkron di bawah kondisi operasi setelah mengalami gangguan. Hal ini bergantung pada kemampuan untuk mempertahankan atau mengembalikan kesetimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik masing-masing mesin sinkron pada sistem. Ketidakstabilan dapat menyebabkan terjadinya kenaikan sudut ayunan beberapa generator menuju kehilangan sinkronisasinya dengan generator lain. Kehilangan sinkronisasi dapat terjadi antara satu mesin dengan sistem, atau antara beberapa kelompok mesin, antara sinkronisasi yang dipertahankan dengan masing-masing kelompok setelah pemisahan satu sama lain. Kestabilan sudut rotor dibagi menjadi dua kategori, yaitu stabilitas gangguan kecil (keadaan tunak) dan stabilitas pada keadaan transien (Winanti, 2011).

Stabilitas tegangan berhubungan dengan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan tunak pada seluruh bus dalam sistem yang berada di bawah kondisi operasi normal setelah mengalami gangguan. Ketidakstabilan mungkin terjadi dalam bentuk kenaikan atau penurunan tegangan pada beberapa bus secara progresif. Akibat dari ketidakstabilan tegangan adalah lepasnya beban pada area dimana tegangan mencapai nilai rendah yang baik dapat diterima atau kehilangan integritas sistem tenaga listrik (Winanti, 2011).

Faktor utama penyebab ketidakstabilan tegangan biasanya adalah jatuh tegangan yang terjadi ketika daya aktif dan reaktif mengalir melalui reaktansi induktif yang ada pada jaringan transmisi. Hal ini membatasi kemampuan jaringan transmisi untuk mengirim daya. Transfer daya akan semakin terbatas ketika beberapa generator mencapai batas kemampuan daya reaktifnya. Pemicu utama ketidakstabilan tegangan adalah beban. Dalam merespon sebuah gangguan, daya yang dikonsumsi beban dipulihkan oleh aksi dari regulator tegangan distribusi dan transformator *on load tap changing*. Pemulihan beban meningkatkan tekanan pada jaringan tegangan tinggi menyebabkan lebih banyak pengurangan tegangan. Situasi tersebut menyebabkan terjadi ketidakstabilan tegangan ketika beban dinamis berusaha memulihkan konsumsi daya di luar kemampuan sistem transmisi dan pembangkit yang terhubung (Winanti, 2011).

Stabilitas tegangan berkaitan dengan daerah beban dan karakteristik beban. Stabilitas sudut rotor berhubungan dengan pembangkit listrik kecil yang terintegrasi dengan sebuah sistem besar melalui saluran transmisi yang panjang. Stabilitas tegangan merupakan stabilitas beban, sedangkan stabilitas sudut rotor merupakan stabilitas generator. Sehingga apabila terjadi runtuh tegangan (*voltage collapse*) pada sebuah sistem transmisi yang jauh dari beban, hal itu merupakan ketidakstabilan sudut rotor. Jika runtuh tegangan terjadi pada daerah beban, hal tersebut sebagian besar disebabkan oleh masalah ketidakstabilan tegangan (Winanti, 2011).

Stabilitas frekuensi terkait dengan kemampuan sebuah sistem tenaga listrik untuk mempertahankan frekuensi tunak dengan kisaran nominal mengikuti

beberapa gangguan sistem yang menghasilkan ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkitan dan beban. Hal ini bergantung pada kemampuan untuk mengembalikan keseimbangan antara sistem beban dan pembangkitan dengan meminimalisasi pelepasan beban (Winanti, 2011).

Biasanya beberapa gangguan sistem menghasilkan pergeseran frekuensi, aliran daya, tegangan, dan variabel lainnya secara signifikan. Dengan demikian aksi dari proses, kendali, dan proteksi tidak dimodelkan dalam stabilitas transien konvensional atau studi stabilitas tegangan. Proses ini bisa sangat lambat atau hanya terpicu untuk kondisi sistem ekstrim, misalnya pemutusan proteksi volt/hertz generator. Dalam sistem tenaga listrik terinterkoneksi yang cukup besar, situasi jenis ini adalah yang paling umum berhubungan dengan sistem pulau (*islanding*). Umumnya, masalah stabilitas frekuensi berhubungan dengan tidak memadainya respon peralatan, koordinasi yang buruk pada peralatan proteksi dan kendali, atau ketersediaan pembangkitan yang kurang (Winanti, 2011).

Menurut Stevenson (1983) analisis kestabilan biasanya digolongkan kedalam tiga jenis, tergantung pada sifat dan besarnya gangguan yaitu:

- a. Kestabilan keadaan tetap (*Steady State Stability*)
- b. Kestabilan dinamis (*Dynamic Stability*)
- c. Kestabilan peralihan (*Transient Stability*)

2.2.1.1 Kestabilan Keadaan Tetap (*Steady State Stability*)

Kestabilan keadaan tetap adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menerima gangguan kecil yang bersifat gradual, yang terjadi disekitar titik keseimbangan pada kondisi tetap (Rosalina, 2010).

Kestabilan ini tergantung pada karakteristik komponen yang terdapat pada sistem tenaga listrik antara lain: pembangkit, beban, jaringan transmisi, dan kontrol sistem. Model pembangkit yang digunakan adalah pembangkit yang sederhana (sumber tegangan konstan) karena hanya menyangkut gangguan kecil disekitar titik keseimbangan (Rosalina, 2010).

2.2.1.2 Kestabilan Dinamis (*Dynamic Stability*)

Kestabilan dinamis adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali ke titik keseimbangan setelah timbul gangguan yang relatif kecil secara tiba-tiba dalam waktu yang lama. Analisis kestabilan dinamis lebih kompleks karena juga memasukkan komponen kontrol otomatis dalam perhitungannya (Rosalina, 2010).

2.2.1.3 Kestabilan Peralihan (*Transient Stability*)

Kestabilan peralihan adalah kemampuan sistem untuk mencapai titik keseimbangan/sinkronisasi setelah mengalami gangguan yang besar sehingga sistem kehilangan stabilitas karena gangguan terjadi diatas kemampuan sistem (Rosalina, 2010).

Analisis kestabilan peralihan merupakan analisis yang utama untuk menelaah perilaku sistem daya misalnya gangguan yang berupa:

- a. Perubahan beban yang mendadak karena terputusnya unit pembangkit.
- b. Perubahan pada jaringan transmisi misalnya gangguan hubung singkat atau pemutusan saklar (*switching*).

Sistem daya listrik masa kini jauh lebih luas, ditambah interkoneksi antar sistem yang rumit dan melibatkan beratus-ratus mesin yang secara dinamis saling mempengaruhi melalui perantara jala-jala tegangan ekstra tinggi, mesin-mesin ini mempunyai sistem penguatan yang berhubungan. Kisaran masalah yang dianalisis banyak menyangkut gangguan yang besar dan tidak lagi memungkinkan menggunakan proses kelinieran. Masalah kestabilan peralihan dapat lebih lanjut dibagi kedalam kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dan ayunan majemuk (*multi swing*). Kestabilan ayunan pertama didasarkan pada model generator yang cukup sederhana tanpa memasukkan sistem pengaturannya, biasanya periode waktu yang diselidiki adalah detik pertama setelah timbulnya gangguan pada sistem. Bila pada sistem, mesin dijumpai tetap berada dalam keadaan serempak sebelum berakhirnya detik pertama, ini dikategorikan sistem masih stabil (Rosalina, 2010).

2.2.2 Transien

Transien atau peralihan merupakan suatu keluaran dari keadaan perubahan mendadak pada sistem tenaga listrik pada saat terjadi *switching* saluran atau timbulnya gangguan pada sistem tersebut. Waktu transien umumnya sangat singkat dibandingkan dengan waktu keadaan tunak. Masa transien menjadi sangat penting dalam sistem karena pada masa tersebut suatu perubahan mendadak akan termanifestasikan baik dalam bentuk arus maupun tegangan yang kadangkala dalam

hal ekstrim akan mengakibatkan kerusakan fatal pada sistem tenaga listrik (Winarsih, 2002)

2.2.3 Stabilitas Frekuensi

Stabilitas frekuensi terkait dengan kemampuan sebuah sistem tenaga listrik untuk mempertahankan frekuensi tunak dengan kisaran nominal mengikuti beberapa gangguan sistem yang menghasilkan ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkitan dan beban. Hal ini bergantung pada kemampuan untuk mengembalikan keseimbangan antara sistem beban dan pembangkitan dengan meminimalisasi pelepasan beban (Winanti, 2011).

2.2.3.1 Hubungan Antara Frekuensi dan Daya Aktif

Sistem tenaga listrik harus mampu menyediakan tenaga listrik bagi para pelanggan dengan frekuensi yang praktis konstan. Penyimpangan frekuensi dari nilai nominal harus selalu dalam batas toleransi yang diperbolehkan. Daya aktif mempunyai hubungan erat dengan nilai frekuensi dalam sistem, sedangkan beban sistem yang berupa daya aktif maupun reaktif selalu berubah sepanjang waktu. Untuk mempertahankan frekuensi dalam batas toleransi yang diperbolehkan, penyediaan/pembangkitan daya aktif dalam sistem harus disesuaikan dengan kebutuhan pelanggan atas daya aktif, harus selalu disesuaikan dengan beban daya aktif. Penyesuaian daya aktif ini dilakukan dengan mengatur besarnya kopel penggerak generator (Marsudi, 2016).

Menurut Nugraheni (2011) daya dalam gerak lurus dapat didefinisikan sebagai gaya yang dialami suatu benda yang bergerak pada jarak tertentu per satuan 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.

$$P = \tau \frac{d\theta}{dt} \quad (2.1)$$

Dengan P = daya yang dibangkitkan generator (Watt)

τ = momen gaya / kopel mekanik generator (Nm)

θ = sudut rotasi (rad)

t = waktu (s)

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

$$P = \tau \omega = \tau \cdot 2\pi f \quad (2.2)$$

$$P \approx \tau \quad (2.3)$$

Dari persamaan di atas 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 karena generator memiliki rentang frekuensi kerja tertentu. Ketika generator bekerja di luar rentang frekuensi kerja, maka generator

tersebut akan cepat mengalami kerusakan. Oleh sebab itu, untuk mempertahankan besarnya frekuensi sistem diperlukan pengaturan pada besarnya kopel mekanis penggerak generator (Nugraheni, 2011).

Menurut Nugraheni (2011) 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 dari governor untuk mengatur banyaknya bahan bakar yang digunakan. Hal ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$T_G - T_B = J \frac{d\omega}{dt} = J2\pi \frac{df}{dt} \quad (2.4)$$

Dengan T_G = kopel penggerak mekanik generator (Nm)

T_B = torsi beban (Nm)

J = momen inersia penggerak mekanik generator (kg.m²)

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.

2.2.3.2 Pelepasan Beban

Jika terdapat gangguan dalam sistem tenaga listrik yang menyebabkan daya yang tersedia tidak cukup untuk memenuhi beban, misalnya karena ada gangguan berupa lepasnya beberapa pembangkit dari sistem, maka untuk menghindari sistem menjadi *collapsed* perlu dilakukan pelepasan beban. Keadaan yang kritis dalam sistem karena lepasnya beberapa unit pembangkit dapat dideteksi melalui frekuensi sistem yang menurun dengan cepat (Marsudi, 2016).

Menurut Nugraheni (2011) 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 disuplai oleh salah satu pembangkit dalam sistem interkoneksi.

2.2.3.2.1 Akibat Beban Lebih

Menurut Nugraheni (2011) 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 sistem

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 (Nugraheni, 2011).

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 (Nugraheni, 2011).

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. Namun, apabila laju penurunan frekuensi tidak terlalu tajam, dapat segera dilakukan pelepasan beban (Nugraheni, 2011).

2.2.3.2.2 Akibat Penurunan Frekuensi

Menurut Nugraheni (2011) pelepasan beban akibat penurunan frekuensi diklasifikasikan menjadi 2 macam berdasarkan laju penurunan, 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 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 distabilkan dengan cepat tanpa harus menunggu operator bekerja. Pelepasan beban otomatis biasanya didukung dengan beberapa komponen, seperti misalnya penggunaan UFR (*Under Frequency Relay*).

Menurut Nugraheni (2011) 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 tegangan normal, arus eksitasi generator semakin meningkat hal ini memicu terjadinya eksitasi lebih. Eksitasi ini ditandai dengan fluks berlebih yang dapat menyebabkan munculnya arus pusar. Arus pusar tersebut dapat menyebabkan pemanasan pada inti generator.

2.2.3.2.3 Syarat Pelepasan Beban

Sebelum dilakukan suatu pelepasan beban yang bertujuan untuk pemulihan frekuensi, pelepasan beban harus memenuhi 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 sistem 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 (*load Shedding*) harus dilakukan tepat guna. Oleh karenanya harus ditentukan waktu tunda minimum relay 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 (*load shedding*) aman untuk dilakukan (Nugraheni, 2011).

2.2.3.3 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, pada saat 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 diperlukan suatu pengurangan torsi beban dengan beberapa cara diantaranya adalah pelepasan beban (Nugraheni, 2011).

2.2.3.3.1 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 (Nugraheni, 2011).

Besarnya laju penurunan frekuensi sangat berpengaruh terhadap beberapa hal, antara lain (Nugraheni, 2011):

a. Jenis pelepasan beban yang dilakukan

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

b. Waktu tunda *relay*

Laju penurunan frekuensi mempengaruhi pengaturan waktu tunda *relay*. Untuk laju penurunan frekuensi yang tinggi tentu diatur agar waktu tunda yang dimiliki *relay* sesingkat mungkin. Semakin lama waktu tunda *relay*, 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.

Menurut Nugraheni (2011) Demikian berpengaruhnya besar laju penurunan frekuensi terhadap pelepasan beban, maka perlu diketahui faktor-faktor yang mempengaruhi besar laju penurunan frekuensi. Faktor-faktor tersebut antara lain sebagai berikut:

- 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 saat sebelum pemutus tenaga terbuka. Jumlah beban yang harus dilepas untuk pemulihan frekuensi dapat ditentukan (Nugraheni, 2011).

Hubungan yang mendefinisikan perubahan frekuensi terhadap waktu, dalam hal ini disebut dengan laju perubahan frekuensi berdasarkan perubahan besarnya daya yang dihasilkan generator dan daya yang dibutuhkan beban dapat digambarkan oleh persamaan swing suatu generator sederhana sebagai berikut:

$$\frac{GH}{\pi f_0} \times \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_A \quad (2.5)$$

Dengan: G = Rating MVA generator

H = Konstanta inersia generator (MJ/MVA)

δ = Sudut torsi generator

f_0 = Frekuensi nominal generator (Hz)

P_A = Daya percepatan (MW)

Kecepatan putaran generator dapat dinyatakan sebagai:

$$\omega = \omega_0 + \frac{d\delta}{dt} = 2\pi f \quad (2.6)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2} = 2\pi \frac{df}{dt} \quad (2.7)$$

Dengan ω_0 = Kecepatan generator saat frekuensi nominal (rpm)

Dari persamaan (2.5) dan (2.7) dapat disimpulkan bahwa:

$$\frac{df}{dt} = \frac{P_A f_0}{2GH} \quad (2.8)$$

Dengan: $P_A = P_M - P_E$

P_A = Daya percepatan

P_M = Daya mekanik generator

P_E = Daya elektrik permintaan beban

Sesuai dengan persamaan (2.8) terbukti bahwa besarnya laju penurunan frekuensi dipengaruhi oleh tiga faktor yang telah disebutkan sebelumnya.

2.2.3.3.2 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 (Nugraheni, 2011).

$$I = \int r^2 dm \quad (2.9)$$

Dengan: 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. Sebagai benda bergerak berotasi, energi kinetik generator dapat dinyatakan sebagai berikut (Nugraheni, 2011):

$$Ek_{rot} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2.10)$$

Dengan: Ek_{rot} = Energi kinetik rotasi

I = Momen inersia

ω = Kecepatan sudut putar

Sedangkan energi yang dihasilkan pada kecepatan sinkron per volt-ampere dari rating generator disebut dengan konstanta inersia. Selanjutnya energi kinetik generator dapat dinyatakan sebagai:

$$GH = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2.11)$$

Dengan: G = Rating MVA generator

H = Konstanta inersia

I = Momen inersia

ω = Kecepatan sudut putar

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

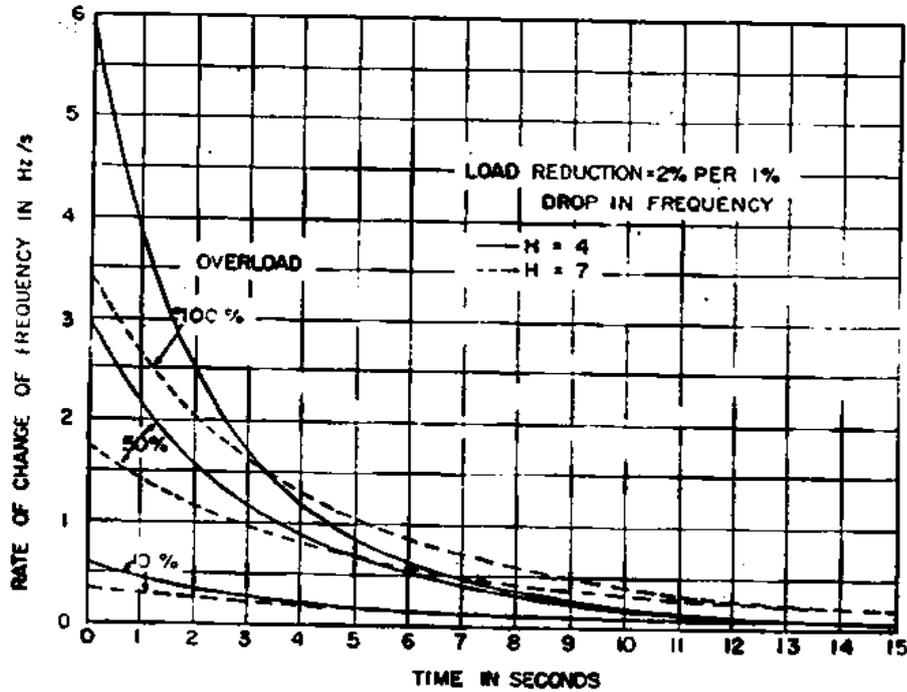
tidak langsung merupakan gangguan bagi generator. Tanggapan dari gangguan tersebut adalah terjadinya penurunan frekuensi. Besarnya tanggapan ini bergantung pada kemampuan generator untuk mempertahankan diri dari gangguan. Semakin besar momen inersia suatu generator maka semakin besar pula nilai konstanta inersia 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 (Nugraheni, 2011).

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 (Nugraheni, 2011).

Sesuai dengan persamaan (2.8) ketika nilai konstanta inersia suatu generaor semakin tinggi maka laju penurunan frekuensi semakin rendah. Nilai konstanta inersia yang digunakan dalam persamaan tersebut mampu menggambarkan nilai konstanta inersia sebuah generator maupun kumpulan beberapa generator. Nilai konstanta inersia dari kumpulan beberapa generator merupakan nilai rata-rata dari konstanta inersia keseluruhan generator, atau dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$H = \frac{H_1 MVA_1 + H_2 MVA_2 + \dots + H_n MVA_n}{MVA_1 + MVA_2 + \dots + MVA_n} \quad (2.12)$$

Dengan notasi 1, 2, ..., n merupakan notasi urutan generator.



Gambar 2.2 Grafik penurunan frekuensi dengan parameter konstanta inersia dan persen *overload*

Gambar 2.3 menggambarkan pengaruh nilai konstanta inersia terhadap besarnya perubahan frekuensi terhadap waktu. Untuk besar nilai kelebihan beban yang sama laju penurunan frekuensi pada generator yang memiliki konstanta inersia lebih besar akan menjadi lebih rendah daripada generator yang memiliki konstanta inersia yang lebih rendah. Pada gambar terlihat bahwa pada prosentase kelebihan beban 100%, generator yang memiliki konstanta inersia (H) 7 MJ/MVA mengalami laju penurunan frekuensi sekitar 3,5 Hz/s, sedangkan untuk generator yang memiliki konstanta inersia (H) 4 MJ/MVA laju penurunan frekuensi yang dialaminya hingga 6 Hz/s (Nugraheni, 2011).

2.2.3.3.3 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 semakin menurun. Dari persamaan (2.2) dapat disimpulkan bahwa (Nugraheni, 2011):

$$P \approx \tau$$

Dimana P adalah daya dan τ adalah torsi.

Dalam kasus kelebihan beban dikenal istilah daya percepatan (P_A), daya mekanik generator (P_M) dan daya elektrik beban (P_E). Hubungan ketiganya digambarkan sebagai berikut:

$$P_A = P_M - P_E \quad (2.13)$$

Dengan mengingat hubungan antara daya dan torsi dari persamaan (2.2) maka dapat disimpulkan bahwa:

$$T_A = T_M - T_E \quad (2.14)$$

T_A merupakan torsi percepatan, T_M merupakan torsi mekanik yang dimiliki oleh generator dan T_E adalah torsi elektrik beban. Torsi merupakan gaya yang dialami oleh benda berotasi, maka persamaan (2.14) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_M - T_E \quad (2.15)$$

$$J2\pi \frac{df}{dt} = T_M - T_E \quad (2.16)$$

Maka, ketika $P_M > P_E$, $T_M > T_E$ nilai perubahan frekuensi terhadap waktu akan bernilai positif dan kelebihan daya ada pada sisi pembangkit. Sebaliknya, jika $P_M < P_E$, $T_M < T_E$ nilai perubahan frekuensi terhadap waktu akan bernilai negatif dan kelebihan daya berada pada sisi beban, hal inilah yang menyebabkan turunnya frekuensi generator.

Besar kelebihan beban biasanya dinyatakan dalam prosentase (H. E. Lokay, 1968):

$$\text{Prosentase Kelebihan Beban} = \frac{\text{Beban-Suplai Generator}}{\text{Suplai Generator}} \times 100\% \quad (2.17)$$

$$\text{Prosentase Kelebihan Beban} = \frac{\text{Kekurangan Pembangkitan}}{\text{Pembangkitan Tersisa}} \times 100\% \quad (2.18)$$

Dari gambar 2.3 dapat dilihat pengaruh besar prosentase kelebihan beban suatu sistem terhadap besar laju penurunan frekuensi. Pada grafik tersebut laju penurunan frekuensi generator dengan konstanta inersia 4 MJ/MVA misal prosentase beban lebih mencapai 10% maka besar laju penurunan frekuensi sekitar 1 Hz/s. Namun, ketika prosentase beban lebih mencapai 100%, laju penurunan frekuensi mencapai 6 Hz/s. Terlihat bahwa semakin kecil tingkat kelebihan beban semakin kecil laju penurunan frekuensi (Nugraheni, 2011).

2.2.3.4 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 nilai ekonomi bagi penggunaannya (Nugraheni, 2011).

2.2.3.4.1 Jenis Beban yang Dilepaskan

Menurut Nugraheni (2011) Ketika terjadi penurunan frekuensi akibat beban lebih, salah satu hal yang dapat dilakukan untuk mengatasinya adalah pelepasan beban (*load shedding*). 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 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 adalah apakah beban tersebut sensitif terhadap kegiatan perekonomian. Jenis beban yang dilepaskan adalah beban yang memiliki pengaruh paling rendah bagi perekonomian. Misalnya pada sistem tenaga listrik di suatu perusahaan minyak bumi dan gas, beban yang tidak sensitif terhadap kegiatan usaha adalah rumah tinggal atau penginapan. Sedangkan beban yang sangat sensitif terhadap kegiatan usaha antara lain motor-motor untuk eksplorasi (Nugraheni, 2011).

Parameter lain yang harus dipertimbangkan dalam memilih beban yang harus dilepaskan adalah tingkat kesulitan pengasutan. Suatu beban yang dipilih

untuk dilepas adalah beban yang dapat dengan mudah dihubungkan lagi ke sistem apabila sistem 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 untuk starting kembali apabila sistem telah bekerja secara normal (Nugraheni, 2011).

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 dipilih beban yang sesuai dengan kebutuhan. Dari ketiga pertimbangan tersebut maka beban yang dilepas semakin spesifik (Nugraheni, 2011).

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 lagi untuk dilepas atau tidak. Tahap *starting* suatu beban 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 (Nugraheni, 2011).

2.2.3.4.2 Perhitungan Beban yang Dilepaskan dan Frekuensi yang Diharapkan Setelah Pelepasan Beban

Menurut Nugraheni (2011) besar beban yang dilepaskan dari suatu sistem untuk memulihkan frekuensi generator disesuaikan dengan tingkat frekuensi acuan yang telah diatur pada *relay*. Pada persamaan (2.12) dan (2.15) telah dibahas mengenai perkiraan laju frekuensi dan frekuensi akhir ketika pemutus tenaga membuka. Untuk mendapatkan besarnya nilai beban yang harus dilepaskan terdapat beberapa parameter yang harus ditentukan dengan mempertimbangkan keandalan sistem, yaitu:

- a. Frekuensi yang diharapkan setelah pelepasan beban (*load shedding*).
- b. Waktu pemulihan.

Menurut Nugraheni (2011) dengan dilakukan suatu pelepasan beban diharapkan frekuensi generator cepat pulih. Oleh sebab itu, untuk mendapatkan besar beban yang dilepaskan sesuai dengan kebutuhan harus ditentukan nilai frekuensi dan waktu pemulihan yang diharapkan setelah dilakukan pelepasan beban. Kedua parameter ini digunakan untuk memperhitungkan nilai laju kenaikan frekuensi yang seharusnya terjadi.

$$f_n = f_0 + \frac{df}{dt} t \quad (2.19)$$

Dimana: f_n = Frekuensi yang diharapkan setelah pelepasan beban.

f_0 = Frekuensi generator ketika terjadi pelepasan beban.

$\frac{df}{dt}$ = Laju kenaikan frekuensi yang diharapkan.

t = Waktu pemulihan.

Dengan mengetahui besarnya laju kenaikan yang diinginkan maka dengan persamaan 2.20 didapatkan nilai beban optimal yang harus dilepas.

$$\frac{df}{dt} = \frac{P_{gen} - (P_{load} - P_{load\ shedding})}{2GH} \cdot fn \quad (2.20)$$

Semakin tinggi nilai frekuensi dan semakin cepat waktu pemulihan yang diharapkan setelah pelepasan, maka nilai beban yang dilepas akan semakin besar. Pelepasan beban (*load shedding*) dapat dilakukan dalam beberapa tahap, sehingga pada tahap pertama beban yang dilepas tidak secara keseluruhan (Nugraheni, 2011).

2.2.4 ETAP (Electrical Transient Analysis Program)

Menurut Nugraheni (2011) ETAP merupakan perangkat lunak yang dapat digunakan untuk mensimulasikan suatu keadaan transien dari sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ini dapat digunakan untuk merancang suatu diagram saluran tunggal dari suatu sistem tenaga listrik baik AC maupun DC dengan menggunakan 2 macam standar yaitu ANSI dan IEC. Beberapa fitur analisis yang disediakan oleh ETAP antara lain:

- a. *Load flow analysis.*
- b. *Transient stability analysis.*
- c. *Motor starting.*
- d. *Star coordination.*
- e. *Short circuit analysis, dll.*

Pada tugas akhir ini fitur ETAP yang digunakan untuk simulasi adalah fitur *transient stability analysis*, dengan simulasi ini dapat dilihat perubahan frekuensi

dan perubahan tegangan ketika generator mulai lepas hingga terjadinya pelepasan beban.