BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT Badak NGL merupakan salah satu industri di bidang pengolahan gas alam cair terbesar di dunia yang tidak lepas dari penggunaan energi listrik dalam menjalankan mesin-mesin industrinya yang mencapai ribuan unit. Energi listrik yang dihasilkan perusahaan ini berasal dari 15 unit generator yang bekerja pada level tegangan 13,8 kV, mulai dari generator PG-01 hingga PG-15 (1x5,5 MW dan 14x12,5 MW) dan menghasilkan daya total sebesar 180 MW. Energi listrik yang dihasilkan didistribusikan ke berbagai fasilitas pendukung pengoperasian kilang maupun ke kompleks perumahan PT Badak NGL seperti *cooling water pump, LNG process plant, airport, central office, community, water pump, dsb*.

Dalam memudahkan pengoperasian, maka sistem di perusahaan ini dibagi atas dua (2) bagian yang saling berhubungan yaitu *module-1* yang membawahi unit pencairan gas yaitu *Train A/B/C/D*, 11 unit boiler, dan *utilities-1* yang terdiri atas 8 unit *power generation* yaitu generator unit G-1 hingga G-8 (1x5,5 MW dan 7x12,5 MW) serta beberapa komponen pendukung lainnya, sedangkan pada *module-2* terdiri atas unit pencairan gas yaitu *Train E/F/G/H*, 10 unit boiler, dan *utilities-2* yang terdiri atas 7 unit *power generation* yaitu generator unit G-9 hingga G-15 (7x12,5 MW) serta beberapa komponen pendukung lainnya.

Saat interkoneksi, seluruh generator (generator ke-1 hingga 15, 1 x 5,5 MW dan 14 x 12,5 MW) dalam keadaan bekerja, sedangkan untuk menghubungkan kedua modul tersebut digunakan sistem jaringan *ring-bus* dengan menaikan tegangan hingga 34,5 kV menggunakan transformator tiga-fasa tiga-belitan. Sistem jaringan ini berfungsi untuk menyalurkan kelebihan daya pada bus satu untuk disalurkan ke bus lainnya yang membutuhkan daya.

Saat ini masih terdapat beberapa kendala pada sistem kelistrikan di PT Badak NGL salah satunya adalah belum adanya analisis khusus untuk mengetahui performa sistem tersebut saat kondisi *steady-state* maupun *transient* (peralihan) sehingga apabila terjadi gangguan maka dapat dengan cepat diketahui. Oleh karena itu, untuk mengangkat permasalahan ini kedalam tugas akhir. Tugas akhir ini akan menganalisis kinerja atau performa sistem saat kondisi *captive* maupun interkoneksi antara *module-1* dan *module-2* serta dalam kondisi *steady-state* maupun dinamik. Diagram sistem daya

yang telah ada dimodelkan kedalam perangkat lunak, lalu disimulasikan dan dianalisis hasilnya.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana performa sistem sebelum dan sesudah interkoneksi pada kondisi *steady-state* dan dinamik.
2. Bagaimana performa stabilitas sudut rotor dan frekuensi pada sistem kelistrikan PT Badak NGL sebelum dan sesudah interkoneksi.

1.3 Batasan Masalah

Pembahasan skripsi ini dibatasi hal-hal sebagai berikut :

1. Data hanya mengacu pada modul atau referensi dari PT Badak NGL tanpa melalui proses pengukuran.
2. Simulasi hanya dilakukan pada dua hal yaitu dalam kondisi *captive* dan kondisi interkoneksi.
3. Parameter yang diamati adalah aliran daya pada saluran, sudut fasa, dan frekuensi.
4. Tidak membahas gangguan dan sistem proteksi secara mendalam pada sistem tersebut.
5. Tidak membahas stabilitas tegangan
6. Program simulasi yang digunakan ialah *PSAT-Matlab Versi 7.8*

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari penulisan ini ialah:

1. Untuk mengetahui performa sistem kelistrikan PT Badak NGL sebelum dan sesudah interkoneksi pada kondisi *steady-state* (tunak) dan dinamik.
2. Untuk mengetahui stabilitas sudut rotor dan frekuensi pada sistem kelistrikan PT Badak NGL sebelum dan sesudah interkoneksi.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat penelitian ini ialah:

1. Mendapatkan gambaran performa sistem PT Badak NGL.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan dari skripsi ini terdiri dari:

BAB I : Berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika pembahasan.

BAB II : Berisi tentang tinjauan pustaka atau dasar teori yang mendukung pembahasan dan analisis penulisan skripsi ini.

BAB III : Berisi metodologi penelitian yang berisi metode yang digunakan dalam analisis, objek penelitian dan data yang diperlukan, serta langkah-langkah penelitian.

BAB IV : Berisi pembahasan dan analisis penelitian dengan memperhatikan data yang tersedia.

BAB V : Berisi kesimpulan dari tujuan penelitian serta saran dari penulis.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Analisis Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan studi yang berguna untuk mendapatkan informasi mengenai aliran daya atau tegangan sistem dalam kondisi operasi tunak (*steady-state*). Informasi ini sangat berguna dalam mengevaluasi unjuk kerja sistem tenaga dan menganalisis kondisi pembangkitan maupun pembebanan.

Masalah aliran daya mencakup perhitungan aliran dan tegangan sistem pada terminal tertentu atau bus tertentu. Representasi fasa tunggal selalu dilakukan karena sistem dianggap seimbang. Didalam studi aliran daya, bus-bus dibagi dalam tiga (3) macam, yaitu:

1. *Slack bus* atau *swing bus* atau bus referensi

   Komponen yang diketahui dalam bus ini ialah besar tegangan dan sudut fasa, sedangkan yang tidak diketahui ialah daya aktif (*P*) dan daya reaktif (*Q*). Umumnya dalam analisis aliran daya hanya terdapat satu *slack bus*. *Slack bus* berfungsi untuk menyalurkan kekurangan daya real *P* dan daya reaktif *Q* pada sistem.

2. *Voltage controlled bus* atau bus generator (*P-V bus*)

   Komponen yang diketahui pada bus ini ialah besar tegangan dan daya aktif (P), sedangkan dua komponen lainnya yaitu daya reaktif dan sudut fasa tegangan tidak diketahui.

3. *Load bus* atau bus beban (*P-Q bus*)

   Bus ini merupakan selisih antara daya yang dibangkitkan oleh generator dengan daya yang diserap beban pada bus itu. Dalam hal ini, daya aktif (*P*) dan daya reaktif (*Q*) diketahui sedangkan dua besaran lainnya tidak diketahui.

2.1.1 Matriks Admintansi Bus

Dalam sistem tenaga, impedansi biasanya menggunakan nilai dasar atau base dalam per unit pada dasar MVA sementara untuk penyederhanaan resistansi diabaikan. Sebelum memulai analisis, impedansi-impedansi dirubah terlebih dahulu menjadi admintansi seperti dibawah ini:

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij}+jx_{ij}} \tag{2-1}$$

Dimana,

y_{ij} = admintansi kawat bus-*i* ke bus-*j*

Untuk sistem bus-n, persamaan arus pada simpul dalam bentuk matriks ialah:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & & Y_{in} \\ \vdots & & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{ni} & & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2\text{-}2)$$

Atau,

$$I_{bus} = Y_{bus}\, V_{bus} \quad (2\text{-}3)$$

Dengan,

I_{bus} : vektor arus bus yang diinjeksikan, arus positif jika menuju bus dan arus negatif jika meninggalkan bus.

V_{bus} : vektor tegangan bus yang diukur dari simpul referensi

Y_{bus} : matriks admintansi bus

Sedangkan nilai admintansi sendiri yaitu,

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^{n} y_{ij} \quad , \quad i \neq j \quad (2\text{-}4)$$

dengan admintansi bersama, yaitu:

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (2\text{-}5)$$

Jika arus bus diketahui, persamaan (2-3) dapat diselesaikan untuk tegangan *n*-bus yaitu:

$$V_{bus} = Y_{bus}^{-1} I_{bus} \quad (2\text{-}6)$$

Invers dari matriks admintansi bus dikenal sebagai matriks impedansi bus Z_{bus}.

2.1.2 Persamaan Aliran Daya

Jaringan sistem tenaga seperti pada gambar 2.1, salurannya dapat digambarkan dengan model-π yang mana impedansi-impedansinya telah diubah menjadi admintansi-admintansi per-unit pada base/dasar MVA.

Aplikasi hukum arus *Kirchoff* pada bus ini diberikan dalam:

$$I_i = y_{io}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n)$$

$$= (y_{io} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots + y_{in}V_n \quad (2\text{-}7)$$

Atau,

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^{n} y_{ij} - \sum_{j=1}^{n} y_{ij} Vj \quad , \text{ dimana } j \neq i \quad (2\text{-}8)$$

Daya reaktif dan aktif pada bus *i* adalah:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2\text{-}9)$$

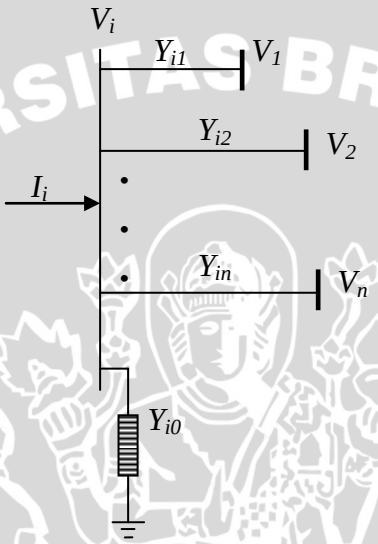
Atau,

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2\text{-}10)$$

Subtitusi untuk I_i pada persamaan (2-8) maka:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^{n} y_{ij} - \sum_{j=0}^{n} y_{ij} Vj \quad , \text{ dimana } j \neq i \quad (2\text{-}11)$$

Dari hubungan diatas formulasi perhitungan dari aliran daya dalam sistem tenaga harus diselesaikan dengan menggunakan teknik iterasi.



Gambar 2.1 Tipikal bus dari sistem tenaga
(Sumber: Cekmas Cekdin, 2007: 5)

2.1.3 Penyelesaian Aliran Daya Dengan Menggunakan Metode *Newton Raphson*

Dalam menganalisa sistem jaringan yang memiliki lebih dari satu (1) sumber listrik ataupun pada sistem jaringan kompleks maka diperlukan suatu metode analisa daya yang sesuai untuk memudahkan perhitungan. Oleh karena itu, untuk mempermudah perhitungan akan digunakan metode *Newton-Raphson* pada penulisan tugas akhir ini.

Dalam metode ini persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar. Dari gambar 2.1, arus yang memasuki bus *i* dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2-8). Persamaan tersebut dapat ditulis ulang yaitu:

$$I_i = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_j \quad (2\text{-}12)$$

Persamaan diatas dapat ditulis dalam bentuk polar yaitu:

$$I_i = \sum_{j=1}^{n} |Y_{ij}||V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2\text{-}13)$$

Dimana, θ_{ij} = Sudut fasa tegangan

δ_j = Sudut daya (rotor) terhadap *infinite bus*

Daya kompleks pada bus-*i* yaitu:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \tag{2-14}$$

Persamaan (2.13) dapat disubtitusikan kedalam persamaan (2.14) sehingga menghasilkan:

$$P_i + jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^{n} |Y_{ij}||V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \tag{2-15}$$

Setelah itu, pisahkan bagian real dan imajiner persamaan diatas sehingga menjadi:

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{2-16}$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{2-17}$$

Persamaan (2-16) dan (2-17) akan membentuk persamaan *non-linier*. Besar setiap variable dinyatakan dalam *p.u.* (per-unit) sedangkan sudut fasa dinyataan dalam radian. Persamaan (2-16) dan (2-17) dikembangkan dalam *Deret Taylor* seperti pada persamaan dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}^{(k)} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}^{(k)} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}^{(k)} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}^{(k)} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}^{(k)} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}^{(k)} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \tag{2-18}$$

Disini diasumsikan bahwa bus-*1* adalah *slack bus.* Matriks Jacobian memberikan perbandingan linier antara perubahan pada sudut tegangan $\Delta\delta_i^{(k)}$ dan besar tegangan $\Delta|V_i^{(k)}|$ dengan sedikit perubahan pada daya aktif ($\Delta P_i^{(k)}$) dan daya reaktif ($\Delta Q_i^{(k)}$). Sehingga dalam bentuk singkat dapat ditulis seperti pada persamaan dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \tag{2-19}$$

Pada persamaan (2-19), banyaknya elemen matriks Jacobian dapat ditentukan dengan *(2n-2-m) x (2n-2-m). J_1* didapatkan dari *(n-1) x (n-1)*, *J_2* didapatkan dari *(n-1) x (n-1-m)*, *J_3* didapatkan dari *(n-1-m) x (n-1)*, dan *J_4* didapatkan dari *(n-1-m) x (n-1-m)*,

Dimana,

n = banyaknya bus dalam sistem,

m = banyaknya *voltage-controlled buses* pada sistem

Dengan J_1 yaitu:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j\neq 1} |V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2\text{-}20)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad , j \neq i \quad (2\text{-}21)$$

Dengan J_2 yaitu:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i||Y_{ii}|\cos(\theta_{ii}) + \sum_{j\neq i} |V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2\text{-}22)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad , j \neq i \quad (2\text{-}23)$$

Dengan J_3 yaitu:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j\neq 1} |V_i||V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2\text{-}24)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad , j \neq i \quad (2\text{-}25)$$

Dengan J_4 yaitu:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ii}|\sin(\theta_{ii}) + \sum_{j\neq i} |V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2\text{-}26)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad , j \neq i \quad (2\text{-}27)$$

Pada penjelasan diatas diketahui bahwa nilai harga $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ berbeda antara yang terjadwal dengan nilai perhitungan, maka ini disebut dengan sisa daya (*power residuals*) yang diberikan dengan:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2\text{-}28)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2\text{-}29)$$

Perhitungan baru untuk sudut fasa dan tegangan bus adalah:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \quad (2\text{-}30)$$

$$\left|V_i^{(k+1)}\right| = \left|V_i^{(k)}\right| + \Delta|V_i^{(k)}| \quad (2\text{-}31)$$

Prosedur penyelesaian studi aliran daya menggunakan metode *Newton-Rhapson* akan dijelaskan sebagai berikut:

1. Pada bus berbeda dimana P_i^{sch} dan Q_i^{sch} harga nilainya ditentukan. Besar sudut fasa dan tegangan disamakan seperti *slack bus* (1,0 dan 0,0) jadi $\left|V_i^{(0)}\right| = 1.0$

dan $\delta_i^{(0)}$ = 0.0. untuk *voltage regulate bus* dimana $|V_i|$ dan P_i^{sch} diatur, sedangkan sudut fasa disamakan dengan sudut *slack bus*, $\delta_i^{(0)} = 0$.

2. Hitung $P_i^{(k)}$ dan $Q_i^{(k)}$ pada bus berbeban dengan persamaan (2-16) dan (2-17), dan juga $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ diselesaikan dengan menggunakan persamaan (2-28) dan (2-29).
3. Hitung $P_i^{(k)}$ dan $\Delta P_i^{(k)}$ pada *voltage controlled buses* dengan persamaan (2-16) dan (2-17).
4. Hitung elemen-elemen Matriks Jacobian; J_1, J_2, J_3, dan J_4 dengan persamaan (2-20) sampai dengan persamaan (2-27).
5. Hitung harga $\Delta\delta_i^{(k)}$ dan $\Delta\left|V_i^{(k)}\right|$ dengan persamaan (2-19).
6. Hitung harga-harga baru dari sudut fasa dan tegangan $\delta_i^{(k+1)}$ dan $\left|V_i^{(k+1)}\right|$ dengan persamaan (2-30) dan (2-31).
7. Hitung proses ini hingga:

$$\left|V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}\right| \leq \epsilon$$

2.2 Dinamika Sistem Tenaga Listrik

2.2.1 Kestabilan *Steady-State*

Kestabilan *Steady-State* merupakan keadaan dimana sistem tenaga mencapai kondisi stabil pada kondisi operasi baru yang sama atau identik dengan kondisi sebelum terjadi gangguan setelah gangguan mengalami gangguan kecil. Analisis kestabilan *steady-state* menggunakan pendekatan model *linier*. Kestabilan *steady state* pada sistem tenaga dapat disebut kestabilan sinyal kecil (*small signal stability*). Kestabilan *steady-state* merupakan sebuah fungsi dari kondisi operasi.

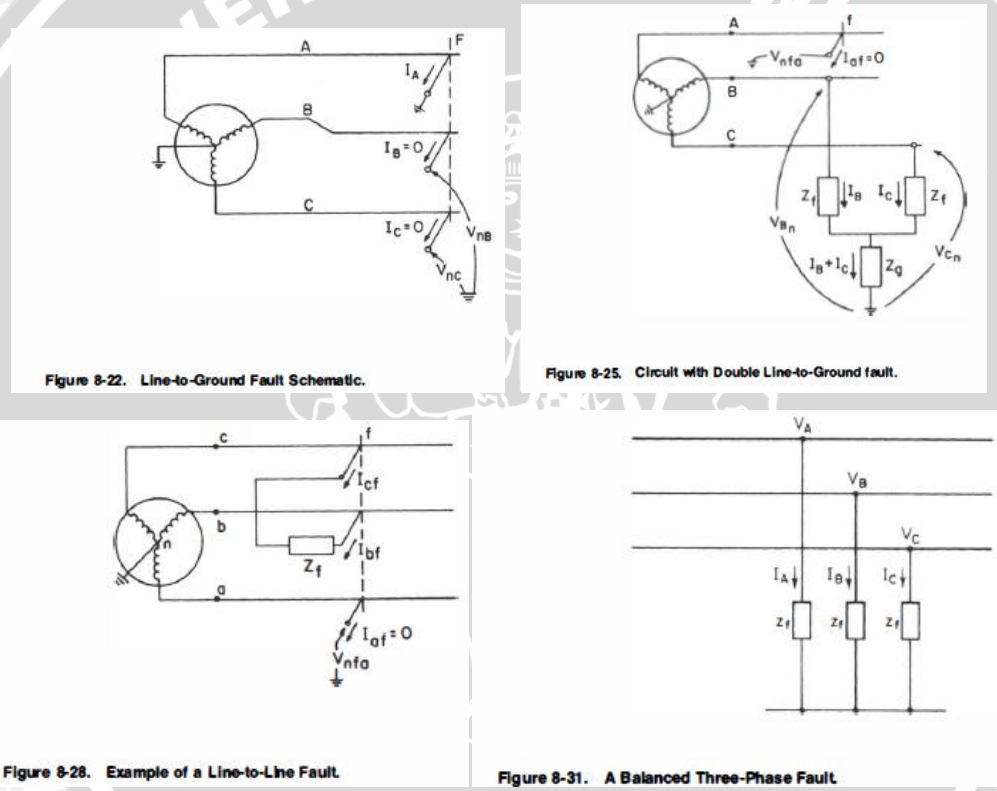
2.2.2 Kestabilan *Transient* (Peralihan)

Kestabilan *transient* merupakan kemampuan sistem tenaga mencapai kondisi stabil operasi baru yang dapat diterima setelah sistem mengalami gangguan besar. Analisis untuk kestabilan ini menggunakan pendekatan model *nonlinier*. Kestabilan *transient* pada sistem tenaga merupakan respon *output* yang mencapai kondisi *steady-state* yang diijinkan dan sistem dapat kembali ke posisi awal setelah mengalami gangguan. Kestabilan *transient* merupakan fungsi dari kondisi operasi dan gangguan.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Selain dua (2) kestabilan diatas, Professor William D. Stevenson menambahkan satu (1) kategori yaitu kestabilan dinamik. Secara teori dan konsep, kestabilan *steady-state* dan dinamik adalah sama. Perbedaannya ialah pada masalah pemodelan. Pada kestabilan dinamik, sistem eksitasi, turbin, dan generator dimodelkan dengan menyediakan variasi fluks pada *air-gap* mesin. Sementara pada kestabilan *steady-state* digunakan model generator yang sederhana, yaitu generator direpresentasikan sebagai sumber tegangan konstan.

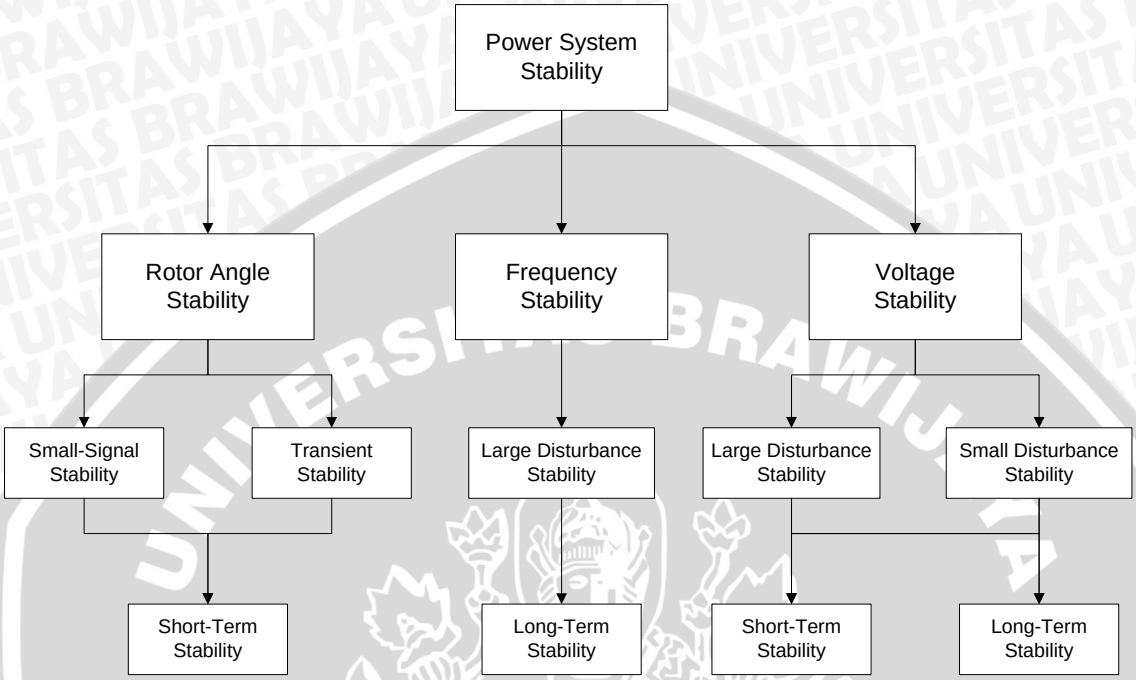
Setiap operasi sistem daya pasti selalu mengalami gangguan hubung singkat yang dapat menyebabkan sistem tidak beroperasi secara seimbang. Adapun macam-macam gangguan hubung singkat pada sistem tiga fasa (*three-phase*) ditunjukkan pada gambar 2.2, yaitu :



Gambar 2.2 Macam-macam gangguan hubung singkat
Sumber : Mohamed E. El-Hawary (1995 : 501-515)

2.3 Klasifikasi Stabilitas Sistem Daya

Klasifikasi stabilitas secara lengkap dapat dilihat pada gambar 2.3. Disana terlampir macam-macam stabilitas yaitu stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi, dan stabilitas tegangan.



Gambar 2.3 Klasifikasi stabilitas sistem daya
Sumber : Kundur (1994 : 36)

2.3.1 Stabilitas Sudut Rotor

Rotor angle stability atau stabilitas sudut rotor merupakan kemampuan dari mesin sinkron (generator sinkron) pada sistem tenaga listrik untuk mencapai sinkronisasi. Stabilitas sudut rotor berhubungan dengan osilasi pada rotor. Ketika dua atau lebih mesin sinkron terinterkoneksi, tegangan pada stator dan arus pada semua mesin harus memiliki frekuensi yang sama dan kecepatan mekanik rotornya harus sama akibat frekuensi yang sama. Intinya, rotor pada semua mesin yang terinterkoneksi harus dalam keadaan sinkron. Stabilitas sudut rotor melibatkan studi tentang osilasi elektromekanis yang melekat dalam sistem daya. Faktor mendasar dalam masalah ini adalah metode dimana daya keluaran mesin sinkron bervariasi sesuai dengan perubahan sudut rotor. Mekanisme mesin sinkron yang interkoneksi dalam mempertahankan sinkronisasi satu sama lain adalah melalui pemulihan torsi, ketika ada torsi mesin cenderung untuk mempercepat atau mengurangi kecepatan. Dalam keadaan operasi yang stabil dari sistem tenaga listrik terdapat keseimbangan antara daya input mekanis pada *prime-mover* dengan daya *output* listrik (beban listrik) pada sistem. Dalam keadaan ini semua generator berputar pada kecepatan sinkron. Hal ini terjadi bila

setiap kenaikan dan penurunan beban harus diikuti dengan perubahan daya *input* mekanis pada *prime mover* dari generator-generator.

Bila daya *input* mekanis tidak cepat mengikuti dengan perubahan beban dan rugi-rugi sistem maka kecepatan rotor generator (frekuensi sistem) dan tegangan akan menyimpang dari keadaan normal terutama jika terjadi gangguan, maka sesaat terjadi perbedaan yang besar antara daya *input* mekanis dan daya *output* listrik dari generator.

Kelebihan daya mekanis terhadap daya listrik mengakibatkan percepatan pada putaran rotor generator atau sebaliknya, bila gangguan tersebut tidak dihilangkan segera maka percepatan (*acceleration*) dan perlambatan (*deceleration*) putaran rotor generator akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem.

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah suatu kemampuan sistem tenaga listrik atau bagian komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan dalam sistem. Batas stabilitas sistem adalah daya-daya maksimum yang mengalir melalui suatu titik dalam sistem tanpa menyebabkan hilangnya stabilitas.

Berdasarkan sifat gangguan, masalah stabilitas sistem tenaga listrik dibedakan atas:

1. Stabilitas tetap (*steady state*).
2. Stabilitas peralihan (*transient*).
3. Stabilitas sub peralihan (*dinamic*).

Untuk kemudahan dalam analisis dan untuk memperoleh informasi yang bermanfaat mengenai sifat dari masalah stabilitas, maka penting untuk mengkarakterisasikan stabilitas sudut rotor dalam dua kategori berikut (Grigsby, 2007 : 7.6):

1. Stabilitas sudut rotor saat gangguan kecil dapat disebut juga sebagai stabilitas *steady state* yaitu kemampuan sistem tenaga listrik untuk tetap menjaga sinkronisasi diantara mesin dalam sistem dan saluran *external* apabila terjadi perubahan beban baik secara normal ataupun lambat. Stabilitas *steady state* bergantung kepada batas-batas transmisi dan kapasitas pembangkitan dan efektifitas perangkat kontrol otomatis, terutama untuk regulasi tegangan automatis (*AVR*) pada generator. Pernyataan diatas juga berlaku untuk kestabilan *transient* dan dinamik.

   Apabila beban pada generator meningkat maka, rotasi rotor akan melambat, dan sebaliknya, akan semakin cepat apabila beban menurun. Pada kondisi normal, perubahan sudut rotor akan sedikit mengalami

"*overshoot*", yaitu akan sedikit lebih lambat atau lebih cepat. Pada kondisi stabil maka osilasi akan tetap terjadi sampai akhirnya berada pada posisi tertentu untuk kondisi beban yang baru. Apabila rotor berada pada kondisi tetap yang hanya terjadi dalam waktu yang cepat, maka mesin dapat dikatakan dalam keadaan stabil, dan osilasi dikatakan memiliki damping yang baik.

Swing pada kondisi yang telah dijelaskan tersebut biasanya terlalu cepat untuk direspon oleh *governor* pada mesin. Bagaimanapun juga, sistem eksitasi generator yang cepat beraksi (eksiter dan regulasi tegangan pada generator) akan peka terhadap perubahan tegangan yang menyebabkan osilasi sudut rotor dan memperkuat atau memperlemah medan generator, sehingga mempengaruhi kecepatan mesin untuk mencapai kondisi operasi yang stabil. Kondisi yang telah dijabarkan diatas akan selalu ada pada sistem tenaga listrik karena beban yang ada akan selalu bertambah dan ada pula yang hilang, dan semua generator yang terinterkoneksi harus selalu menyesuaikan energi input, sudut rotor, dan eksitasi agar sesuai dengan kondisi pada saat itu juga.

2. Stabilitas sudut rotor pada gangguan besar atau stabilitas peralihan (*Transient*), dapat didefinisikan sebagai kemampuan sistem tenaga untuk mencapai kondisi stabil operasi baru yang dapat diterima setelah sistem mengalami gangguan besar. Analisis kestabilan transien menggunakan pendekatan model *nonlinear*. Kestabilan transien pada sistem tenaga adalah respon *output* yang mencapai kondisi operasi *steady-state* yang diizinkan dan sistem yang dapat kembali ke posisi semula pada saat sistem mengalami gangguan. Kestabilan *transient* merupakan fungsi dari kondisi operasi dan gangguan. Situasi yang lebih hebat akan terjadi bila pembangkitan atau beban besar hilang dari sistem atau terjadi gangguan pada saluran transmisi. Pada kasus semacam itu stabilitas *transient* harus cukup kuat untuk mempertahankan diri terhadap kejutan (*shock*) atau perubahan beban yang relatif besar yang terjadi. Stabilitas *transient* adalah kemampuan sistem untuk tetap pada kondisi sinkron (sebelum terjadi aksi dari kontrol *governor*) yang mengikuti gangguan pada sistem.

Setelah hilangnya pembangkitan atau beban besar secara tiba-tiba, keseimbangan antara energi *input* dan *output* elektris pada sistem akan

hilang. Jika energi *input* tidak lagi mencukupi, inersia rotor mesin yang masih bekerja, pada periode yang singkat akan melambat. Apabila beban hilang maka energi *input* pada sistem akan melebihi beban elektris, dan mesin akan bergerak semakin cepat.

Bermacam-macam faktor mempengaruhi stabilitas sistem, seperti kekuatan pada jaringan transmisi didalam sistem dan saluran pada sistem yang berdekatan, karaktristik pada unit pembangkitan, termasuk inersia pada bagian yang berputar, dan properti elektris seperti reaktansi *transient* dan karakteristik saturasi magnetik pada besi stator dan rotor. Faktor penting lainnya adalah kecepatan dimana saluran atau perlengkapan yang terjadi gangguan dapat diputus (*disconnect*) dan, dengan *reclosing* otomatis pada saluran transmisi, yang menentukan seberapa cepat saluran dapat beroperasi lagi. Sebagaimana pada stabilitas *steady-state*, kecepatan respon pada sistem eksitasi generator merupakan faktor yang penting dalam mempertahankan stabilitas *transient*. Gangguan pada sistem biasanya diikuti oleh perubahan tegangan yang cepat pada sistem, dan pemulihan kembali tegangan dengan cepat menuju ke kondisi normal merupakan hal yang penting dalam mempertahankan stabilitas.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, stabilitas *transient* adalah kemampuan untuk tetap pada kondisi sinkron selama periode terjadinya gangguan dan sebelum adanya reaksi dari *governor*. Pada umumnya ayunan pertama pada rotor mesin akan terjadi selama satu detik setelah gangguan, tetapi waktu yang sebenarnya bergantung pada karakteristik mesin dan sistem transmisi. Setelah periode ini, *governor* akan mulai bereaksi, biasanya sekitar 4 hingga 5 detik, dan stabilitas dinamis akan efektif.

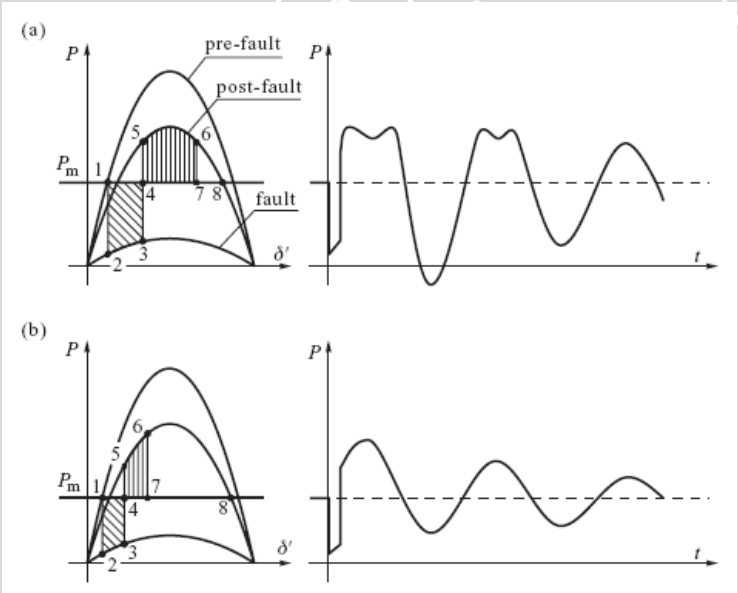
Selama periode peralihan, tegangan terminal, sudut rotor dan frekuensi akan berubah. Besarnya tegangan kumparan medan akan dipengaruhi oleh:

1) Arus induksi pada kumparan peredam (*damper winding*) selama terjadinya perubahan nilai arus pada kumparan jangkar. Konstanta waktu terjadinya arus ini berkisar antara 0.1 detik dan disebut “efek *subtransient*”.

2) Arus induksi pada kumparan medan selama terjadinya perubahan mendadak pada arus kumparan jangkar. Kostanta waktu untuk periode ini berkisar 2 detik dan disebut sebagai “efek *transient*”.

Telaah kestabilan peralihan bertujuan untuk menentukan apakah sistem tadi akan tetap dalam keadaan serempak setelah terjadinya gangguan berat, misalnya gangguan sistem transmisi, perubahan beban yang mendadak, terputusnya unit pembangkit, atau pemutaran saklar (*switching*) saluran. Telaah semacam ini telah dimulai lebih dari 50 tahun yang lalu, tetapi pada saat itu hanya terbatas pada pada pembahasan masalah dinamis yang menyangkut tidak lebih dari dua buah mesin. Sistem daya masa kini jauh lebih luas, ditambah dengan sistem interkoneksi yang rumit dan melibatkan banyak mesin.

Saat gangguan, perubahan osilasi rotor berpengaruh pada daya yang dihasilkan. Kondisi dari variasi daya dapat menjadi sumber yang berguna untuk melakukan pendekatan dan sebagai informasi tentang batas stabilitas peralihan. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut:

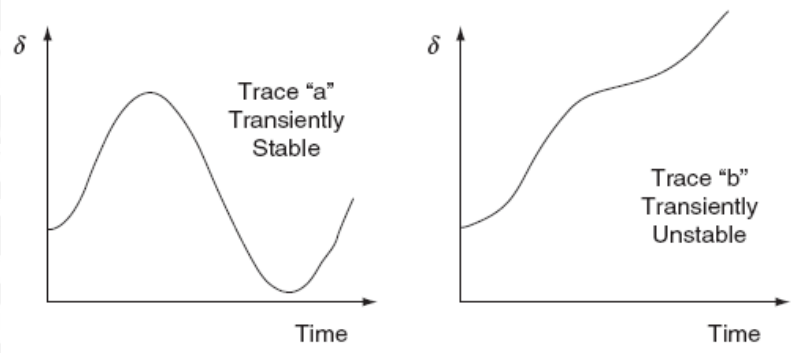


Gambar 2.4 Osilasi daya (a) batas stabilitas rendah, dan (b) batas stabilitas besar
Sumber : Machowski (2008 : 216)

Gambar 2.5 menjelaskan mengenai gangguan generator pada suatu sistem yang menunjukkan bahwa sudut rotor generator pulih dan berosilasi di sekitar titik keseimbangan baru seperti pada grafik 'a' atau meningkat secara tidak periodik seperti grafik 'b'. Grafik yang pertama ini dianggap kondisi peralihan yang stabil, dan kondisi grafik yang kedua disebut kondisi peralihan yang tidak stabil.

Beberapa hal penting yang harus diketahui dalam memahami stabilitas peralihan yaitu: (i) persamaan ayunan dan (ii) persamaan sudut daya (Grigsby, 2007 : 8.2). Untuk

menjelaskan hal ini dapat digunakan kriteria sama luas, yaitu pendekatan grafis yang sederhana untuk menilai stabilitas peralihan.



Gambar 2.5 Lintasan sudut rotor generator sebagai fungsi waktu
Sumber : Grigsby (2007 : 8.2)

2.3.1.1 Persamaan Ayunan

Pada mesin sinkron, persamaan gerakan rotor didasarkan pada prinsip dasar dalam dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelarating torque*) merupakan hasil kali dari momen inersia rotor dan percepatan sudutnya. Persamaan tersebut dapat ditulis daam bentuk:

$$J\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_\alpha = T_m - T_e \qquad (2\text{-}32)$$

Dimana,

J = momen inersia total dari massa rotor (kg-m^2)

δ_m = pergeseran sudut (*angular displacement*) rotor (rad)

T_a = momen putar percepatan rotor (N-m)

T_m = momen putar mekanis (N-m)

T_a = momen putar elektromagnetik (N-m)

Jika terjadi gangguan akan timbul suatu percepatan ($T_m > T_e$) atau perlambatan ($T_m < T_e$) dengan:

$$T_\alpha = T_m - T_e \qquad (2\text{-}33)$$

Hubungan sudut daya listrik δ dengan sudut daya mekanik $\delta_m$yaitu:

$$\delta = \frac{p}{2}\delta_m \qquad (2\text{-}34)$$

Serta,

$$\omega = \frac{p}{2}\omega_m \qquad (2\text{-}35)$$

Persamaan ayunan dalam hubungan dengan sudut daya listrik yaitu:

$$\frac{2}{p}M\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \qquad (2\text{-}36)$$

Dengan nilai M adalah $\frac{2W_k}{\omega_{sm}}$ sehingga persamaan menjadi:

$$\frac{2}{p}\frac{2W_k}{\omega_{sm}S_B}\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} \tag{2-37}$$

Dimana, H=$\frac{W_K}{S_B}$ sehingga menjadi:

$$\frac{2}{p}\frac{2H}{\omega_{sm}}\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_{m(p.u)} - P_{e(p.u)} \tag{2-38}$$

Dengan,

$P_{m(p.u)}$ = Daya mekanik dalam satuan *per-unit* (p.u)

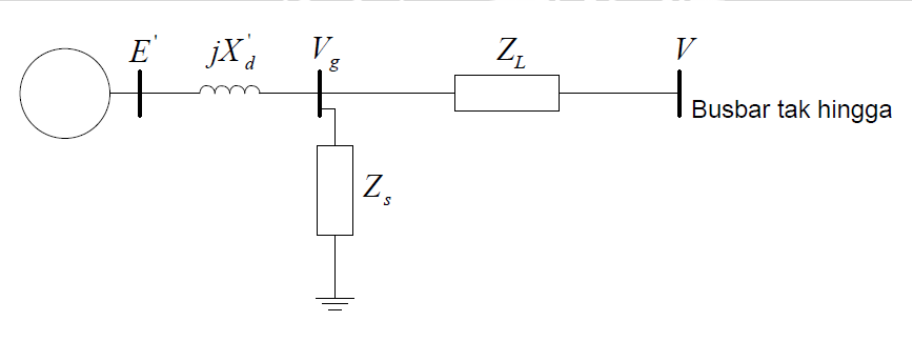
$P_{e(p.u)}$ = Daya listrik dalam satuan *per-unit* (p.u)

Hubungan kecepatan putar listrik dengan kecepatan putar mekanik dengan $\omega_{sm} = \frac{2}{p}\omega_s$ sehingga persamaannya adalah:

$$\frac{2H}{\omega_s}\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{m(p.u)} - P_{e(p.u)} \tag{2-39}$$

2.3.1.2 Pemodelan Mesin Sinkron Pada Studi Kestabilan

Representasi mesin sinkron pada kondisi *transient* dinyatakan dengan sumber tegangan dalamnya dan disertai dengan reaktansi *transientnya*. gambar dibawah ini menunjukkan sebuah generator sinkron dihubung ke busbar tak hingga.



Gambar 2.6 Sebuah mesin terhubung ke bus tak hingga (*infinited bus*)
(Sumber: Cekmas Cekdin, 2007: 232)

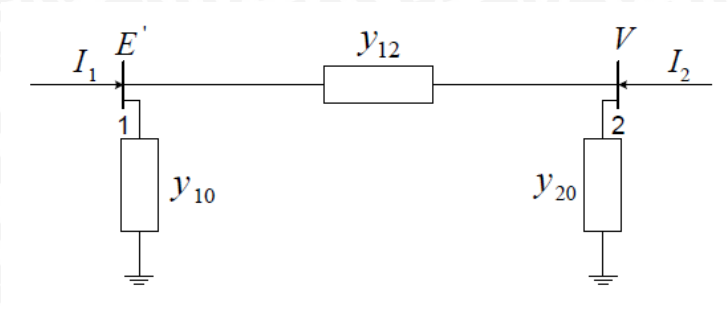
Jika tegangan terminal generator diberi nomor 1, dan busbar diberi nomor 2, serta grounding diberi nomor 0, maka impedansi sistem tersebut diatas dapat dinyatakan dalam admitansi sebagai berikut:

$$y_{10} = \frac{Z_L}{jX'_d.Z_s + jX'_d.Z_L + Z_L.Z_s}$$

$$y_{20} = \frac{jX'_d}{jX'_d.Z_s + jX'_d.Z_L + Z_L.Z_s} \tag{2-40}$$

$$y_{12} = \frac{Z_s}{jX'_d.Z_s + jX'_d.Z_L + Z_L.Z_s}$$

Sehingga dapat digambarkan dalam bentuk π *(phi)* sebagai berikut:



Gambar 2.7 Rangkaian ekivalen sebuah mesin terhubung ke bus tak hingga.

(Sumber: Cekmas Cekdin, 2007: 233)

Maka didapat persamaan sistem sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E' \\ V \end{bmatrix} \tag{2-41}$$

Maka persamaan daya aktif sistem adalah:

$P_e = \Re[E'.I_1^*]$

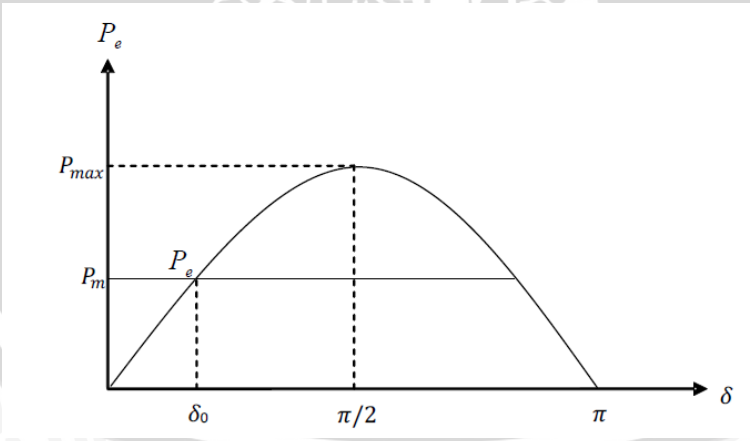
$P_e = \Re[|E'|\angle\delta(|Y_{11}|\angle-\theta_{11}|E'|\angle-\delta+|Y_{12}|\angle-\theta_{12}|V|\angle 0)]$

$$P_e = |E'|^2|Y_{11}|cos\theta_{11} + |E'||V||Y_{12}|\cos(\delta-\theta_{12}) \tag{2-42}$$

Jika nilai $\theta_{11} = \theta_{12} = 90^o$, dan $Y_{12} = B_{12} = \frac{1}{X_{12}}$, sehingga persamaan 2.42

$P_e = |E'||V||B_{12}|\cos(\delta - 90^o)$

$$P_e = \frac{|E'||V|}{X_{12}}\sin\delta \tag{2-43}$$



Gambar 2.8 Kurva sudut daya

(Sumber: Cekmas Cekdin, 2007: 233)

Dari persamaan diatas diketahui bahwa hubungan daya tergantung pada reaktansi X_{12} dan sudut δ antara kedua tegangan. Kurva P_e versus δ dikenal sebagai kurva sudut daya yang diperlihatkan pada gambar 2.8.

Daya maksimum dapat dipandang sebagai batas stabilitas keadaan mantap (*steady-state stability limit*), terjadi pada sudut 90° yang dinyatakan dengan:

$$P_e = \frac{|E'||V|}{X_{12}} \sin \delta \qquad (2\text{-}44)$$

Apabila dinyatakan dalam kurva sudut daya, maka seperti ditunjukkan pada gambar diataas, dan persamaan daya maksimum sebagai berikut:

$$P_{maks} = \frac{|E'||V|}{X_{12}} \sin \delta \qquad (2\text{-}45)$$

dengan P_e : daya listrik generator (*W*),

E' : tegangan generator (*V*),

V : tegangan *infinite bus* (*V*),

X_{12} : reaktansi total (Ω), dan

δ : sudut rotor mesin

dan persamaan daya elektrik adalah:

$$P_e = P_{maks} \sin \delta \qquad (2\text{-}46)$$

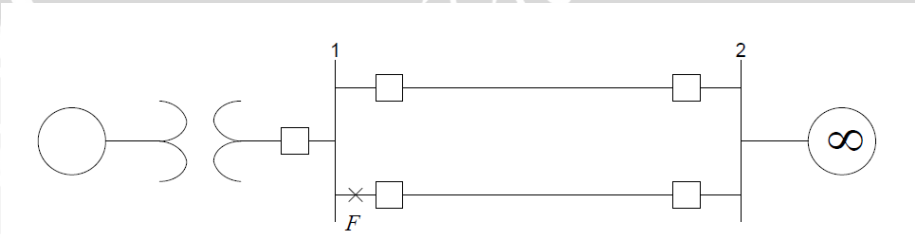
Bila terjadi hubung singkat, maka tegangan *transient* generator dapat dihitung dengan rumus:

$$E' = V_g + jX'_d I_a \qquad (2\text{-}47)$$

Dengan, I_a = arus generator sebelum gangguan

2.3.1.3 Gangguan Tiga-Fasa Pada Sistem

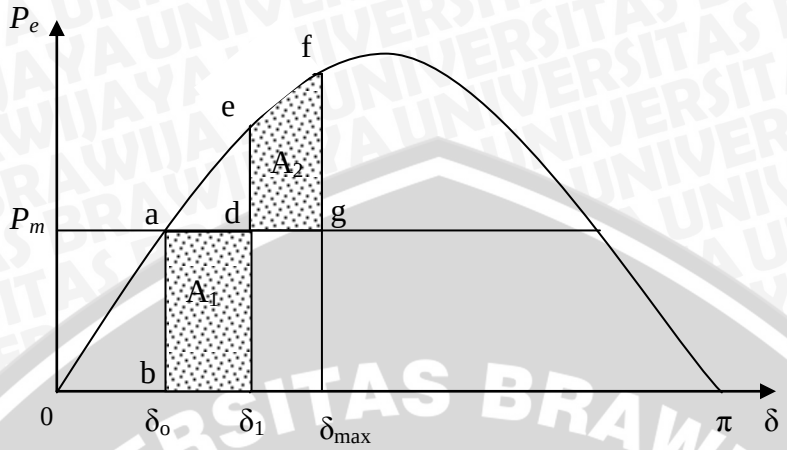
Perhatikan gambar dibawah ini, dimana sebuah generator dihubungkan ke bus tak hingga (*infinite Bus*) lewat saluran pararel. Anggap gangguan terjadi pada bus 1 dan daya masukan mekanis P_m adalah konstan serta mesin beroperasi apda kondisi stabil. Daya yang dialirkan ke sistem dengan sudut δ_o seperti pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.9 Sistem satu mesin yang dihubungkan ke bus tak hingga, gangguan tiga fasa pada *F*.
(Sumber: Cekmas Cekdin, 2007: 236)

Jika gangguan terjadi pada sisi kirim yaitu pada titik F, maka tidak ada daya yang dikirim ke *infinite bus*. Selama gangguan terjadi, daya listrik P_e adalah nol.

Sementara masukan daya mekanis P_m tidak berubah seperti terlihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.10 Kriteria sama luas untuk gangguan tiga fasa pada sisi kirim
(Sumber: Cekmas Cekdin, 2007: 236)

Pada gambar 2.10, sudut rotor bergerak dari δ_o ke sudut pemutus kritis δ_k sehingga nilainya berubah dari *point* b ke *point* c. Jika gangguan dihilangkan pada sudut δ_k. Keluaran daya listrik mendadak naik ke *point* d pada lengkung sudut daya. Pada titik d, keluaran daya listrik P_e melebihi masukan daya mekanis P_m sehingga daya percepatan P_a adalah negatif. Akibatnya kecepatan rotor menurun sementara P_e berubah dari *point* d ke *point* e. Pada *point* e, kecepatan rotor kembali serempak meskipun sudut rotor sudah maju sampai δ_{max}. Sudut δ_{max} ditentukan dari kriteria sama luas $A_1 = A_2$.

Sudut pemutusan kritis δ_k (*critical clearing angle*) dapat dicari dengan cara:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_k} P_m d\delta = \int_{\delta_k}^{\delta_{mak}} (P_{mak} sin\delta - P_m) d\delta$$

$$P_m(\delta_k - \delta_o) = P_{mak}(cos\delta_k - cos\delta_{mak}) - P_m(\delta_{mak} - \delta_k)$$

Untuk nilai δ_k yaitu:

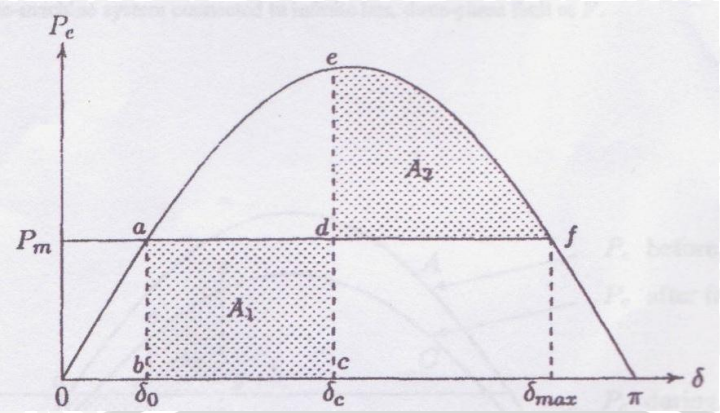
$$cos\delta_k = \frac{P_{in}}{P_{mak}}(\delta_{mak} - \delta_0) - cos\delta_{mak} \qquad (2\text{-}48)$$

Dengan, $\delta = \frac{\pi f_0}{H} P_m t^2 + \delta_0$

Dengan sudut pemutusan kritis δ_k, maka waktu pemutusan kritis ialah:

$$t_k = \sqrt{\frac{2H(\delta_k - \delta_0}{\pi f_0 P_m}} \qquad (2\text{-}49)$$

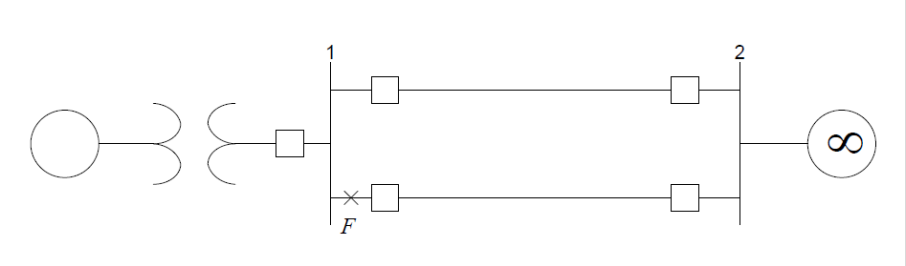
Dengan konstanta $H=W_k/S_B$, dimana W_k adalah energi kinetik dalam *MJ* dan S_B adalah rating mesin dalam MVA.



Gambar 2.11 Kriteria sama luas untuk sudut pemutusan kritis
(Sumber: Cekmas Cekdin, 2007: 237)

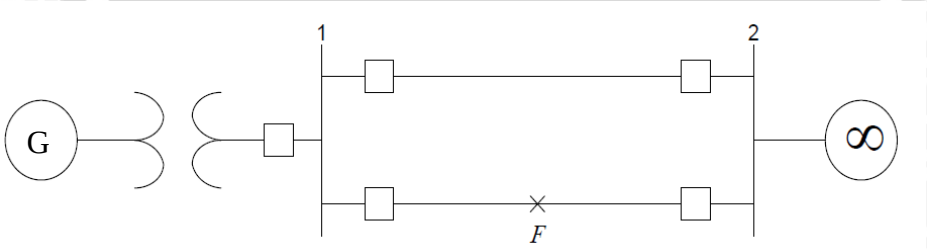
2.3.1.4 Menentukan Reaktansi Rangkaian Sebelum, Selama, dan Setelah Gangguan

Bila gangguan terjadi pada sisi kirim maka reaktansi sebelum maupun sesudah gangguan adalah sama, sedangkan selama gangguan tidak ada daya yang dikirim ke *infinite bus* ($P_e = 0$). Sehingga rangkaian X tidak perlu ditentukan.



Gambar 2.12 Sistem satu mesin yang dihubungkan ke *infinite bus*, gangguan tiga fasa pada *F*.
(Sumber: Cekmas Cekdin, 2007: 236)

Namun apabila gangguan terjadi jauh dari sisi kirim (gambar 2.13), maka rangkaian untuk menentukan reaktansi X sebelum, selama, maupun setelah gangguan adalah berbeda.

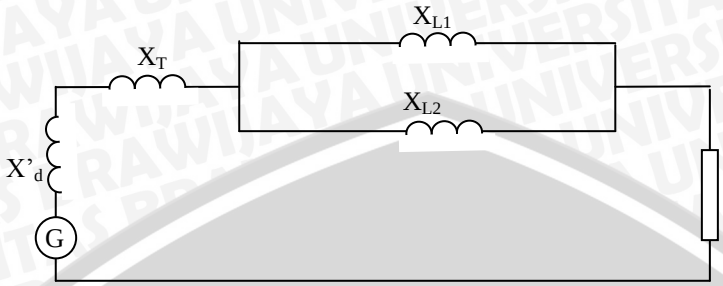


Gambar 2.13 Sistem satu mesin yang dihubungkan ke *infinite bus*, gangguan tiga fasa pada *F*.
(Sumber: Cekmas Cekdin, 2007: 238)

➢ Rangkaian untuk menentukan reaktansi sebelum gangguan yaitu:

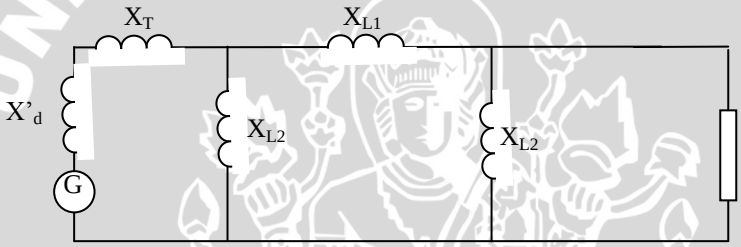
$X_{sebelum\ gangguan} = X'_d + X_T + X_{L1}/2$ (2-50)

Dimana $X_{L1} = X_{L2}$



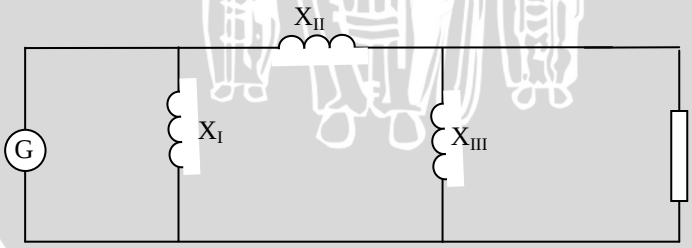
Gambar 2.14 Rangkaian pengganti sebelum terjadinya gangguan
(Sumber: Cekmas Cekdin, 2007: 239)

➢ Rangkaian untuk menentukan reaktansi selama gangguan yaitu:



Gambar 2.15 Rangkaian pengganti selama terjadinya gangguan
(Sumber: Cekmas Cekdin, 2007: 240)

Setelah melalui transformasi Y-Δ, maka didapatkan rangkaian pengganti selama gangguan yaitu seperti yang terlampir pada gambar dibawah ini:

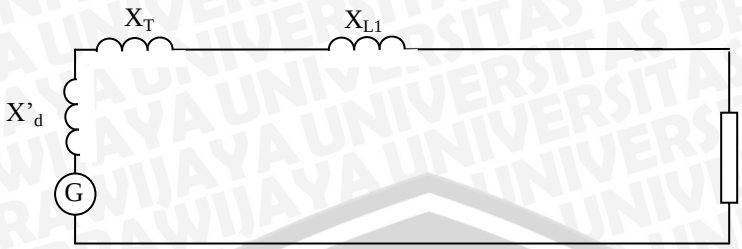


Gambar 2.16 Rangkaian pengganti selama terjadinya gangguan
(Sumber: Cekmas Cekdin, 2007: 242)

Jadi reaktansi selama gangguan ialah:

$X_{sebelum\ gangguan} = X_{II}$ (2-51)

➢ Rangkaian untuk menentukan reaktansi setelah gangguan yaitu:



Gambar 2.17 rangkaian pengganti setelah terjadinya gangguan
(Sumber: Cekmas Cekdin, 2007: 238)

Reaktansi setelah terjadinya gangguan dari gambar diatas yaitu:

$$X_{setelah\ gangguan} = X'_d + X_T + X_{L1} \quad (2\text{-}52)$$

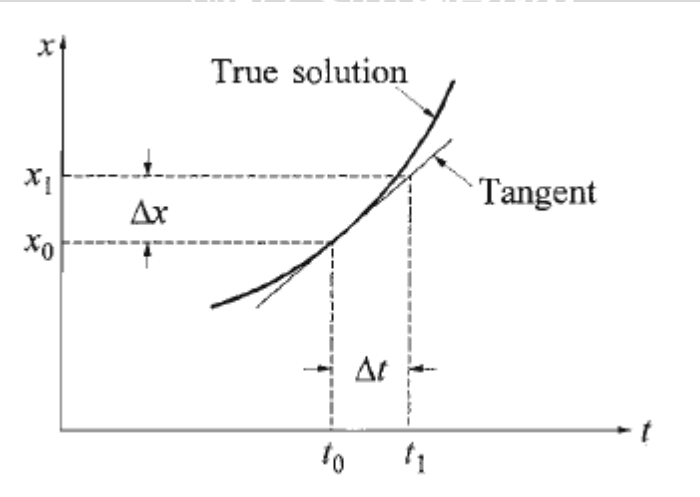
2.3.1.5 Penyelesaian Dengan Persamaan *Differensial Nonlinear*

2.3.1.5.1 Metode *Runge-Kutta*

Pada persamaan differensial orde pertama :

$$\frac{dx}{dt} = f(x,t) \quad (2\text{-}53)$$

Dimana t adalah variabel bebas dan x adalah variabel tak bebas, dengan $x = x_0$ pada $t = t_0$. Gambar 2.18 menunjukkan ilustrasi penerapan prinsip penyelesaian persamaan *differensial* dengan metode *Runge-Kutta*.



Gambar 2.18 Kurva penyelesaian persamaan *differensial*
Sumber : Kundur (1994 : 836)

Merujuk pada persamaan *differensial* orde satu di atas, rumus *Runge-Kutta* orde dua untuk nilai x pada $t = t_0 + \Delta t$ adalah (Kundur, 1994 : 839),

$$x_1 = x_0 + \Delta x = x_0 + \frac{k_1 + k_2}{2} \tag{2-54}$$

Dimana,

$$k_1 = f(x_0, t_0)\,\Delta t$$

$$k_2 = f(x_0 + k_1, t_0 + \Delta t)\,\Delta t$$

Secara umum bentuk persamaan tersebut dituliskan untuk nilai x pada tahap perhitungan $n + 1$ adalah: (Kundur, 1994 : 839)

$$x_{n+1} = x_n + \frac{k_1 + k_2}{2} \tag{2-55}$$

Dimana,

$$k_1 = f(x_n, t_n)\,\Delta t$$

$$k_2 = f(x_n + k_1, t_n + \Delta t)\,\Delta t$$

Pada Metode *Runge-Kutta* orde empat, nilai x pada tahap perhitungan ke $n + 1$ adalah (Kundur, 1994 : 839)

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \tag{2-56}$$

dimana

$$k_1 = f(x_n, t_n)\,\Delta t$$

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right)\Delta t$$

$$k_3 = f\left(x_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right)\Delta t$$

$$k_4 = f(x_n + k_3, t_n + \Delta t)\,\Delta t$$

Metode *Runge-Kutta* orde empat untuk penyelesaian secara simultan dari suatu pesamaan *differensial* dalam bentuk:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y, t)$$

$$\frac{dy}{dt} = f(x, y, t)$$

dengan

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \tag{2-57}$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) \tag{2-58}$$

dimana

$$k_1 = f\,(x_n\,, y_n\,, t_n\,)\,\Delta t$$

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{k_1}{2},\, y_n + \frac{l_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right)\,\Delta t$$

$$k_3 = f\left(x_n + \frac{k_2}{2},\, y_n + \frac{l_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right)\,\Delta t$$

$$k_4 = f\,(x_n + k_3\,, y_n + l_3\,, t_n + \Delta t)\,\Delta t$$

$$l_1 = f\,(x_n\,, y_n\,, t_n\,)\,\Delta t$$

$$l_2 = f\left(x_n + \frac{k_1}{2},\, y_n + \frac{l_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right)\,\Delta t$$

$$l_3 = f\left(x_n + \frac{k_2}{2},\, y_n + \frac{l_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right)\,\Delta t$$

$$l_4 = f\,(x_n + k_3\,, y_n + l_3\,, t_n + \Delta t)\,\Delta t$$

Metode *Runge-Kutta* orde empat seperti yang telah diuraikan akan digunakan untuk menyelesaikan persamaan ayunan.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega}{2H}\,(P_m - P_e)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s$$

dengan melakukan penyesuaian terhadap metode *Runge-Kutta*, maka persamaan ayunan dapat ditulis sebagai :

$$\delta i_{(t+\Delta t)} = \delta i_t + \frac{1}{6}\,(k_{1i} + 2k_{2i} + 2k_{3i} + k_{4i}) \tag{2-59}$$

$$\omega i_{(t+\Delta t)} = \omega i_t + \frac{1}{6}\,(l_{1i} + 2l_{2i} + 2l_{3i} + l_{4i}) \tag{2-60}$$

dengan $i = 1,2,3,\ldots,n$ dimana nilai $\Delta\delta\ dan\ \Delta\omega$ adalah

$$\Delta\delta i_{(t+\Delta t)} = \frac{1}{6}\,(k_{1i} + 2k_{2i} + 2k_{3i} + k_{4i}) \tag{2-61}$$

$$\Delta\omega i_{(t+\Delta t)} = \frac{1}{6}\,(l_{1i} + 2l_{2i} + 2l_{3i} + l_{4i}) \tag{2-62}$$

Nilai k dan l dapat dicari melalui beberapa perkiraaan,

Perkiraan pertama:

$$k_{1i} = (\omega_{1i} - \omega_s)\,\Delta t \tag{2-63}$$

$$l_{1i} = \frac{\omega}{2H}\left(P_{mi} - P_{ei}^{(1)}{}_{(t)}\right)\Delta t \tag{2-64}$$

dengan $i = 1,2,3,\ldots,n$ dan

$P_{ei}^{(1)}$ adalah daya keluaran generator saat sudut daya $\delta_0(t = 0)$

Perkiraan kedua:

$$k_{2i} = \left\{\left(\omega_{(t)} + \frac{l_{1i}}{2}\right) - \omega_s\right\}\Delta t \tag{2-65}$$

$$l_{2i} = \frac{\omega}{2H}\left(P_{mi} - P_{ei}^{(2)}{}_{(t)}\right)\Delta t \tag{2-66}$$

dengan $i = 1,2,3,\ldots,n$ dan

$P_{ei}^{(2)}$ adalah daya keluaran generator saat sudut daya $(\delta_{i(t)} + k_{1i}/2)$

Perkiraan ketiga:

$$k_{3i} = \left\{\left(\omega_{(t)} + \frac{l_{2i}}{2}\right) - \omega_s\right\}\Delta t \tag{2-67}$$

$$l_{3i} = \frac{\omega}{2H}\left(P_{mi} - P_{ei}^{(3)}{}_{(t)}\right)\Delta t \tag{2-68}$$

dengan $i = 1,2,3,\ldots,n$ dan

$P_{ei}^{(3)}$ adalah daya keluaran generator saat sudut daya $(\delta_{i(t)} + k_{2i}/2)$

Perkiraan keempat:

$$k_{4i} = \left\{\left(\omega_{(t)} + \frac{l_{3i}}{2}\right) - \omega_s\right\}\Delta t \tag{2-69}$$

$$l_{4i} = \frac{\omega}{2H}\left(P_{mi} - P_{ei}^{(4)}{}_{(t)}\right)\Delta t \tag{2-70}$$

dengan $i = 1,2,3,\ldots,n$ dan

$P_{ei}^{(4)}$ adalah daya keluaran generator saat sudut daya $(\delta_{i(t)} + k_{3i}/2)$, sehingga diperoleh nilai sudut daya dan kecepatan sudut:

$$\delta i_{(t+\Delta t)} = \delta i_t + \frac{1}{6}\left(k_{1i} + 2k_{2i} + 2k_{3i} + k_{4i}\right) \tag{2-71}$$

$$\omega i_{(t+\Delta t)} = \omega i_t + \frac{1}{6}\left(l_{1i} + 2l_{2i} + 2l_{3i} + l_{4i}\right) \tag{2-72}$$

2.3.2 Stabilitas Tegangan

Kestabilan tegangan adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk selalu siap mempertahankan tegangan yang diterima disetiap bus dalam sistem tersebut saat beroperasi normal dan atau setelah mengalami gangguan. Suatu sistem memasuki situasi ketidakstabilan tegangan ketika terjadi gangguan, meningkatnya permintaan

beban atau perubahan dalam kondisi sistem yang mengakibatkan perubahan yang drastis dan tidak terkontrolnya penurunan tegangan. Penyebab utama ketidakstabilan tegangan adalah ketidakmampuan suatu sistem tenaga untuk memenuhi permintaan daya reaktif. inti dari permasalahannya adalah penurunan tegangan yang terjadi ketika daya aktif dan reaktif mengalir melalui reaktansi induktif yang dihubungkan dengan jaringan transmisi.

Kriteria kestabilan untuk suatu tegangan dapat dipenuhi jika besarnya tegangan pada setiap bus dalam suatu sistem yang sedang beroperasi akan meningkat besarnya seiring dengan meningkatnya injeksi daya reaktif pada bus yang sama. Suatu sistem dikatakan tidak stabil jika dalam sistem tersebut sedikitnya terdapat sebuah bus yang mengalami penurunan besarnya tegangan bersamaan pada saat injeksi daya reaktif diberikan pada bus yang sama. Atau dengan kata lain tegangan suatu sistem stabil jika sensitivitas V-Q nya positif untuk setiap bus, dan menjadi tidak stabil jika sensitivitas V-Q nya negatif setidaknya pada sebuah bus.

2.3.2.1 Model Generator - Beban

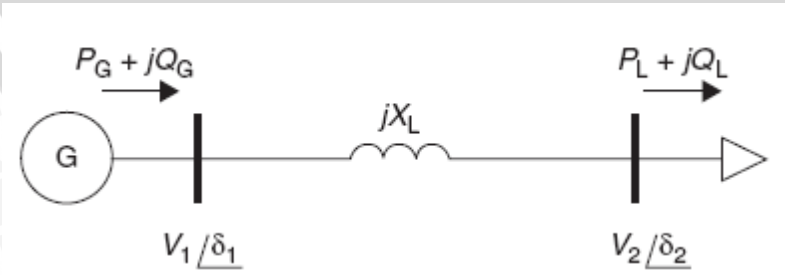
Pada gambar 2.19 ditampilkan model generator-beban secara umum, dimana notasi yang digunakan merujuk pada sisi beban. Dalam gambar tersebut tegangan sumber dinotasikan sebagai V_1 dan tegangan beban sebagai V_2. Aliran daya pada sistem ini dapat diwakili oleh persamaan berikut (Grigsby, 2007 : 10.2):

$$0 = P_L - \frac{V_1 V_2}{X_L} \sin \delta \tag{2-73}$$

dimana

$\delta = \delta_2 - \delta_1 \quad , P_G = P_L$ (tidak ada rugi-rugi)

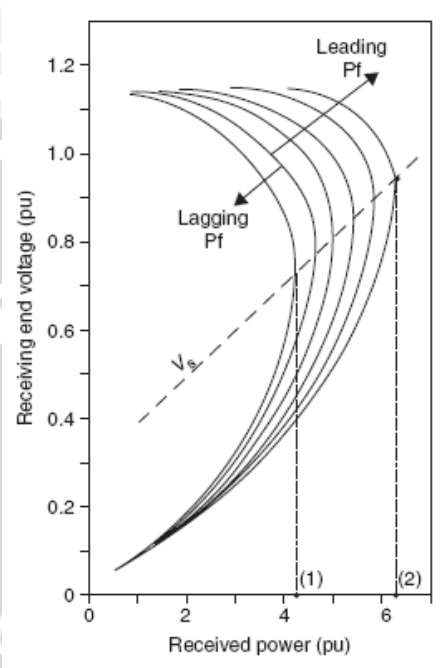
P_L = Daya nyata beban



Gambar 2.19 Contoh hubungan generator-beban

Sumber : Grigsby (2007 : 10.2)

Semua solusi untuk persamaan aliran daya, sebagai sebuah kondisi beban sistem (P_L) yang meningkat, dapat digambarkan untuk menghasilkan kurva PV (tegangan bus fungsi daya aktif beban) atau kurva QV (tegangan bus fungsi daya reaktif beban) untuk sistem ini. Sebagai contoh generator-beban sederhana, perbedaan kurva PV dan QV dapat dihitung berdasarkan pada parameter sistem yang dipilih untuk gambar kurva ini.



Gambar 2.20 Karakteristik P_1V_2
Sumber : Grigsby (2007 : 10.4)

Sebagai contoh, kurva yang ditunjukkan pada Gambar 2.20 didapatkan dengan menjaga tegangan sisi kirim tetap konstan, sedangkan beban di sisi terima pada faktor daya yang bervariasi. Setiap kurva dihitung berdasarkan faktor daya tertentu dan menunjukkan daya maksimum yang dapat dikirim pada faktor daya tertentu, yang juga disebut sebagai *loadability* maksimum sistem. Perhatikan bahwa batas dapat ditingkatkan dengan menyediakan dukungan lebih pada daya reaktif di sisi terima (batas (2) vs batas (1)), yang efektif mendorong faktor daya beban *leading*. Juga harus dicatat bahwa titik pada kurva di bawah garis batas *Vs* menunjukkan perilaku sistem tidak stabil. Ketidakstabilan tegangan biasanya diukur dengan jarak (dalam daya p.u.) antara titik operasi pada kurva PV dan batas dari kurva yang sama, hal ini biasanya disebut sebagai *margin loadability system*.

Peningkatan input daya ke sistem generator-beban adalah:

$$\Delta P_G - \Delta P_D$$

Dimana: $\Delta P_G = \Delta P_t$, penambahan daya keluaran turbin (dengan asumsi kerugian pembangkit diabaikan) dan ΔP_D adalah peningkatan beban.

$$\left(\frac{\partial P_D}{\partial f}\right)\Delta f = B\Delta f \tag{2.74}$$

Dimana, konstanta B dapat ditentukan secara empiris. B adalah positif terutama untuk beban motor.

Persamaan daya yang seimbang, yaitu:

$$\Delta P_G - \Delta P_D = \frac{2HP_r}{f^0}\frac{d}{dt}(\Delta f) + B\Delta f$$

Dalam per-unit yaitu:

$$\Delta P_{G(pu)} - \Delta P_{D(pu)} = \frac{2HP_r}{f^0}\frac{d}{dt}(\Delta f) + B(pu)\Delta f \tag{2.75}$$

Dengan transformasi *Laplace*, kita dapatkan persamaan yaitu:

$$\Delta f_{(s)} = \frac{\Delta P_{G(s)} - \Delta P_{D(s)}}{B + \frac{2H}{f^0}s}$$

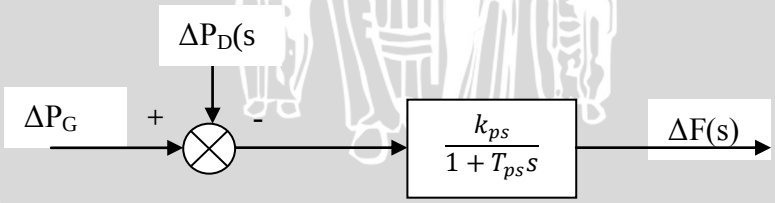
$$= \left[\Delta P_{G(s)} - \Delta P_{D(s)}\right] x \left(\frac{K_{ps}}{1 + T_{ps}s}\right) \tag{2.75}$$

Dimana,

$T_{ps} = \frac{2H}{Bf^o}$ = konstanta waktu sistem daya

$K_{ps} = \frac{1}{B}$ = penguatan sistem daya

Persamaan 2.75 dapat direpresentasikan dalam bentuk blok diagram seperti pada gambar 2.21 dibawah ini.



Gambar 2.21 Representasi Diagram Blok model Generator-Beban
Sumber : Grigsby (2007 : 10.4)

2.3.3 Stabilitas Frekuensi

Stabilitas frekuensi merupakan suatu kemampuan sistem daya untuk menjaga frekuensi tetap stabil dalam kisaran nominal (Grigsby, 2007:7.8):. Hal itu tergantung pada kemampuan untuk mengembalikan keseimbangan antara sistem generator dan beban, dengan rugi-rugi minimal pada beban. Gangguan sistem yang parah umumnya

mengakibatkan perubahan besar terhadap frekuensi, arus aliran daya, tegangan, dan variabel sistem lainnya, sehingga memerlukan tindakan proses, kontrol, dan proteksi yang tidak dimodelkan dalam stabilitas yang konvensional atau studi stabilitas tegangan. Umumnya, masalah stabilitas frekuensi berkaitan dengan ketidakmampuan tanggapan peralatan, koordinasi yang buruk dalam kontrol dan peralatan proteksi, atau cadangan generator/pembangkit tidak mencukupi.

Selama ketidakstabilan frekuensi, waktu karakteristik proses dan perangkat yang diaktifkan oleh pergeseran besar frekuensi dan variabel sistem lainnya akan berkisar pada hitungan detik, sesuai dengan tanggapan dari perangkat seperti kontrol dan proteksi generator, hingga beberapa menit, sesuai dengan tanggapan perangkat seperti sistem penggerak utama pemasok daya dan regulator tegangan beban. Meskipun stabilitas frekuensi dipengaruhi oleh dinamika yang lambat, kerangka waktu keseluruhan meluas hingga beberapa menit.

Secara ringkas stabilitas sinyal kecil dan osilasi sistem daya menunjukkan bahwa sistem daya mengandung banyak mode osilasi akibat berbagai interaksi antar komponen. Banyak osilasi adalah karena rotor generator sinkron berayun relatif satu sama lain. Mode elektromekanis yang melibatkan waktu ini biasanya terjadi pada kisaran frekuensi 0,1-2 Hz. Mode antar wilayah biasanya dikaitkan dengan kelompok mesin yang berayun relatif terhadap kelompok lain melintasi jalur transmisi yang relatif lemah. Mode elektromekanis frekuensi yang lebih tinggi (1-2 Hz) biasanya melibatkan satu atau dua generator yang berayun terhadap seluruh sistem daya atau mesin listrik yang berayun satu sama lain. Transfer daya besar, dapat menimbulkan masalah osilasi antarwilayah yang membatasi sistem operasi. Osilasi mungkin dipicu oleh beberapa peristiwa atau gangguan pada sistem daya atau dengan menggeser titik sistem operasi di beberapa batas stabilitas *steady-state*, dimana osilasi dapat tumbuh secara spontan. Osilasi dapat bertahan selama beberapa menit dan terbatas dalam amplitudo pada sistem nonlinier.

2.4 Persamaan Dalam Studi Stabilitas

2.4.1 Persamaan Kondisi *Steady-State*

Pada Gambar 2.22 menampilkan diagram fasor fluksi dan tegangan pada mesin sinkron rotor silindris. Fluksi medan F_f sebanding dengan arus medan I_f. Tegangan terminal stator untuk rangkaian hubung-buka E_i sebanding dengan F_f yang berada pada

sumbu *quadrature*. Tegangan E_i juga sebanding dengan tegangan medan yang diterapkan dan direferensikan sebagai E_f.

Saat mesin sikron dibebani, fluksi F sebanding dengan arus stator yang ditimbulkan, penjumlahan secara vector fluksi F_f memberikan sebuah nilai fluksi efektif F_e. Tegangan efektif stator E_l memiliki kaitan dengan F_e dan tertinggal 90°. Tegangan terminal V_d dan V_q diperoleh dari tegangan E_l melalui pertimbangan jatuh tegangan karena adanya reaktansi X_l dan resistansi jangkar R_a. Perbedaan antara E_f dan E_l adalah pada fasa dengan jatuh tegangan pada $|X|$ dan sebanding dengan I. oleh karena itu, perbedaan tegangan dapat dikatakan sebagai jatuh tegangan pada reaktansi jangkar X_a. Jumlah antara X_l dan X_a disebut reaktansi sinkron (Arrilaga, 1990 : 159-160):

$$X_d = X_l + X_{a_d} \tag{2-76}$$

$$X_q = X_l + X_{a_q} \tag{2-77}$$

$$E_i - V_q = R_a I_q - X_d I_d \tag{2-78}$$

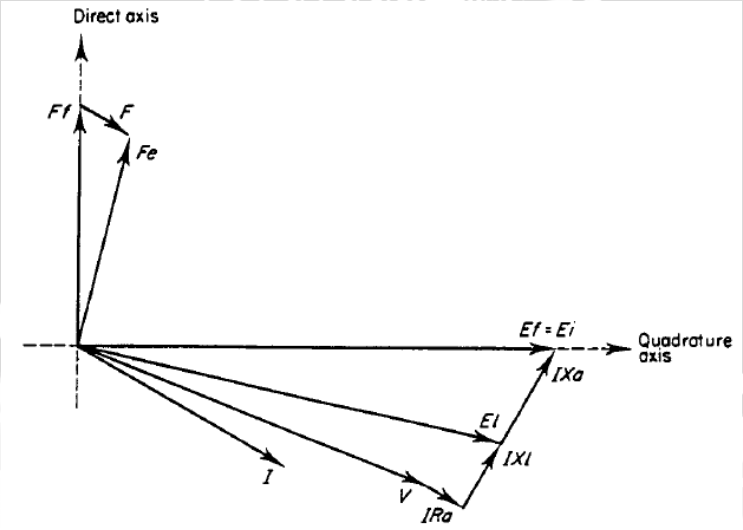
$$-V_d = R_a I_d + X_d I_d \tag{2-79}$$

dimana : X_d : reaktansi sumbu *direct*

X_q : reaktansi sumbu *quadrature*

I_d : arus jangkar sumbu *direct*

I_q : arus jangkar sumbu *quadrature*



Gambar 2.22 Diagram fasor mesin sinkron rotor silindris pada keadaan mantap

Sumber: Arrillaga (1990 : 159)

2.4.2 Persamaan Peralihan (*Transient*)

Untuk perubahan yang lebih cepat pada kondisi *eksternal* mesin sinkron, model di atas tidak lagi sesuai. Karena perubahan inersia gandengan fluks tidak tercermin di dalam model tersebut. Oleh karena itu, diperlukan suatu tegangan peralihan yang baru yaitu E'_d dan E'_q yang mewakili gandengan fluks pada kumparan rotor. Tegangan peralihan ini dapat ditunjukkan melalui adanya reaktansi peralihan generator sinkron yaitu X'_d dan X'_q (Arrilaga, 1990 : 160):

$$E_q^{'} - V_q = R_a I_q - X_d^{'} I_d \tag{2-80}$$

$$E_d^{'} - V_d = R_a I_d + X_q^{'} I_q \tag{2-81}$$

dimana : E'_d : tegangan peralihan sumbu *direct*

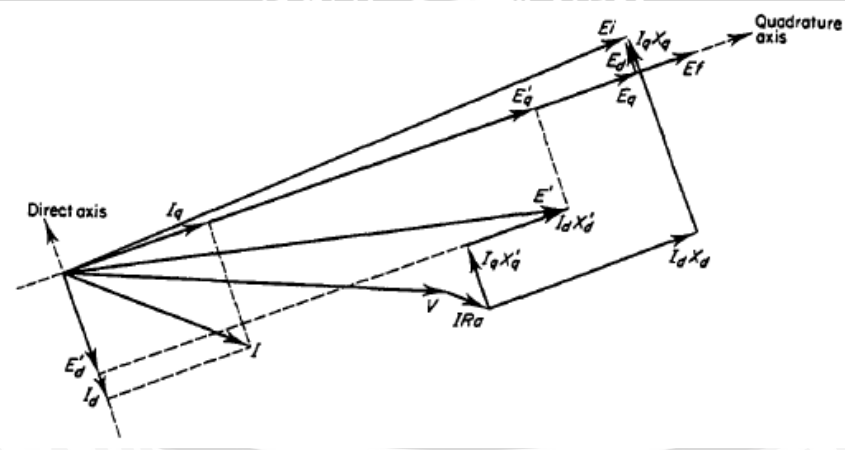
E'_q : tegangan peralihan sumbu *quadrature*

X'_d : reaktansi peralihan sumbu *direct*

X'_q : reaktansi peralihan sumbu *quadrature*

Sekarang tegangan E_i harus dianggap sebagai jumlah dari dua tegangan E_d dan E_q dan merupakan tegangan di belakang reaktansi sinkron. Pada bagian sebelumnya, dimana untuk keadaan mantap, arus mengalir hanya dalam kumparan medan sehingga dalam kasus tersebut $E_d = 0$ dan $E_q = E_i$

Diagram fasor untuk operasi mesin pada kondisi peralihan ditunjukkan pada gambar 2.23 berikut:



Gambar 2.23 Diagram fasor mesin sinkron pada keadaan peralihan

Sumber: Arrillaga (1990 : 161)

2.4.3 Persamaan Sub-peralihan (Dinamik)

Kondisi sub-peralihan dapat disebut juga sebagai kondisi dinamik. Dalam kondisi sub-peralihan generator, kasus kumparan peredam (*damper windings*) ataupun rangkaian lain yang terdapat dalam rotor, diperlukan jika pemodelan yang lebih tepat diperlukan. Reaktansi dan konstanta waktu yang dilibatkan kecil dan sering kali diabaikan. Dalam hal ini, diperlukan suatu tegangan sub-peralihan yang baru yaitu E''_d dan E''_q. Tegangan peralihan ini dapat ditunjukkan melalui adanya reaktansi sub-peralihan generator sinkron yaitu X''_d dan X''_q. Jika diperlukan, pengembangan dari persamaan ini identik dengan suatu kondisi sub-peralihan generator sinkron dan menghasilkan (Arrilaga, 1990 : 161):

$$E''_q - V_q = R_a I_q - X''_d I_d \tag{2-82}$$

$$E''_d - V_d = R_a I_d + X''_q I_q \tag{2-83}$$

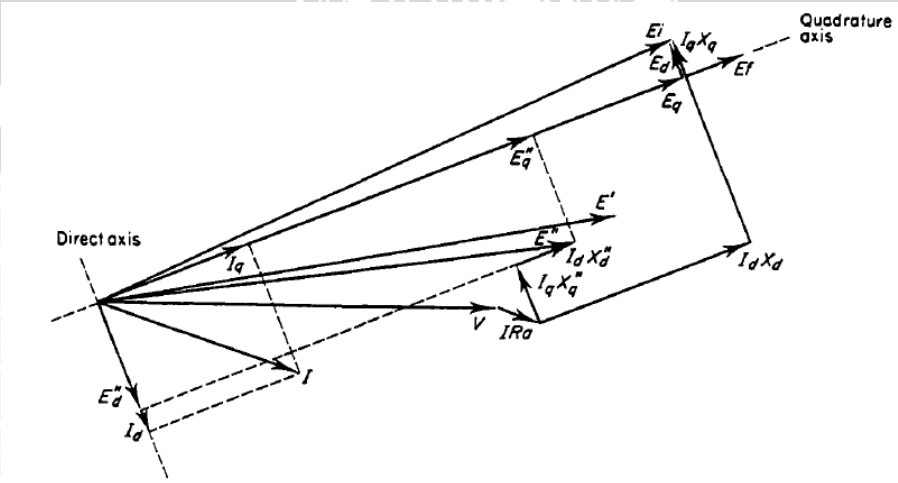
dimana : E''_d : tegangan sub-peralihan sumbu *direct*

E''_q : tegangan sub-peralihan sumbu *quadrature*

X''_d : reaktansi sub-peralihan sumbu *direct*

X''_q : reaktansi sub-peralihan sumbu *quadrature*

Persamaan tersebut dikembangkan dengan sebuah asumsi bahwa konstanta waktu peralihan lebih besar jika dibandingkan dengan konstanta waktu sub-peralihan. Diagram fasor dari mesin sinkron pada kondisi sub-peralihan ditunjukkan pada Gambar 2.24. Perlu dicatat bahwa Persamaan (2-82) dan (2-83) hanya pada kondisi operasi keadaaan mantap.



Gambar 2.24 Diagram fasor mesin sinkron pada keadaan sub-peralihan
Sumber: Arrillaga (1990 : 162)

2.5 Unit Pembangkitan

2.5.1 Generator Sinkron

Generator sinkron dapat dibagi atas dua (2) macam yaitu generator dengan kecepatan tinggi, (*Turbo-Generator*), atau generator kecepatan rendah. *Turbo-Generator* memiliki dua atau empat kutub sehingga di sistem 50 Hz generator akan digerakkan pada kecepatan 3000 atau 1500 rpm. Sebaliknya, generator kecepatan rendah biasanya beroperasi pada 500 rpm dan di bawahnya, memiliki jumlah kutub yang cukup banyak, diameter yang besar dan panjang aksial lebih pendek. Jumlah kutub magnet yang diperlukan tergantung pada kecepatan dan frekuensi nominal dari sistem daya.

Generator memiliki dua bagian magnet utama disebut stator dan rotor. Kumparan jangkar, menyuplai arus beban ke sistem, ditempatkan pada alur yang berjarak sama pada permukaan bagian dalam stator dan terdiri dari tiga belitan fasa yang identik (untuk generator 3 fasa). Rotor pada generator berkecepatan tinggi berisi alur untuk eksitasi *DC* sementara untuk kumparan eksitasi generator dengan kecepatan rendah memiliki rotor dengan kutub menonjol.

Arus *DC* dialiri ke belitan eksitasi untuk menghasilkan fluks magnetik dengan daya yang sebanding dengan arus eksitasi. Fluks magnet berputar kemudian menginduksi pada setiap kumparan fasa stator yang menghasilkan gaya gerak listrik (ggl) pada kumparan tiga fasa yang mengakibatkan arus *AC* mengalir menuju ke sistem daya yang dalam keadaan berbeban.

Efek arus *AC* yang mengalir pada kumparan jangkar adalah timbulnya sebuah fluksi magnetik berputar sesuai dengan kecepatan putaran rotor. Fluks eksitasi dan fluks jangkar kemudian menghasilkan resultan fluks yang stasioner dengan rotor tetapi berputar di kecepatan sinkron.

2.5.2 Sistem Eksitasi dan *AVR (Automatic Voltage Regulator)*

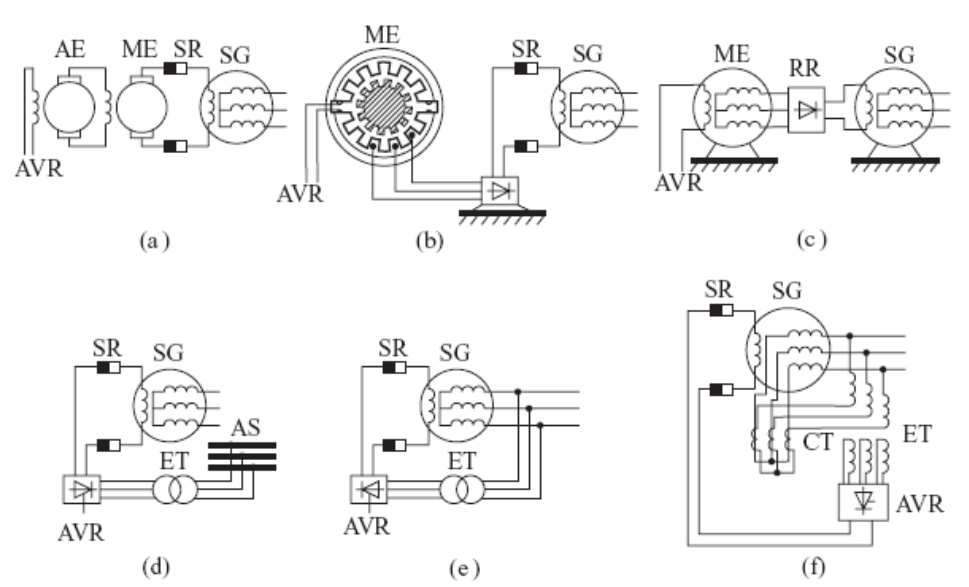
Eksitasi pada generator terbagi atas dua (2) bagian yaitu *Exciter* dan *Automatic Voltage Control* (*AVR)* yang diperlukan untuk memasok sebuah generator utama dengan arus DC. Daya dari *exciter* memiliki kisaran 0,2-0,8% dari *rating* megawatt generator (Machowski: 2008).

2.5.2.1 Sistem Eksitasi

Eksitasi yang umum digunakan dalam sebuah generator terdapat beberapa tipe mulai yang menggunakan generator *DC* sampai yang tipe modern dengan menggunakan

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

SCR sebagai penyearah untuk menghasilkan daya *AC*. Umumnya, sistem eksitasi diklasifikasikan dalam dua jenis yaitu eksitasi berputar dan statis. Pada gambar 2.25 menunjukkan beberapa tipe sistem eksitasi. Eksitasi yang berputar ditunjukkan pada gambar 2.25a-c, arus eksitasi disuplai melalui generator DC ataupun generator AC dengan penyearah. Generator DC biasanya memiliki rating daya yang kecil, yang disusun kaskade untuk memperoleh keluaran yang diperlukan, lihat gambar 2.25a. Karena permasalahan komutasi pada generator DC, eksitasi tipe ini tidak dapat digunakan pada generator besar yang memerlukan arus eksitasi yang besar juga.



Gambar 2.25 Tipe-tipe sistem eksitasi (a) generator DC kaskade; (b) Mesin reluktansi dengan penyearah; (c) mesin sinkron dengan penyearah berotasi; (d) Penyearah terkontrol dari suplai tambahan; (e) Penyarah terkontrol dari terminal generator; (f) Penyearah terkontrol dari tegangan dan arus generator.
(Sumber : Machowski (2008:22)

Keterangan :
SG : Synchronous Generator;
ME : Main Exciter;
RR : Rotating Rectifier;
AS : Auxiliary Service busbars;
AVR : Automatic Voltage Regulator.
SR : Slip Ring;
AE : Auxiliary Exciter;
ET : Excitation Transformer;
CT : Current Transformer;

Pada gambar 2.53c, *Exciter* tidak dilengkapi dengan *slip-ring* maupun *komutator*. Sumber eksitasi jenis ini adalah sebuah mesin sinkron dengan kumparan medan di stator dan kumparan jangkarnya di rotor. Arus yang dihasilkan disearahkan menggunakan diode, yang mana diode ini juga berputar mengikuti rotor, dan secara langsung menyalurkan arus menuju kumparan medan generator utama. Satu keterbatasan *exciter* tipe ini ialah arus yang yang disuplai ke generator utama hanya dapat diatur secara tidak langsung melalui pengaturan medan *exciter*. Sebuah solusi

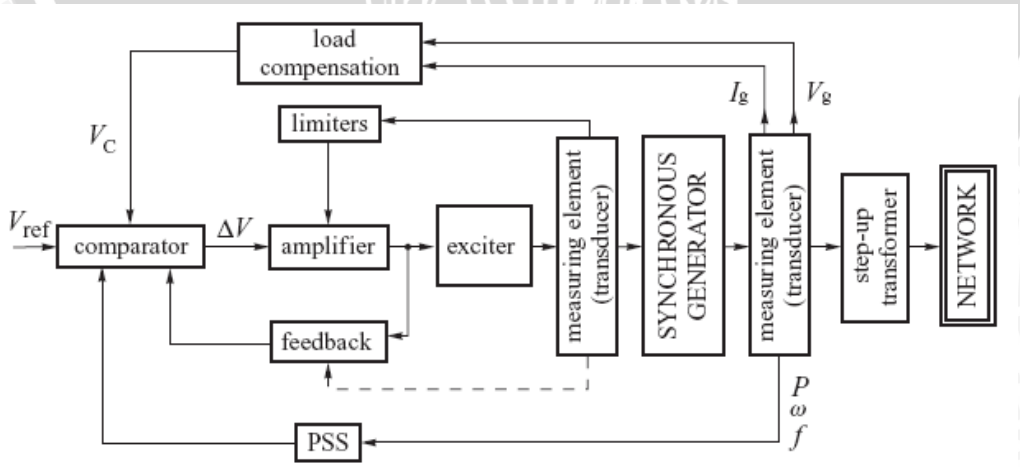
untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan menggunakan *rotating thyristor*, yang lebih baik daripada diode dan pengaturan keluaran *exciter* dapat dilakukan melalui sudut penyalaan *thyristor*. Namun, pengaturan sudut penyalaan pada *rotating thyristor* bukanlah sesuatu yang mudah dilakukan.

Beberapa alternatif sistem penguatan menggunakan penyearah statis dapat ditunjukkan pada gambar 2.25d-f. Pada *exciter* tersebut penyearah thyristor diatur secara langsung melalui regulator tegangan.

2.5.2.2 Kontrol *AVR* (*Automatic Voltage Regulator*)

AVR mengatur tegangan terminal generator dengan mengendalikan jumlah arus yang disupplai ke kumparan medan generator oleh *exciter*. Pada gambar 2.26 dibawah ini ditunjukan Diagram blok umum dari subsistem *AVR*. Elemen pengukur dapat merasakan arus, daya, tegangan terminal dan frekuensi generator. Pengukuran tegangan terminal generator V_g diimbangi oleh arus beban I_g dan dibandingkan dengan tegangan referensi yang diinginkan V_{ref} untuk menghasilkan kesalahan tegangan *V*. *Error* ini kemudian diperkuat dan digunakan untuk mengubah *output exciter*, akibatnya arus medan generator, agar *error* tegangan dapat dikurangi. Ini merupakan sistem kontrol loop tertutup. Proses regulasi distabilkan menggunakan loop umpan balik negatif yang diambil langsung baik dari penguat ataupun *exciter*.

Kontrol *AVR* memiliki fungsi mempertahankan nilai tegangan terminal generator pada tingkatan yang telah ditentukan. Sistem AVR terdiri dari empat (4) komponen utama seperti yang diperlihatkan pada gambar di bawah ini, adapun komponen terseut yaitu: *Amplifier, Exciter, Generator* dan *Sensor (Hadi Saadat, 1999).*



Gambar 2.26 Diagram blok sistem eksitasi dan AVR
Sumber : Machowski (2008 : 23)

1. ***Amplifier* / Penguatan**

Amplifier/penguatan dari sistem eksitasi merupakan penguatan magnetik, penguatan putaran atau penguatan elektronik moderen.

2. ***Exciter* / Eksitasi**

Eksitasi yang umum digunakan dalam sebuah generator terdapat beberapa tipe mulai yang menggunakan generator *DC* sampai yang tipe modern dengan menggunakan *SCR* sebagai penyearah untuk menghasilkan daya *AC*.

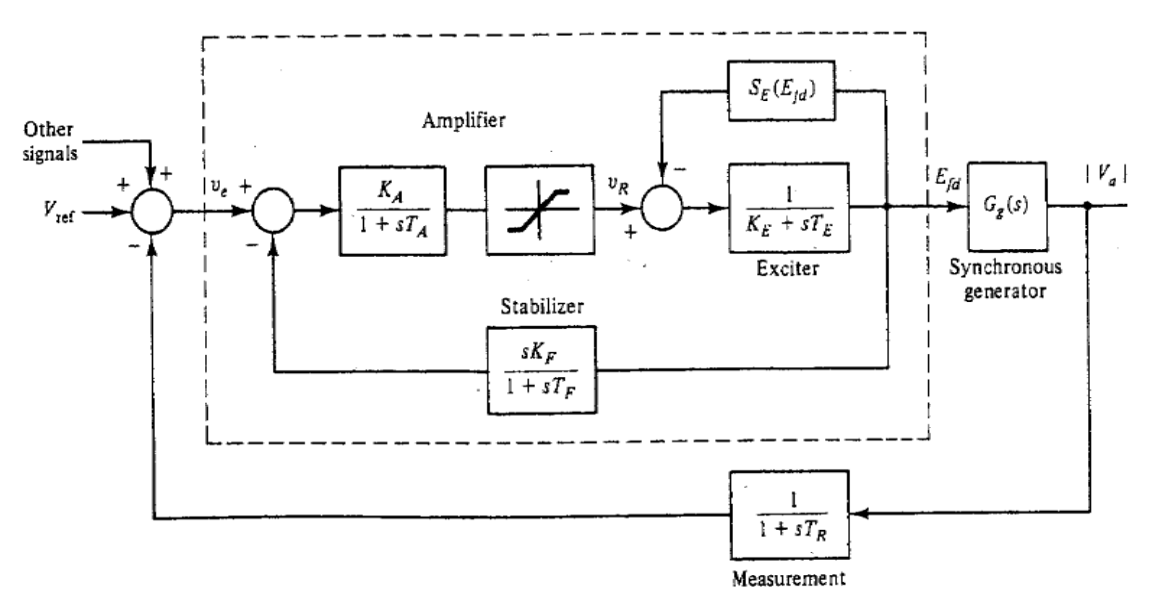
Sebuah model yang layak dari eksitasi moderen adalah model yang *linier*, yang mana diambil untuk menghitung konstanta waktu yang besar dan mengabaikan saturasi atau *non-linier* lainnya.

3. **Generator**

Tegangan terminal sebuah generator sangat tergantung pada bebannya. Dalam bentuk linier *(in the model linearized)*, hubungan fungsi transfer tegangan terminal generator dengan tegangan medannya dapat dipresentasekan dengan sebuah *gain* K_g dan sebuah konstanta waktu τ_G.

4. ***Sensor***

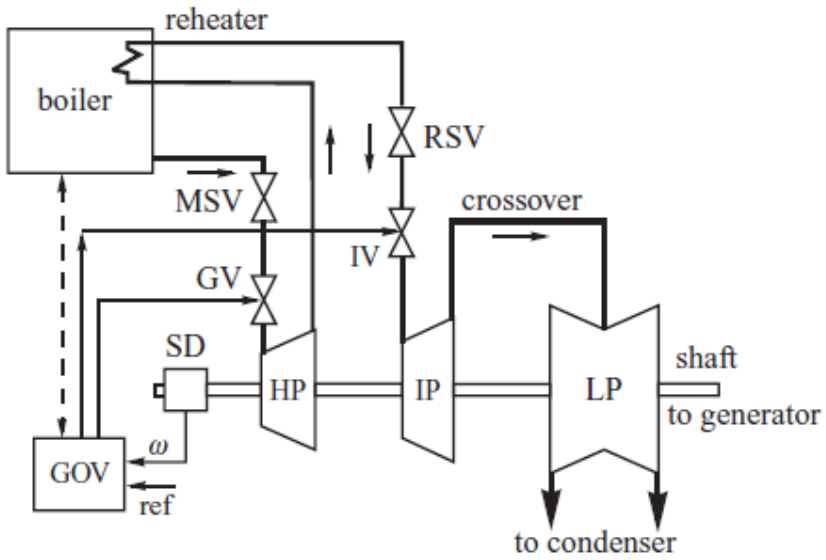
Tegangan yang dilewatkan pada sebuah transformator tegangan dan disearahkan lewat sebuah *bridge-rectifier*.



Gambar 2.27 Diagram kontrol AVR
Sumber : Milano (2010 : 365)

2.6. Turbin

Turbin dapat diklasifikasikan menjadi *non-reheat, single-reheat or double-reheat systems*. Turbin *non-reheat* memiliki satu tahap turbin dan biasanya dibangun untuk digunakan pada unit di bawah 100 MW. Konfigurasi turbin yang paling umum digunakan untuk turbin uap besar adalah pengaturan tandem tunggal reheat yang ditunjukkan dalam gambar 2.28.

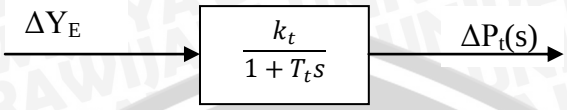


Gambar 2.28 Konfigurasi turbin uap *Tandem Compound Single-Reheat Turbine*..
Sumber : Machowski (2008 : 26)

Dalam pengaturan ini turbin memiliki tiga bagian: *High-Pressure* (HP), *Intermediate-Pressure* (IP) dan *Low-Pressure* (LP) tahap. Uap meninggalkan boiler dan memasuki dada uap dan mengalir melalui *Main Emergency Stop Valve* (MSV) dan kontrol *Governor Valve* (GV) ke *Turbine HP*. Setelah ekspansi parsial, uap diarahkan kembali ke ketel untuk dipanaskan dalam *Heat-Exchanger* untuk meningkatkan entalpinya. Uap kemudian mengalir melalui *Reheat Emergency Stop Valve* (RSV) dan *Intercept Control Valve* (IV) ke turbin IP di mana ia kembali lagi diperluas dan dibuat untuk bekerja. Saat meninggalkan tahap IP, uap mengalir melalui pipa *crossover* untuk ekspansi akhir dalam turbin LP. Akhirnya uap mengalir ke kondensor untuk menyelesaikan siklus. Biasanya tahap turbin individu berkontribusi terhadap torsi turbin total dalam rasio 30% (HP): 40% (IP): 30% (LP).

Aliran uap di turbin dikontrol oleh *Governing System* (GOV). Ketika generator sinkron, *Emergency Stop Valves* tetap terbuka penuh dan kecepatan turbin serta daya diatur dengan mengendalikan posisi GV dan IV. Kecepatan sinyal governor disediakan oleh alat pengukur kecepatan (SD). Penguat utama dari *Governing System* dan penggerak katup adalah *servomotor* minyak yang dikendalikan oleh *Pilot Valve*. Ketika generator disinkronkan, *Emergency Stop Valves* hanya digunakan untuk menghentikan generator dalam kondisi darurat, meskipun mereka sering digunakan untuk mengontrol awal start-up dari turbin.

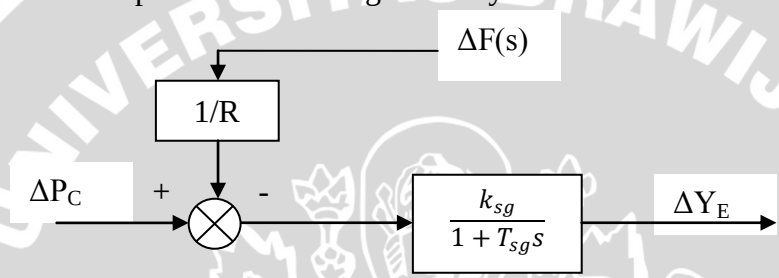
Dalam memudahkan analisis akan diasumsikan bahwa turbin dapat dimodelkan memiliki waktu ekuivalen tunggal konstan. Gambar 8.4b menunjukkan model fungsi transfer dari sebuah turbin uap. Biasanya konstan waktu T_t terletak pada kisaran 0,2-2,5 sec.



Gambar 2.29. Blok Diagram Turbin

2.7 Model Governor

Dibawah ini merupakan model dari governor yaitu:



Gambar 2.30. Blok Diagram sistem kecepatan governor

Dimana:

$$\Delta Y_C(s) = -k_1 k_C \Delta P_C(s) + k_2 \Delta F(s) \quad (2\text{-}92)$$

$$\Delta Y_D(s) = k_3 \Delta Y_C(s) + k_4 \Delta Y_E(s) \quad (2\text{-}93)$$

$$\Delta Y_E(s) = -k_5 \frac{1}{s} \Delta Y_D(s) \quad (2\text{-}94)$$

Eliminasi ΔY_C (s) dan ΔY_D (s), sehingga menjadi:

$$\Delta Y_E(s) = \frac{k_1 k_3 k_C \Delta P_C(s) - k_2 k_3 \Delta F(s)}{\left(k_4 + \frac{s}{k_5}\right)}$$

$$= \left[\Delta P_C(s) - \frac{1}{R}\Delta F(s)\right] x \frac{K_{sg}}{1+T_{sg}S} \quad (2\text{-}95)$$

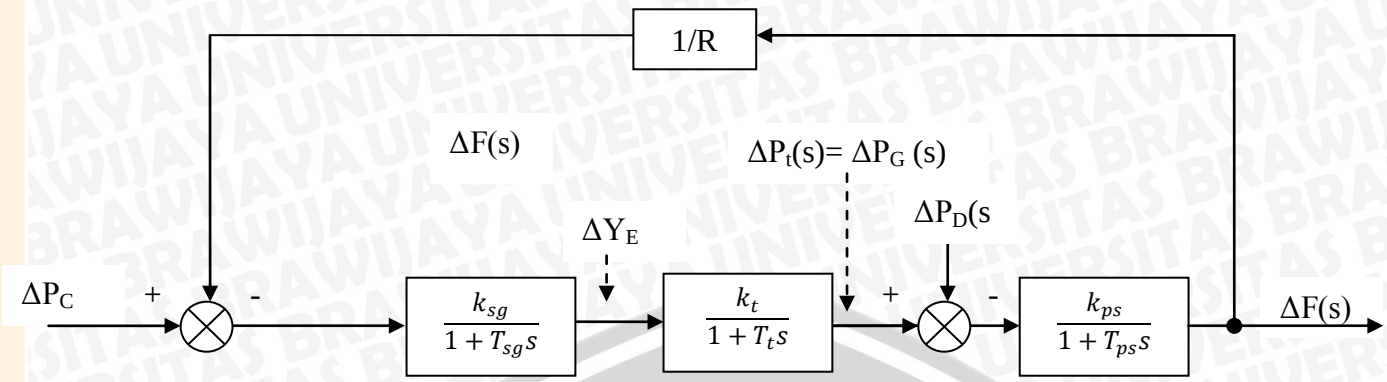
Dimana,

$R = \frac{k_1 k_C}{k_2}$ = kecepatan regulasi governor

$k_{sg} = \frac{k_1 k_3 k_C}{k_4}$ = penguatan dari kecepatan governor

$T_{sg} = \frac{1}{k_4 k_5}$ = waktu konstant dari kecepatan governor

Persamaan 8.8 dapat direpresentasikan dalam bentuk blok diagram seperti pada gambar 2.30.



Gambar 2.31 Diagram Blok Lengkap Kontrol Frekuensi-Beban

2.8 Kontrol Frekuensi-Beban

2.8.1 Analisis *Steady-State*

Model pada gambar 2.30 menunjukkan bahwa terdapat dua (2) masukan tambahan penting dalam sistem kontrol frekuensi beban yaitu:

ΔPc : perubahan pada pengaturan kecepatan

ΔP_D : perubahan permintaan beban.

Dalam operasi kondisi mapan di frekuensi sistem ketika perubahan dari beban dengan sejumlah ΔPd $\left(\Delta P_D(s) = \frac{\Delta P_D}{s}\right)$ maka diketahui bahwa:

$$\Delta F(s)|_{\Delta PC\,(s)=0} = -\frac{K_{ps}}{(1+T_{ps}s)+\frac{K_{sg}K_tK_{ps}/R}{(1+T_{ps}s)+(1+T_ts)}} x \frac{\Delta P_D}{s} \quad (2\text{-}96)$$

$$\Delta f|_{\Delta Pc=0} = s\Delta F(s)|_{\Delta Pc(s)=0}$$

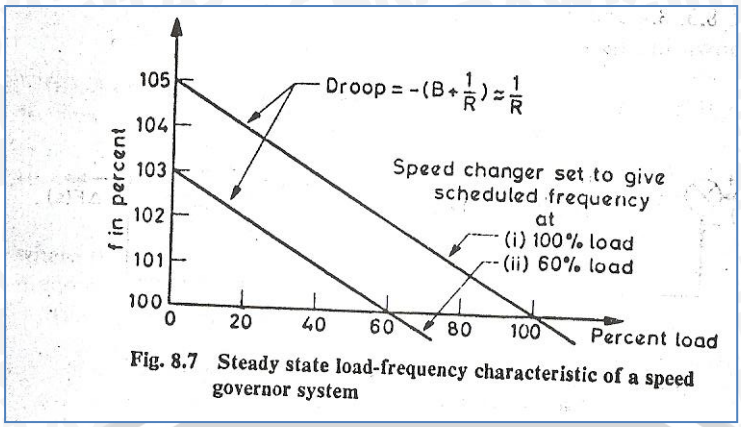
$$= -\left(\frac{K_{ps}}{(1+K_{sg}K_tK_{ps}/R}\right)\Delta P_D \quad (2\text{-}97)$$

Ketika penguatan K_t adalah tetap untuk turbin, K_{ps} adalah tetap untuk sistem daya, K_{sg}, adalah kecepatan gain governor, maka K_{sg} :

$$K_{sg}K_t \cong 1$$

Diketahui bahwa K_{ps} = 1/B, di mana $B = \frac{\partial P_D}{\partial f}\Big| P_r$ (dalam pu MW/unit perubahan frekuensi)

$$\Delta f = -\left(\frac{1}{B+(\frac{1}{R})}\right)\Delta P_D\,, \quad (2\text{-}98)$$



Gambar 2.32 Karakteristik Kondisi Mapan (*Steady-State*) Frekuensi-Beban Pada Sistem Governor

Dimana

$$\Delta f = -R(\Delta P_D) \tag{2-99}$$

Dari blok diagram pada gambar 2.31 diketahui bahwa ($K_{sg}K_t \cong 1$) :

$$\Delta P_G = -\frac{1}{R}\Delta f = \left(\frac{1}{BR+1}\right)\Delta P_D$$

$$\Delta P_G = 0.971\Delta P_D$$

2.8.2 Respon Dinamik

Untuk mendapatkan respon dinamik, langkah pertama yang harus dilakukan ialah mendapatkan persamaan *Invers Laplace* dari persamaan (8.14)

$$\Delta F(s)|_{\Delta PC\,(s)=0} = -\frac{K_{ps}}{(1+T_{ps}s)+\frac{K_{sg}K_tK_{ps}/R}{(1+T_{ps}s)+(1+T_ts)}}\,x\,\frac{\Delta P_D}{s} \tag{2-100}$$

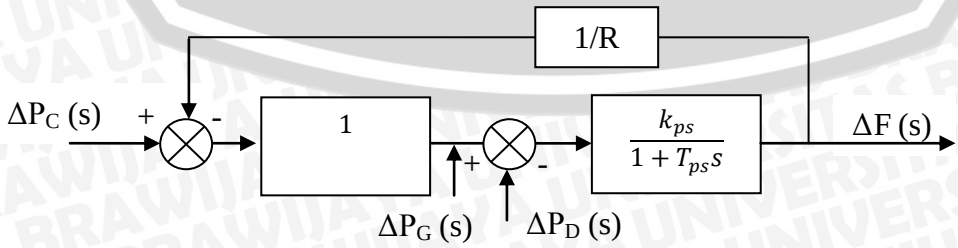
Dari persamaan diatas didapatkan invers transformasi *Laplace* yaitu:

$$\Delta f(t) = -\frac{RK_{ps}}{R+K_{ps}}\left[1 - e^{-\frac{t}{Tps}}\left(\frac{R}{R+K_{ps}}\right)\right]\Delta P_D \tag{2-101}$$

Nilai umum dari konstanta waktu pada sistem kontrol frekuensi-beban berkaitan dengan:

$$T_{sg} < T_t \ll T_{ps}$$

Dimana umumnya, T_{sg}= 0.4 sec, T_t = 0.5 sec, dan T_{ps} = 20 sec



Gambar 2.33 Blok Diagram Orde Pertama Kontrol Frekuensi-Beban pada Area Terpisah

2.8.3 Kontrol Frekuensi-Beban Dua Area

Dibawah ini menggambarkan interkoneksi antar dua area yang dihubungkan oleh *tie line*. Asumsikan resistansi pada saluran penghubung (*tie line*) diabaikan.

Gambar 2.34 Interkoneksi Dua (2) Area

Persamaaan aliran daya pada jaring dari area 1 ke area 2 yaitu:

$$P_{tie} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} sin(\delta_1 - \delta_2)$$

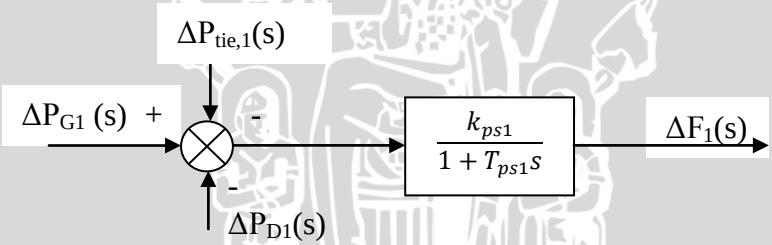
Dimana, δ_1, δ_2 adalah sudut daya mesin antar dua area

Linierisasi pada titik operasi awal dipresentasikan oleh δ_1 dan δ_2. Dimana

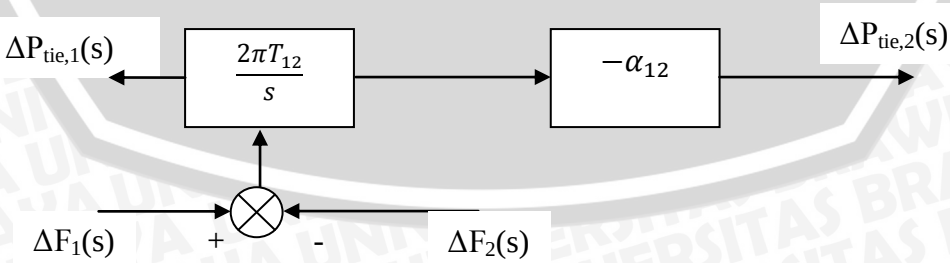
$$\Delta P_{tie}(pu) = T_{12}(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2)$$

Dimana T adalah koefisien torsi sinkronisasi, sehingga T diketahui yaitu:

$$T_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} cos(\delta_1 - \delta_2)$$



Gambar 2.35 Diagram Blok Satu (1) Area



Gambar 2.36 Diagram Blok Dua (2) Area

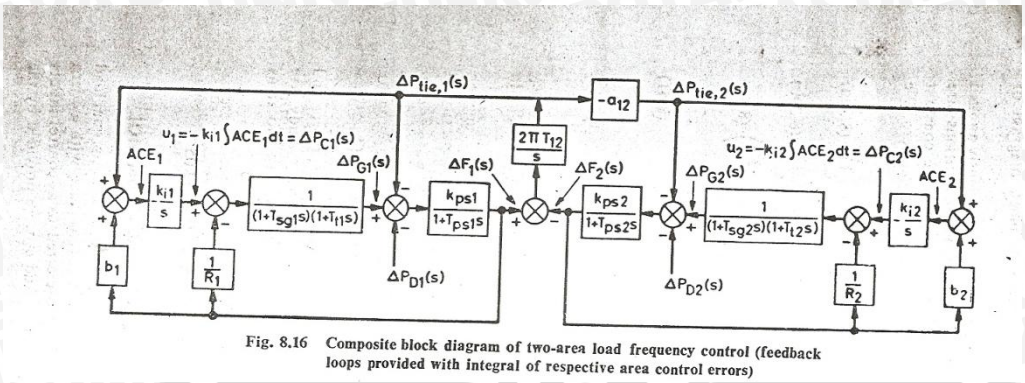


Fig. 8.16 Composite block diagram of two-area load frequency control (feedback loops provided with integral of respective area control errors)

Gambar 2.37 Diagram Blok Kontrol Frekuensi-Beban Dua (2) Area

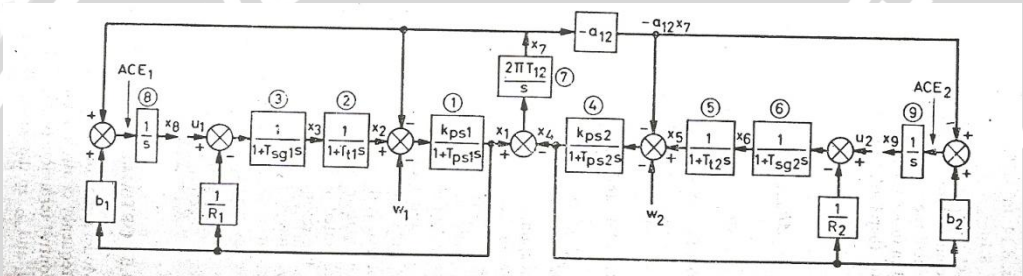


Fig. 8.17 State space model of two-area system

Gambar 2.38 Model Dua (2) Area

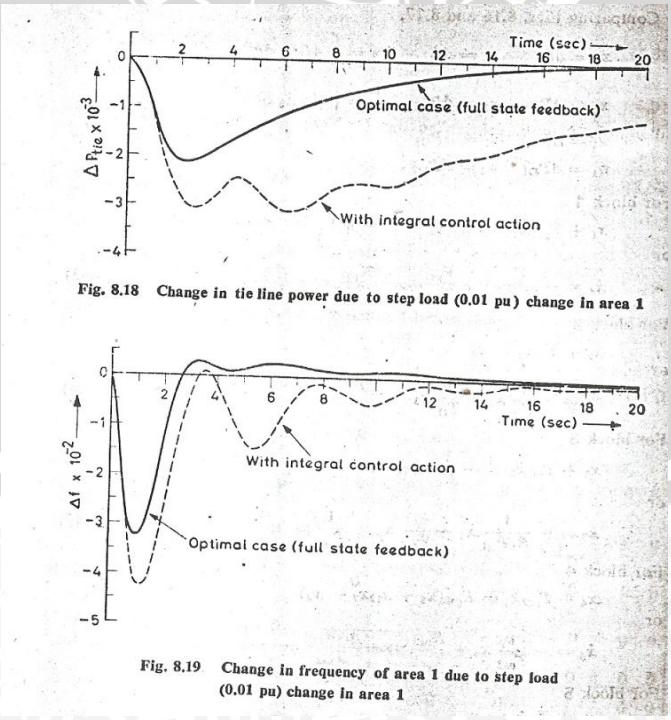


Fig. 8.18 Change in tie line power due to step load (0.01 pu) change in area 1

Fig. 8.19 Change in frequency of area 1 due to step load (0.01 pu) change in area 1

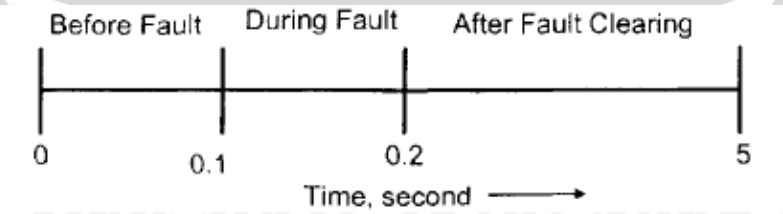
Gambar 2.39 Perubahan Daya dan Frekuensi Area 1

2.9 Program Komputer Digital untuk Studi Stabilitas

Program komputer digital masa kini untuk studi stabilitas telah berkembang dari dua kebutuhan dasar, yaitu (a) keperluan untuk mempelajari sistem yang sangat besar yang saling berhubungan dengan jumlah mesin yang sangat banyak dan (b) kebutuhan untuk melukiskan mesin dan sistem pengaturannya berkaitan dengan model yang lebih terperinci. Representasi mesin secara klasik memang sesuai untuk banyak studi. Tetapi, model yang lebih lengkap dan terperinci mungkin diperlukan untuk mewakili alternator turbo modern dengan karakteristik dinamis yang ditentukan oleh berbagai kemajuan teknologi dalam rancangan mesin dan sistem pengaturannya.

Model mesin sinkron yang paling sederhana ialah model yang digunakan dalam studi-studi stabilitas klasik. Model mesin dua (2) sumbu yang lebih memberikan kondisi fluks sumbu *direct* dan sumbu *quadrature* selama periode sub-peralihan dan peralihan yang mengikuti gangguan sistem. Misalnya, bila model mesin tidak dengan khusus dan jelas memberikan gandengan fluks yang berubah-ubah dari kumparan medan pada sumbu *direct*, adalah tidak mungkin untuk merepresentasikan bekerjanya regulator tegangan dan sistem penguatan yang bekerja secara kontinyu dan otomatis dan melengkapi semua mesin modern. Sistem pengaturan turbin, yang secara otomatis mengatur masukan daya mekanis ke unit pembangkit, juga memiliki karakteristik tanggapan dinamis yang dapat mempengaruhi dinamika rotor. Bila susunan pengaturan ini harus direpresentasikan juga, model unit pembangkit harus diperluas lebih lanjut. Model generator yang lebih rumit menimbulkan persamaan differnsial dan aljabar yang lebih banyak jumlahnya untuk setiap mesin. Dalam studi sistem yang besar, banyak generator yang saling dihubungkan dengan pusat beban yang tersebar luas oleh sistem transmisi yang luas pula, yang perilakunya juga harus dinyatakan oleh sejumlah besar persamaan aljabar.

Dalam melakukan analisis terhadap stabilitas terdapat suatu tipe waktu simulasi yang dapat ditunjukkan pada Gambar 2.40. berikut :



Gambar 2.40 Estimasi waktu gangguan pada analisis stabilitas
Sumber : Natarajan (2002 : 5.24)

2.10 Dua (2) Komponen yang Mempengaruhi Stabilitas Peralihan

Terdapat beberapa komponen yang berfungsi sebagai kriteria penunjuk bagi stabilitas relatif suatu unit pembangkit dalam sistem daya. Faktor tersebut adalah ayunan sudut mesin selama maupun setelah terjadinya gangguan dan waktu pemutusan kritis. Dalam hal ini jelas bahwa konstanta H dan reaktansi peralihan X'_d dari unit pembangkit memiliki pengaruh langsung pada kedua kriteria di atas.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian memberikan gambaran urutan langkah-langkah yang dilaksanakan untuk mencapai tujuan penyusunan skripsi. Adapun urutan langkah-langkah penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut:

3.1 Studi Literatur

Dalam studi literatur ini mempelajari tentang :

1. Teori dasar tentang studi aliran daya
2. Teori dasar tentang stabilitas sistem daya

Studi literatur digunakan untuk mengetahui dasar teori dan beberapa hal lain yang meliputi :

1. Studi literatur mengenai studi aliran daya yang meliputi dasar teori, manfaat, dan tekniknya.
2. Studi literatur mengenai parameter-parameter stabilitas dan komponen yang mempengaruhi stabilitas.

3.2 Pengumpulan Data

Data yang diperlukan pada penelitian ini antara lain:

1. Data sekunder: data yang didapat dari *single-line diagram* sistem serta data yang diperoleh dari data *standart* apabila tidak terdapat data aktual yaitu data dinamik generator, data saluran penghantar, data beban, data *governor control system*, dan data *automatic voltage regulator (AVR)*.

3.3 Pemodelan

Pemodelan sistem daya dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *PSAT* (*Power System Analysis Toolbox*) versi 2.1.6 yang berfungsi untuk memodelkan kondisi sistem daya yang ada dan mensimulasikan model tersebut.

3.4 Simulasi

Simulasi penelitian skripsi ini dilakukan untuk mendapatkan kondisi aliran daya sistem tersebut. Simulasi dilakukan dengan yaitu:

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

1. Simulasi kondisi awal sebelum dan sesudah interkoneksi
2. Simulasi stabilitas sebelum dan sesudah interkoneksi saat kondisi *steady-state* dan dinamik pada sistem di PT Badak NGL

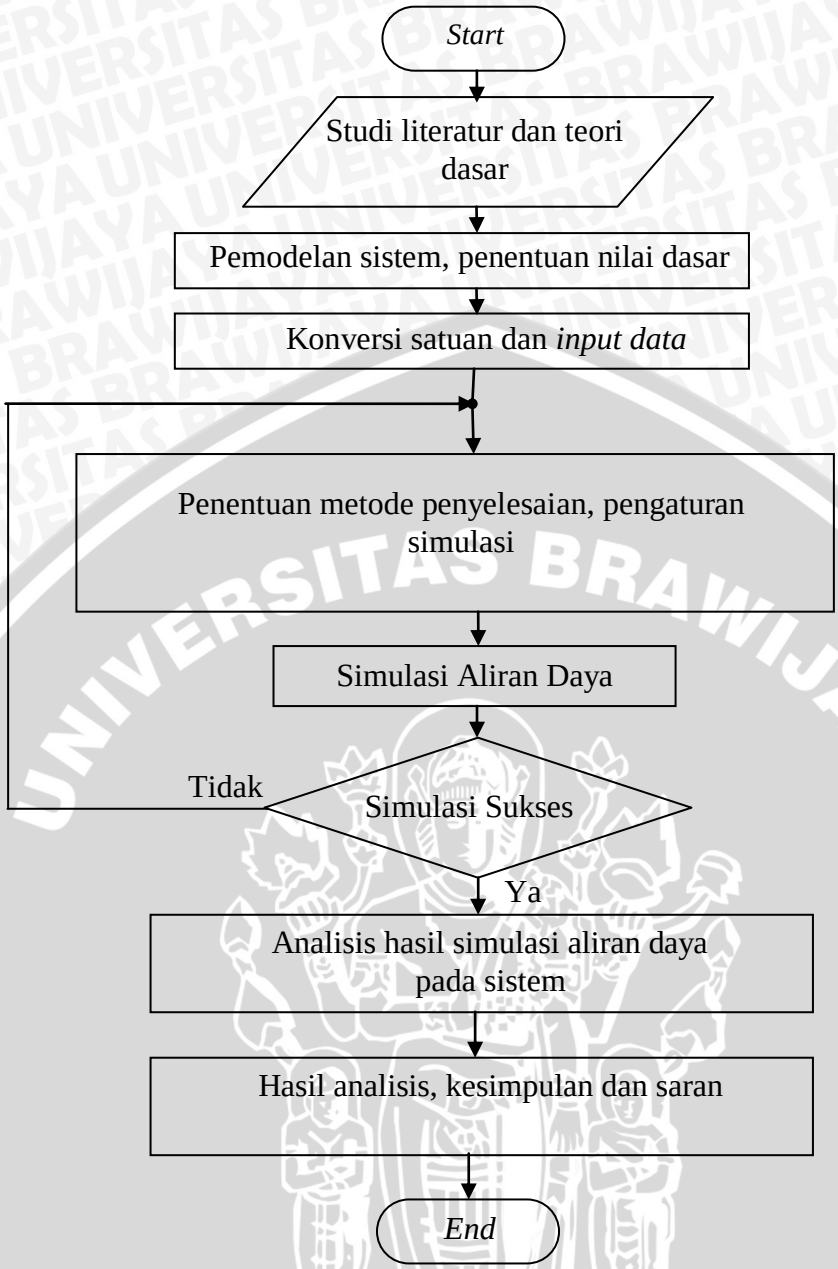
3.4.1 Langkah Simulasi

1. Membuat *file* baru pada perangkat lunak dan menetukan nilai dasar dan parameter analisis.
2. Menggambar dan memodelkan desain awal sistem daya.
3. Memberikan nilai tiap komponen sesuai data.
4. Menentukan metode penyelesaian aliran daya yang diinginkan
5. Melakukan simulasi aliran daya pada model awal sistem daya.
6. Mencatat data aliran daya sebagai bahan evaluasi studi stabilitas.
7. Melakukan interkoneksi pada dua (2) *module* pada sistem kelistrikan PT Badak NGL
8. Melakukan langkah 4 sampai 5 pada kondisi interkoneksi.
9. Memberikan gangguan pada *bus*.
10. Melakukan simulasi stabilitas kondisi *captive*
11. Melakukan analisis terhadap hasil simulasi.
12. Melakukan langkah 5 sampai 10 pada kondisi interkoneksi.
13. Pengambilan kesimpulan dan saran.

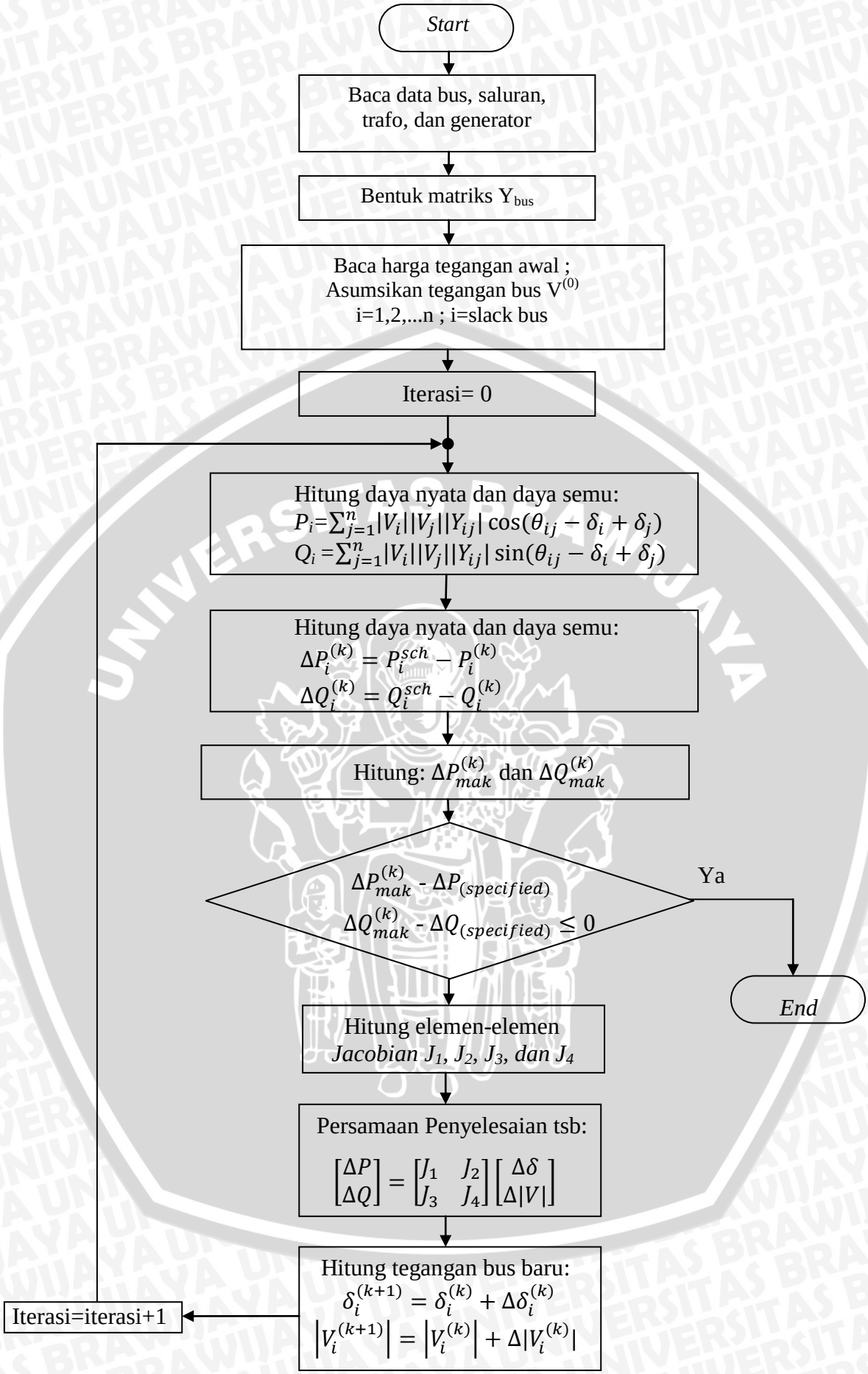
3.4.2 Hasil Simulasi dan Analisis

Setelah melakukan simulasi terhadap sistem kelistrikan PT Badak NGL, maka akan didapatkan data-data berupa kondisi aliran daya. Data-data yang didapat meliputi hal-hal sebagai berikut :

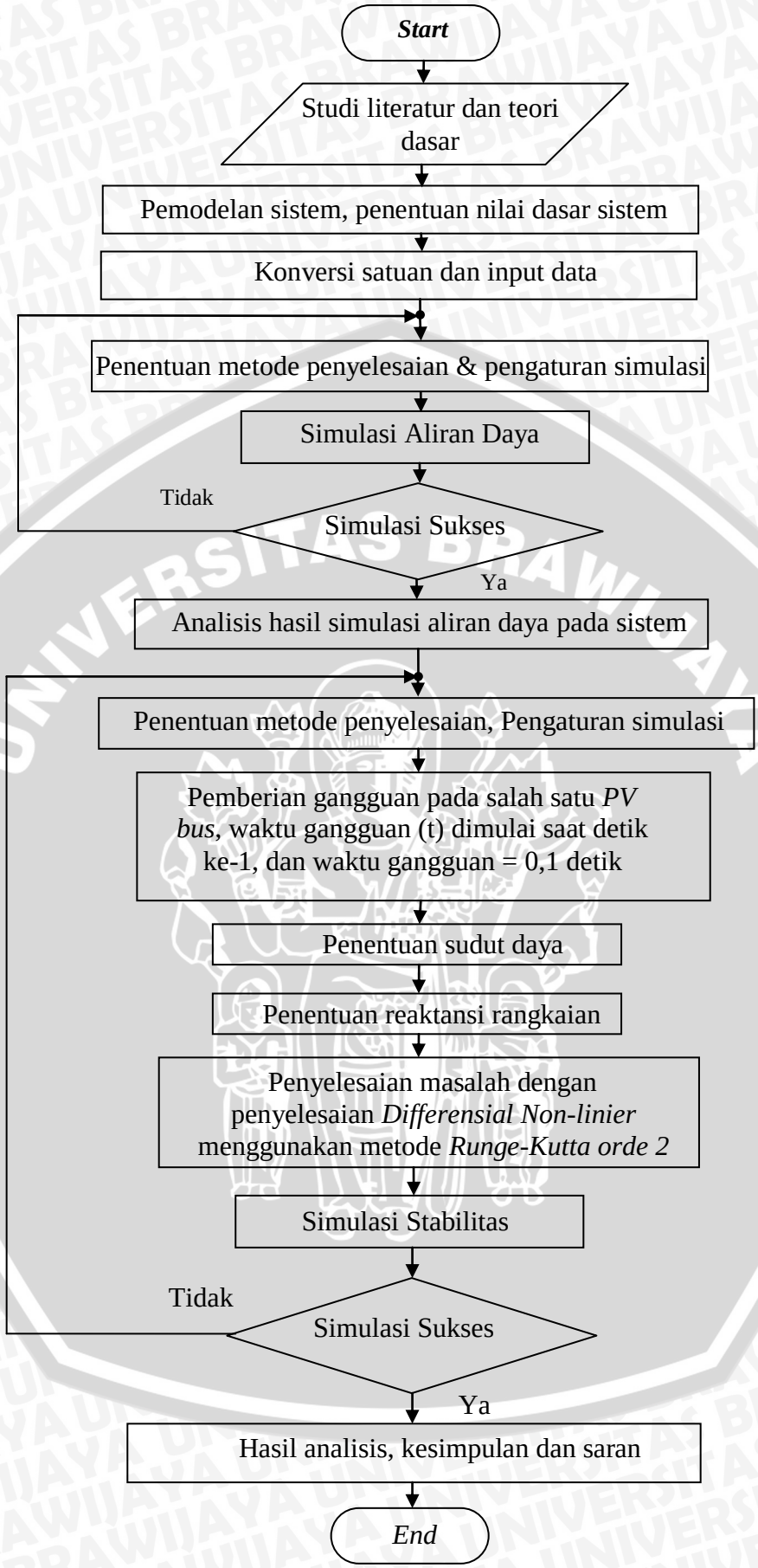
1. Hasil simulasi kondisi awal sebelum dan sesudah interkoneksi.
2. Hasil simulasi sebelum dan sesudah interkoneksi saat kondisi *steady-state* dan dinamik pada sistem di PT Badak NGL.



Gambar 3.1 Simulasi Kondisi Awal Sebelum Interkoneksi
Sumber : Penulis



Gambar 3.2 Metode penyelesaian Aliran Daya dengan *Newton Rhapson*
Sumber : Penulis



Gambar 3.3 Diagram Alir Simulasi Setelah Intekoneksi
Sumber : Penulis

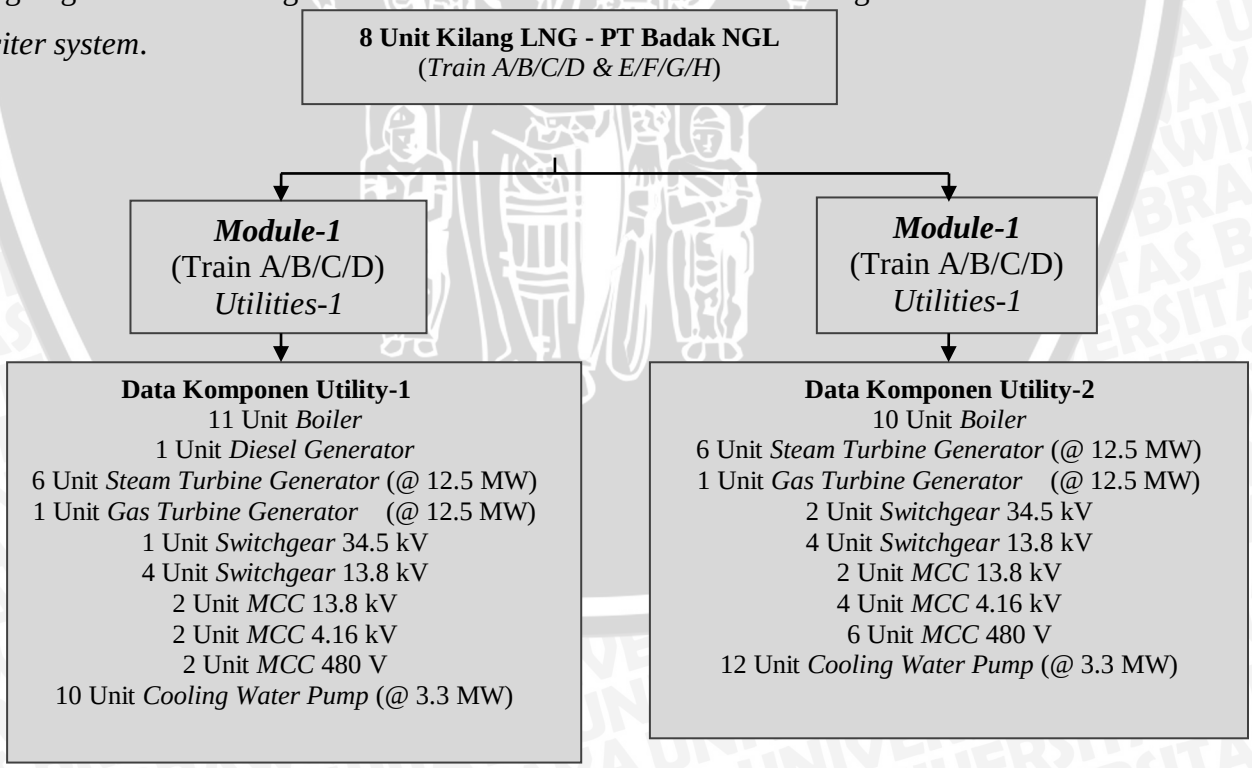
BAB IV
SIMULASI DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai aplikasi studi aliran daya di sistem kelistrikan PT Badak NGL. Studi ini bertujuan untuk mengetahui besarnya aliran daya yang mengalir pada sistem tersebut sehingga nantinya dapat digunakan oleh pihak ke-3 sebagai kajian untuk analisis lanjutan.

4.1 Kondisi Kelistrikan di PT Badak NGL

4.1.1 Sistem Pembangkitan

Energi listrik yang dihasilkan perusahaan ini berasal dari 15 unit generator, mulai dari generator G-01 hingga G-15 (level tegangan 13,8 kV) dan menghasilkan daya total sebesar 180 MW. Dalam memudahkan pengoperasian, maka sistem di perusahaan ini dibagi menjadi dua (2) bagian yang saling berhubungan yaitu *module-1* yang membawahi unit pengolahan gas alam cair (*Train A/B/C/D)*, 11 unit *boiler*, dan *utilities-1* yang terdiri atas 8 unit generator serta beberapa komponen pendukung lainnya, sedangkan pada *module-2* terdiri atas *Train E/F/G/H*, 10 unit *boiler*, dan *utilities-2* yang terdiri atas 7 unit generator serta beberapa komponen pendukung lainnya. Generator yang digunakan adalah generator sinkron 3 fasa kutub dalam dengan *brushless AC exciter system*.



Gambar 4.1 Diagram Sistem Daya Kilang PT Badak NGL
Sumber : PT Badak NGL

Berikut ditampilkan data teknik generator yang digunakan di PT Badak NGL:

Tabel 4.1 Data Generator PG-2 s.d. PG-6 dan PG-8 s.d PG-14 (*Steam Turbine Generator*)

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan (V)	13800	*V*
Arus (I)	654	*A*
Daya keluaran (P)	12500	*MWatt*
Daya Nyata (S)	15625	*MVA*
Frequency	50	*Hz*
Power factor	0.8	*Lagging*
n	3000	*rpm*
Exciter Field (V)	42	*V*
Exciter Field (Ampere)	13.5	*A*
Rotor Winding	*Two Pole-Strap Wound*	
Phase	3	

Sumber : *Electrical Distribution Module - PT Badak NGL*

Tabel 4.2 Data Generator PG-1 (*Diesel Generator*)

Parameter	Nilai	Satuan
Manufacture General	*Electric Machinery*	
Tegangan (V)	13800	*V*
Arus (I)	262	*A*
Daya Aktif (P)	5020	*MWatt*
Daya Nyata (S)	6275	*MVA*
Frequency	50	*Hz*
Power Factor (PF)	0.8	*Lagging*
n	3000	*rpm*
Exciter Field (V)	48	*V*
Exciter Field (Ampere)	10.3	*A*
Rotor Winding	-	
Phase	3	

Sumber : *Electrical Distribution Module - PT Badak NG*

Tabel 4.3 Data Generator PG-7 dan PG-15 (*Gas Turbine Generator*)

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan (V)	13800	*V*
Arus (I)	262	*A*
Daya keluaran (P)	12.5	*MW*
Daya Nyata (S)	-	*MVA*
Frequency	50	*Hz*
Power factor	0.8	*Lagging*
n	3000	*rpm*
Exciter Field (V)	110	*V*
Exciter Field (Ampere)	7.4	*A*
Rotor Winding	-	
Phase	3	

Sumber : *Electrical Distribution Module - PT Badak NGL*

Tabel 4.4 Data Generator PT Badak NGL Beserta *Primemover* dan Sistem Operasinya

No.	Kode	Generator Unit-	Kapasitas (Daya)	*PrimeMover*	*Governor*	Operasi
1.	31- PG - 1	G-01	5 MW	*Diesel*	-	*Off*
2.	31- PG - 2	G-02	12.5 MW	*Steam Turbine*	*Back Pressure*	*Droop*
3.	31- PG - 3	G-03	12.5 MW	*Steam Turbine*	*Back Pressure*	*Droop*
4.	31- PG - 4	G-04	12.5 MW	*Steam Turbine*	*Condensing*	*Isochronous*
5.	31- PG - 5	G-05	12.5 MW	*Steam Turbine*	*Condensing*	*Isochronous*
6.	31- PG - 6	G-06	12.5 MW	*Steam Turbine*	*Back Pressure*	*Droop*
7.	31- PG - 7	G-07	12.5 MW	*Gas Turbine*	-	*Isochronous*
8.	31- PG - 8	G-08	12.5 MW	*Steam Turbine*	*Back Pressure*	*Droop*
9.	31- PG - 9	G-09	12.5 MW	*Steam Turbine*	*Back Pressure*	*Droop*
10.	31- PG -10	G-10	12.5 MW	*Steam Turbine*	*Back Pressure*	*Droop*
11.	31- PG -11	G-11	12.5 MW	*Steam Turbine*	*Condensing*	*Isochronous*
12.	31- PG -12	G-12	12.5 MW	*Steam Turbine*	*Condensing*	*Isochronous*
13.	31- PG -13	G-13	12.5 MW	*Steam Turbine*	*Back Pressure*	*Droop*
14.	31- PG -14	G-14	12.5 MW	*Steam Turbine*	*Condensing*	*Isochronous*
15.	31-PG -15	G-15	12.5 MW	*Gas Turbine*	-	*Isochronous*

Sumber : *Electrical Distribution Module PT Badak NGL*

Label Penomoran

Generator	31	:	*Plant # 31*
31-PG-2			
31-PG-10	PG	:	*Power Generator*
31-PG-15	2, 10, 15	:	No Urut Equipment

4.1.2 Sistem Distribusi Daya

Energi listrik pada sistem distribusi di PT Badak NGL, dibangkitkan untuk kebutuhan sendiri sehingga saluran transmisi tidak diperlukan. Oleh sebab itu, tegangan keluaran generator sebesar 13.8 kV tidak perlu dinaikkan sebelum disalurkan. Sistem kelistrikan di PT Badak NGL terdiri dari beberapa bus (*busbar*) yang terdapat dalam *module-1* dan *module-2*. Selain untuk proses produksi, energi listrik yang dihasilkan dari beberapa generator tersebut didistribusikan ke *LNG liquefaction process plant*, *community*, *main office*, *cooling water pump*, *PSF*, *airport*, *apartement*, dsb.

Dibawah ini dijelaskan beberapa bus disetiap *module* yaitu:

1. *Module-1*
   - *Bus-bar*. 30-PS-1 (*bus 1*) disuplai oleh generator 31-PG-1 (G-1) & 31-PG-2 (G-2)
   - *Bus-bar*. 30-PS-2 (*bus 2*) disuplai oleh generator 31-PG-3 (G-3) & 31-PG-4 (G-4)
   - *Bus-bar*. 30-PS-3 (*bus 3*) disuplai oleh generator 31-PG-5 (G-5) & 31-PG-6 (G-6)
   - *Bus-bar*. 30-PS-4 (*bus 4*) disuplai oleh generator 31-PG-7 (G-7) & 31-PG-8 (G-8)
2. *Module -2*
   - *Bus-bar* 30-PS-5 (*bus 50*) disuplai oleh generator 31-PG-9 (G-9)
   - *Bus-bar* 30-PS-6 (*bus 51*) disuplai oleh generator 31-PG-11(G-11)& 31-PG-12(G-12)
   - *Bus-bar* 30-PS-7 (*bus 52*) disuplai oleh generator 31-PG-10(G-10)& 31-PG-15(G-15)
   - *Bus-bar* 30-PS-8 (*bus 53*) disuplai oleh generator 31-PG-13 (G-13)& 31-PG-14 (G-14)

4.1.2.1 Gardu Induk atau *SwitchGear*

Switchgear atau gardu induk, merupakan pengumpul atau tempat penampungan energi listrik sementara yang diterima dari generator kemudian disalurkan ke seluruh areal *plant*. *Switchgear* juga dibedakan berdasarkan level tegangan yaitu : 34.5 kV, 13.8 kV, 4.16 kV, dan 480 volts. Berikut adalah *Tag Number Switchgear* berdasarkan pengelompokan level tegangan.

Tabel 4.5 Data Gardu Induk

No.	Nama	Tegangan	Lokasi
1.	30 – PS-101	34.5 kV	*Module – I*
2.	30 – PS- 201	34.5 kV	*Module – II*
3.	30 – PS – 101/201	34.5 kV	Penghubung *Module-1* dan *Module- 2*
4.	30 – PS – 1/2	13.8 kV	*Module – I*
5.	30 – PS – 3/4	13.8 kV	*Module – I*
6.	30 – PS – 5/6	13.8 kV	*Module – II*
7.	30 – PS – 7/8	13.8 kV	*Module – II*

Sumber : *Electrical Distribution Module PT Badak NGL*

4.1.2.2 Transformator

Transformator yang digunakan dalam sistem distribusi di PT Badak NGL terbagi atas tiga (3) macam yaitu:

A. Transformator tiga-fasa Δ-Y 13.8/4.16 kV, 1-12 MVA, 3Ø, 50 Hz, (% Z: 5.5-6.5).

B. Transformator tiga-fasa 4160/480 V, 1-15 MVA, 3Ø, 50 Hz.

C. Transformator tiga-fasa tiga-belitan *(Three-Phase Three-Windings Transformer)* Y/Δ-Δ, 34.5/13.8-13.8 kV, 15/7.5-7.5 MVA,

Tabel 4.6 Data Transformator

No.	Nama Trafo	Tegangan (V)	Lokasi
1.	30 – PT-101 / 102 / 103/ 104	34.5 / 13.8 kV	*Module - 1*
2.	30 – PT- 201 / 202 / 203 / 204	34.5 / 13.8 kV	*Module - 2*
3.	30 – PT – 35 / 45	13.8 / 4.16 kV	*Module - 1*
4.	30 – PT – 351 / 451	4160 / 480 V	*Module - 2*
5.	30 – PT – 311 / 411	13.8 kV / 480 V	*Train C/D (Module-2)*
6.	30 – PT – 55 / 65	13.8 / 4.16 kV	*Module – 2*
7.	30 – PT – 551 / 651	4160 / 480 V	*Module – 2*
8.	30 – PT – 51 / 61	13.8 kV / 480 V	*Train E (Module -2)*

Sumber : *Electrical Distribution Module PT Badak NGL*

Label Penomoran Transformator:

30 – PT-101	30	:	*Plant # 30*
30 – PT – 35/45	PT	:	*Power Transformer*
	101, 35/45	:	No Urut Equipment

4.2 Pemodelan Sistem dan Pengolahan Data

4.2.1 Pemodelan Sistem

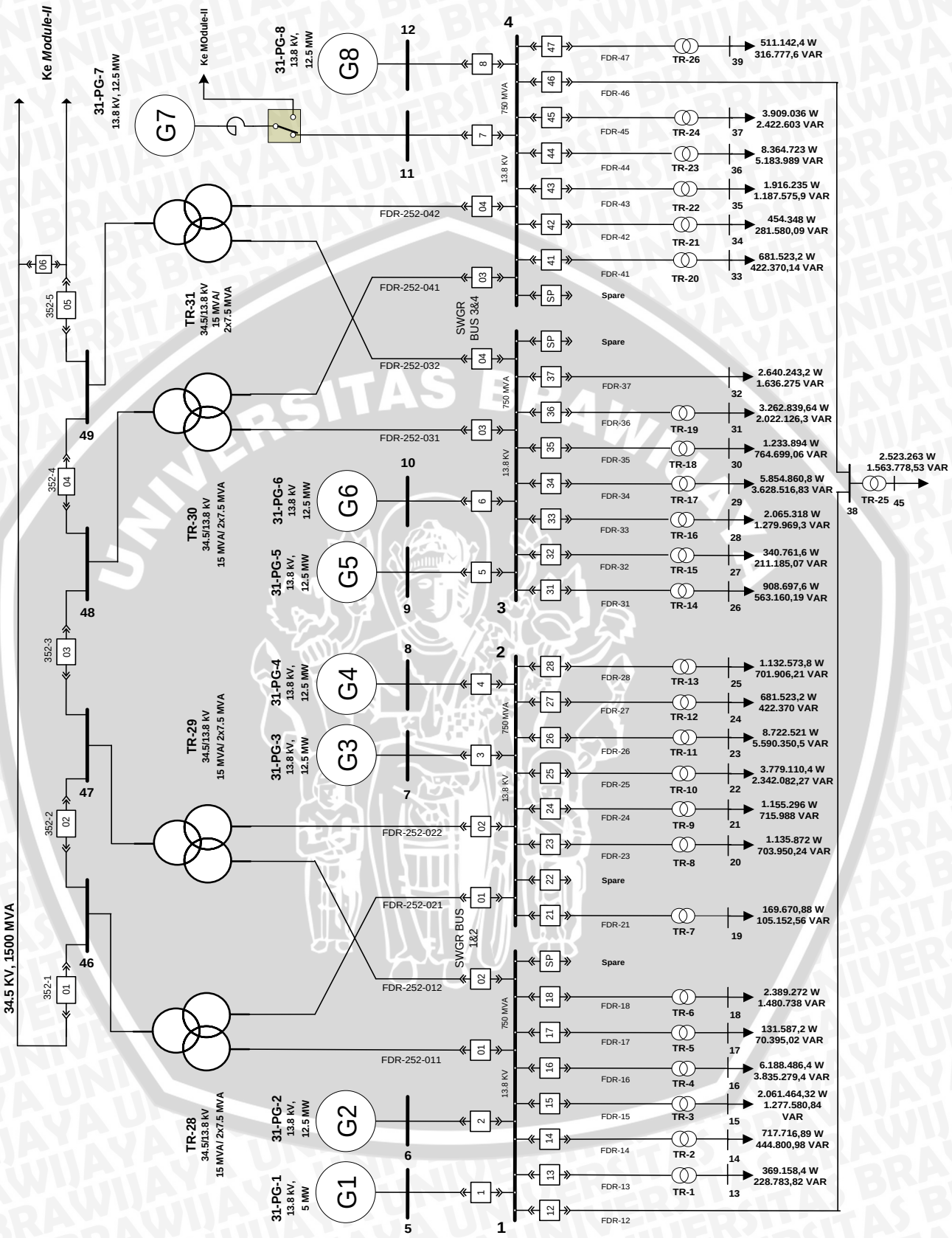
4.2.1.1 Sistem Daya *Module-1*

Berdasarkan single line diagram yang terdapat dalam lampiran, maka sistem daya pada *Module-1* akan dimodelkan secara sederhana dan disesuaikan dengan keperluan perhitungan dan simulasi. Untuk operasi penuh sistem daya *Module-1*, semua generator (7x12,5 MW) beroperasi secara penuh. Adapun *Single-line* diagram *Module-1* tersebut ditunjukan pada gambar 4.2.

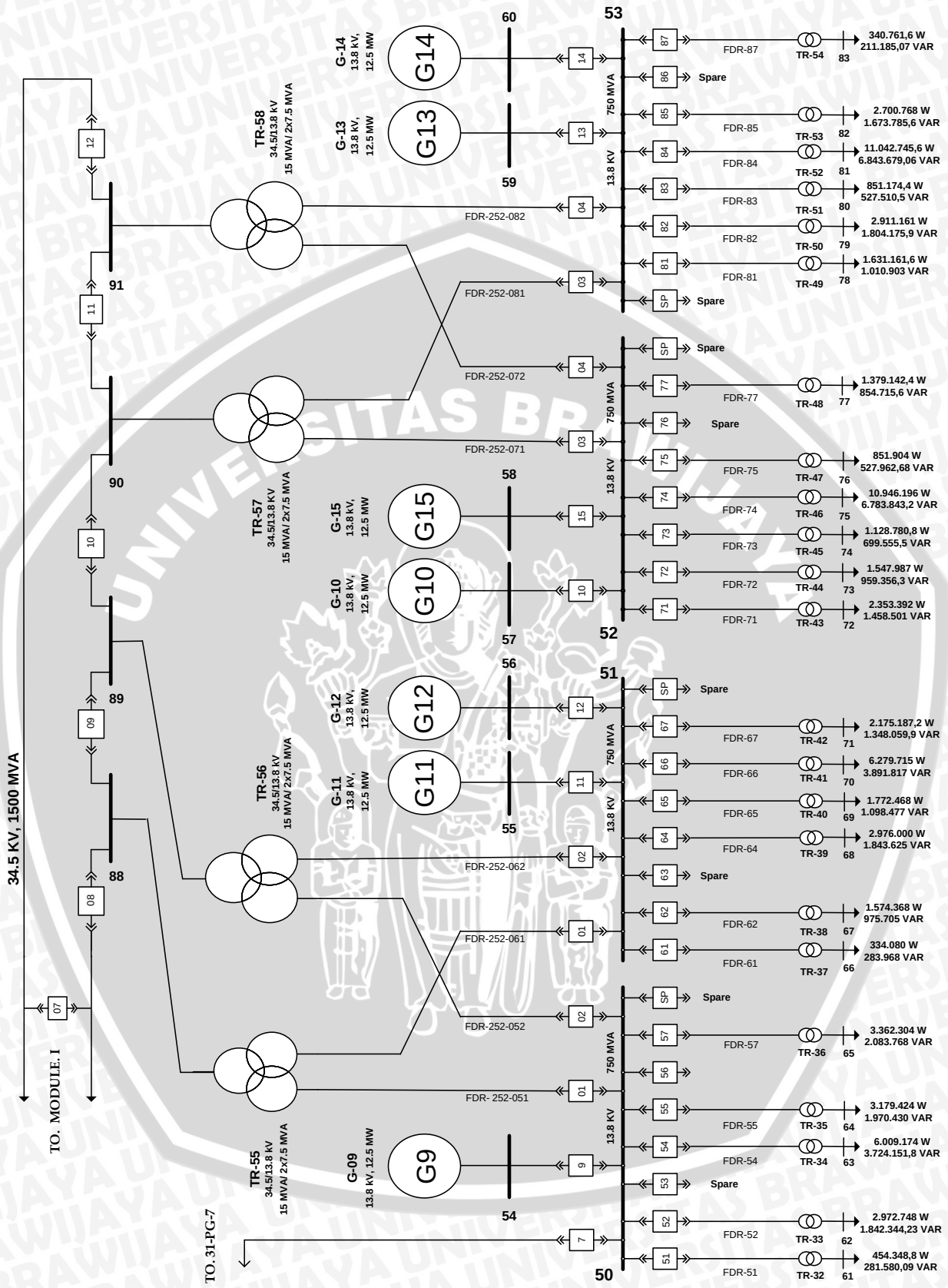
4.2.1.2 Sistem Daya *Module-2*

Berdasarkan *Single-Line Diagram* yang terdapat dalam lampiran, maka sistem daya pada *Module-2* akan dimodelkan secara sederhana dan disesuaikan dengan keperluan perhitungan dan simulasi. Untuk operasi penuh sistem daya *Module-2*, semua generator (7x12,5 MW) beroperasi penuh dan dalam kondisi baik. Adapun *Single-line Diagram Module-2* tersebut ditunjukan pada gambar 4.3.

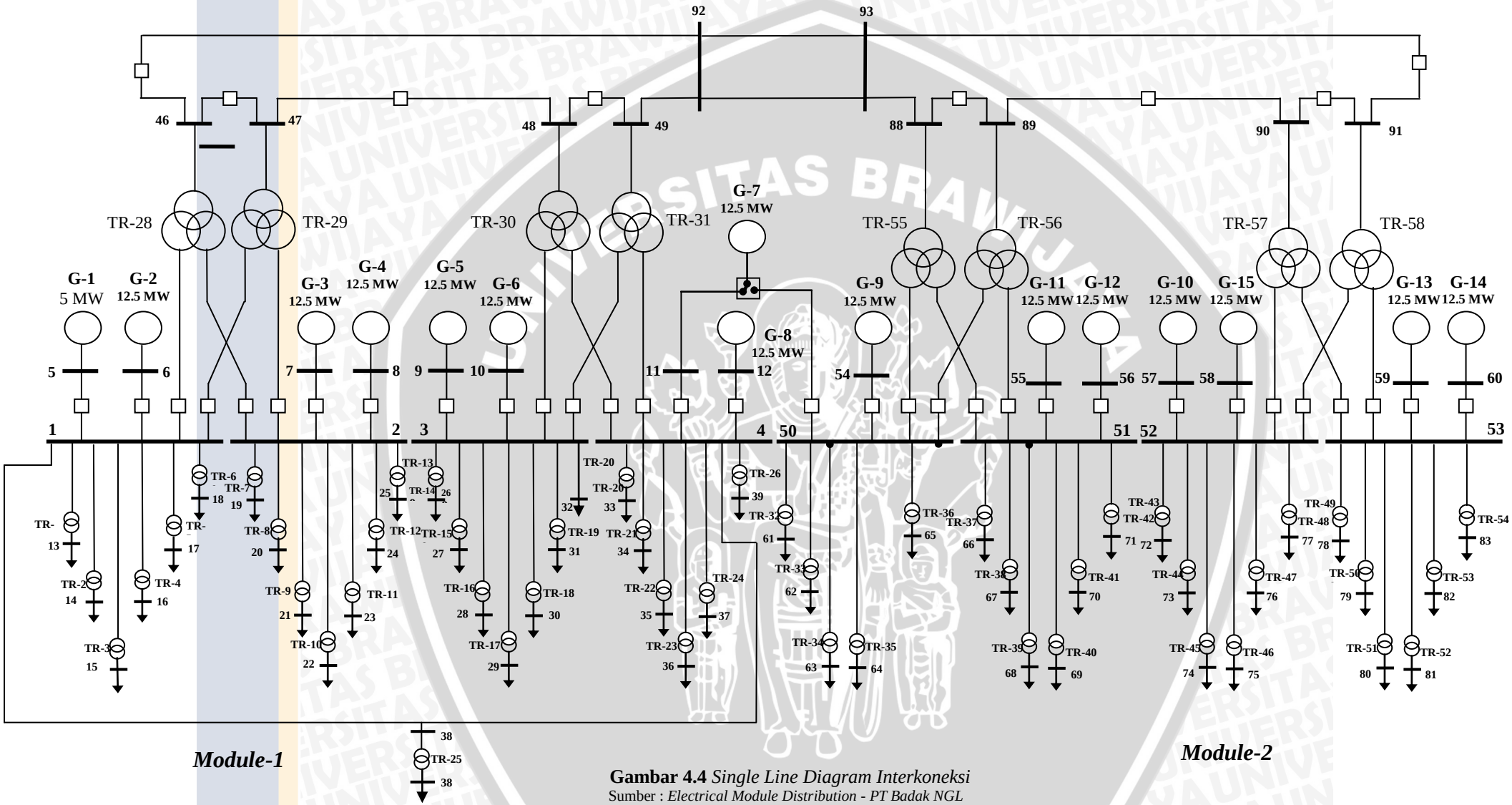
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar 4.2 *Single Line Diagram Module-1*
Sumber : *Module Electrical Distribution PT Badak NGL*



Gambar 4.3 *Single Line Diagram Module-2*
Sumber : *Module Electrical Distribution PT Badak NGL*



Gambar 4.4 *Single Line Diagram Interkoneksi*
Sumber : *Electrical Module Distribution - PT Badak NGL*

4.2.1.3 Sistem Daya Interkoneksi

Sistem daya interkoneksi akan menggambungkan *module-1* dengan *module-2*. Pada *module-1* terdapat 8 bus generator (bus 5 s.d 12) sedangkan pada *module-2* terdapat 7 bus generator (bus 54 s.d. 60). Interkoneksi keduanya dilakukan dengan menggunakan jaringan ringbus melalui transformator tiga-fasa tiga-belitan. Trafo tiga-belitan yang digunakan berjumlah 8 unit yaitu TR-28 s.d. TR-31 dan TR-55 s.d TR-59. Setelah itu ditentukan bus 11 sebagai *slack bus* dan bus generator lainnya sebagai *PV bus*. Dan beban sebagai *PQ bus.* Sistem daya interkoneksi ditampilkan pada gambar 4.4.

4.2.2 Data Generator

Sebelum melakukan perhitungan mengenai parameter-parameter sistem daya dalam satuan p.u. akan digunakan acuan nilai dasar 15.625 MVA sebagai daya dasar (*base power)* dan 13.8 kV sebagai tegangan dasar (*base voltage)*. Data-data yang diperlukan untuk menganalisis aliran daya pada sistem yang telah dijelaskan sebelumnya yaitu daya, frekuensi, tegangan, data dinamik generator, data saluran/konduktor, dll seperti yang terdapat dalam lampiran. Nilai reaktansi generator dalam satuan p.u dapat diketahui dengan suatu konversi satuan sesuai dengan persamaan 4-1 berikut (Grainger dan Stevenson, 1994:29):

$$X_{pu(baru)} = X_{pu(lama)} \left[\frac{kV_{(lama)dasar}}{kV_{(baru)dasar}}\right]^2 \left[\frac{MVA_{(lama)dasar}}{MVA_{(baru)dasar}}\right] \quad (4\text{-}1)$$

Adapun nilai dinamik generator setelah melalui hasil perhitungan ialah:

Tabel 4.7 Data Parameter Dinamik Generator

No.	Parameter	G-2 s.d G-15	G-1	Satuan
1.	S	1	0,6275	p.u.
2.	R	0,001	0,002	p.u.
3.	Xd	1,9	4,731	p.u.
4.	X'd	0,28	0,697	p.u.
5.	X"d	0,115	0,286	p.u.
6.	Xq	1,8	4,482	p.u.
7.	X'q	0,41	1,021	p.u.
8.	X"q	0,115	0,286	p.u.
9.	Xl	0,095	0,237	p.u.
10.	Td'o	4,8	4,8	s
11.	Td"o	0,035	0,035	s
12.	Tq'o	0,45	0,45	s
13.	Tq"o	0,06	0,06	s
14.	H	6	6	kJ/kVA
15.	D	0	0	-

Sumber : hasil perhitungan

4.2.3 Data Transformator

Untuk mendapatkan data transformator dalam satuan p.u., maka data transformator dalam Lampiran diubah menggunakan Persamaan 4-1. Selanjutnya data tranformator dalam p.u. ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Data Parameter Transformator

No.	Kode Trafo	Trafo	Vp (kV)	Vs (kV)	Daya (kVA)	Z (%)	(X/R)	R (p.u ; baru)	X (p.u ; baru)
1	TR-1	30PT-13	13,8	0,48	1500	7,12	6,2	0,01134	0,07029
2	TR-2	30PT-14	13,8	4,16	3500	5,5	7,0	0,00778	0,05445
3	TR-3	30PT-15	13,8	4,16	7500	5,76	7,0	0,00815	0,05702
4	TR-4	32PT-16	13,8	0,48	1000	5,76	6,2	0,00917	0,05687
5	TR-5	30PT-17	13,8	0,48	1000	7,12	6,2	0,01134	0,07029
6	TR-6	30PT-18	13,8	0,48	1000	7,12	6,2	0,01134	0,07029
7	TR-7	30PT-21	13,8	0,22	1000	7,12	7,2	0,00979	0,07052
8	TR-8	30PT-23	13,8	0,48	1000	7,0	6,2	0,01115	0,06911
9	TR-9	30PT-24	13,8	4,16	3500	5,5	7,0	0,00778	0,05445
10	TR-10	30PT-25	13,8	4,16	7500	5,85	7,0	0,00827	0,05791
11	TR-11	32PT-26	13,8	0,48	1000	5,66	6,2	0,00901	0,05588
12	TR-12	30PT-27	13,8	0,48	1000	7,04	6,2	0,01121	0,06950
13	TR-13	30PT-28	13,8	0,22	1000	7,12	7,2	0,00979	0,07052
14	TR-14	30PT-31	13,8	0,48	1000	7,13	6,2	0,01135	0,07039
15	TR-15	30PT-32	13,8	0,48	1500	5,62	6,8	0,00818	0,05560
16	TR-16	30PT-33	13,8	4,16	7500	5,85	7,0	0,00827	0,05791
17	TR-17	32-PT-34	13,8	0,48	1000	7,0	6,2	0,01115	0,06911
18	TR-18	30-PT-35	13,8	4,16	7500	5,85	7,0	0,00827	0,05791
19	TR-19	30PT-36	13,8	0,22	1000	7,12	7,2	0,00979	0,07052
20	TR-20	30PT-41	13,8	0,48	1000	6,96	6,2	0,01108	0,06871
21	TR-21	30PT-42	13,8	0,48	1500	5,69	6,8	0,00828	0,05630
22	TR-22	30PT-43	13,8	4,16	7500	5,81	7,0	0,00822	0,05752
23	TR-23	32-PT-44	13,8	0,48	1000	6,94	6,2	0,01105	0,06852
24	TR-24	30-PT-45	13,8	4,16	7500	5,88	7,0	0,00832	0,05821
25	TR-25	30PT-46	13,8	0,22	1000	7,12	7,2	0,00979	0,07052
26	TR-26	24PT-47	13,8	0,48	750	5,88	2,9	0,01929	0,05555
27	TR-32	30PT-51	13,8	4,16	2000	8,08	7,0	0,01143	0,07999
28	TR-33	30PT-52	13,8	4,16	7500	5,6	7,0	0,00792	0,05544
29	TR-34	32PT-54	13,8	0,48	1500	5,69	6,8	0,00828	0,05630
30	TR-35	31PT-55	13,8	4,16	7500	5,52	7,0	0,00781	0,05465
31	TR-36	30PT-56	13,8	4,16	10000	5,7	7,0	0,00806	0,05643
32	TR-37	31PT-57	13,8	4,16	7500	5,63	7,0	0,00796	0,05573
33	TR-38	30PT-61	13,8	4,16	2000	7,83	7,0	0,01107	0,07751
34	TR-39	30PT-62	13,8	4,16	7500	5,6	7,0	0,00792	0,05544
35	TR-40	32PT-64	13,8	0,48	1500	5,69	6,8	0,00828	0,05630
36	TR-41	31PT-65	13,8	4,16	7500	5,5	7,0	0,00778	0,05445
37	TR-42	30PT-66	13,8	4,16	10000	5,7	7,0	0,00806	0,05643
38	TR-43	31PT-67	13,8	4,16	7500	5,68	7,0	0,00803	0,05623
39	TR-44	31PT-71	13,8	4,16	7500	5,5	7,0	0,00778	0,05445
40	TR-45	30PT-72	13,8	4,16	7500	5,65	7,0	0,00799	0,05593
41	TR-46	24PT-73	13,8	4,16	7500	5,62	7,0	0,00795	0,05564

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

No.	Kode Trafo	Trafo	Vp (kV)	Vs (kV)	Daya (kVA)	Z (%)	(X/R)	R (p.u ; baru)	X (p.u ; baru)
42	TR-47	31PT-74	13,8	0,48	1250	5,5	6,4	0,00849	0,05434
43	TR-48	31PT-75	13,8	4,16	7500	6,41	7	0,00907	0,06346
44	TR-49	31PT-77	13,8	4,16	7500	5,41	7	0,00765	0,05356
45	TR-50	31PT-81	13,8	4,16	7500	5,5	7	0,00778	0,05445
46	TR-51	30PT-82	13,8	4,16	7500	5,43	7	0,00768	0,05375
47	TR-52	24PT-83	13,8	4,16	7500	5,51	7	0,00779	0,05455
48	TR-53	31PT-84	13,8	0,48	1250	5,5	6,4	0,00849	0,05434
49	TR-54	31PT-85	13,8	4,16	7500	6,31	7	0,00892	0,06247
50	TR-55	31PT-87	13,8	4,16	7500	5,41	7	0,00765	0,05356

Sumber : hasil perhitungan

4.2.4 Data Saluran

Saluran transmisi seperti yang tercantum dalam model sistem daya di atas memiliki data-data seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.9, 4.10, 4.11 dan 4.12 berikut:

Tabel 4.9 Data Saluran Antar-Bus

No.	Dari-	Ke-	Panjang saluran (km)	R at 90 (Ω/km)	X at 50 Hz (Ω/km)	R (Ω)	X (Ω)	R (p.u.)	X (p.u.)	Description Line FDR
1	46	47	0,080	0,064	0,0893	0,00512	0,00714	0,0004201	0,0005861	*30FDR-12, 3/C,4/0, 2405m,500mm2*
2	47	48	0,076	0,064	0,0893	0,00486	0,00679	0,0003991	0,0005568	*30FDR-12, 3/C,4/0, 2405m,500mm2*
3	48	49	0,036	0,064	0,0893	0,00230	0,00321	0,0001890	0,0002638	*30FDR-12, 3/C,4/0, 2405m,500mm2*
4	49	46	0,085	0,064	0,0893	0,00544	0,00759	0,0004463	0,0006228	*30FDR-12, 3/C,4/0, 2405m,500mm2*
5	88	89	0,080	0,064	0,0893	0,00512	0,00714	0,0004201	0,0005861	*30FDR-12, 3/C,4/0, 2405m,500mm2*
6	89	90	0,076	0,064	0,0893	0,00486	0,00679	0,0003991	0,0005568	*30FDR-12, 3/C,4/0, 2405m,500mm2*
7	90	91	0,036	0,064	0,0893	0,00230	0,00321	0,0001890	0,0002638	*30FDR-12, 3/C,4/0, 2405m,500mm2*
8	91	88	0,085	0,064	0,0893	0,00544	0,00759	0,0004463	0,0006228	*30FDR-12, 3/C,4/0, 2405m,500mm2*

(Sumber : Hasil perhitungan, S_{base} = 15.625 MVA, V_{base} = 13.8 kV)

Tabel 4.10 Data Saluran Melalui Trafo Tiga-Fasa Tiga-Belitan

No.	Dari-	Ke-	Keterangan (melalui)	R (trafo) (p.u)	X (Trafo) (p.u)	R (line_1) (p.u)	X (line_1) (p.u)	R (line_2) (p.u)	X (line_2) (p.u)	R (Total) (p.u)	X (Total) (p.u)
1.	1	2	TR-28	0,00001641	0,00001641	0,00042008	0,00070232	0,000603865	0,001009586	0,00104035	0,00172832
2.	1	2	TR-29	0,00001641	0,00001641	0,00039908	0,00066720	0,000399076	0,000667205	0,00081456	0,00135082
3.	3	4	TR-30	0,00001641	0,00001641	0,00042008	0,00070232	0,00078765	0,001316852	0,00122414	0,00203558
4.	3	4	TR-31	0,00001641	0,00001641	0,00036232	0,00060575	0,000362319	0,000605752	0,00074105	0,00122791
5.	50	51	TR-55	0,00001641	0,00001641	0,00028700	0,00018411	0,00033918	0,00021759	0,00064259	0,00041811
6.	50	51	TR-56	0,00001641	0,00001641	0,00033918	0,00021759	0,00028700	0,00018411	0,00064259	0,00041811
7.	52	53	TR-57	0,00001641	0,00001641	0,00033918	0,00021759	0,00033918	0,00021759	0,00069477	0,00045159
8.	52	53	TR-58	0,00001641	0,00001641	0,00027395	0,00017574	0,00027395	0,00017574	0,00056432	0,00036790

(Sumber : Hasil perhitungan, S_{base} = 15.625 MVA, V_{base} = 13.8 kV)

Tabel 4.11 Data Saluran PV bus ke Ring Bus Dengan Level Tegangan 34,5 kV

No.	Dari-	Ke-	R (trafo)	X (Trafo)	R (line)	X (line)	R TOTAL	X TOTAL
			(p.u)	(p.u)	(p.u)	(p.u)	(p.u)	(p.u)
1.	1	46	0,00001641	0,00001641	0,00042008	0,00070232	0,00043649	0,00071873
2.	1	47	0,00001641	0,00001641	0,00039908	0,00066720	0,00041549	0,00068361
3.	2	46	0,00001641	0,00001641	0,00060386	0,00100959	0,00062027	0,00102600
4.	2	47	0,00001641	0,00001641	0,00039908	0,00066720	0,00041549	0,00068361
5.	3	48	0,00001641	0,00001641	0,00042008	0,00070232	0,00043649	0,00071873
6.	3	49	0,00001641	0,00001641	0,00036232	0,00060575	0,00037873	0,00062216
7.	4	48	0,00001641	0,00001641	0,00078765	0,00131685	0,00080406	0,00133326
8.	4	49	0,00001641	0,00001641	0,00036232	0,00060575	0,00037873	0,00062216
9.	50	88	0,00001641	0,00001641	0,00028700	0,00018411	0,00030341	0,00020052
10.	50	89	0,00001641	0,00001641	0,00033918	0,00021759	0,00035559	0,00023400
11.	51	88	0,00001641	0,00001641	0,00033918	0,00021759	0,00035559	0,00023400
12.	51	89	0,00001641	0,00001641	0,00028700	0,00018411	0,00030341	0,00020052
13.	52	90	0,00001641	0,00001641	0,00033918	0,00021759	0,00035559	0,00023400
14.	52	91	0,00001641	0,00001641	0,00027395	0,00017574	0,00029036	0,00019215
15.	53	90	0,00001641	0,00001641	0,00033918	0,00021759	0,00035559	0,00023400
16.	53	91	0,00001641	0,00001641	0,00027395	0,00017574	0,00029036	0,00019215

Tabel 4.12 Data Saluran

No.	Dari-	Ke-	Panjang saluran	R at 90	X at 50 Hz	R (Ω)	X (Ω)	R (p.u.)	X (p.u.)	Description
			(km)	(Ω/km)	(Ω/km)					Line FDR
1	1	36	2,40500	0,06400	0,10700	0,15392	0,25734	0,01262865	0,02111352	*30FDR-12, 3/C,4/0, 2405m,400mm2*
2	1	13	0,23000	0,06400	0,10700	0,01472	0,02461	0,00120773	0,00201917	*30FDR-13, 3/C,4/0, 230m,400mm2*
3	1	14	0,29500	0,06400	0,10700	0,01888	0,03157	0,00154904	0,00258981	*30FDR-14, 3/C,4/0, 295m,400mm2*
4	1	15	1,00000	0,06400	0,10700	0,06400	0,10700	0,00525100	0,00877901	*30FDR-15A/B, 3/C,4/0, 1000m,400mm2*
5	1	16	3,78200	0,06400	0,10700	0,24205	0,40467	0,01985927	0,03320222	*30FDR-16A/B/C/D, 3/C,4/0, 3782m,400m2*

No.	Dari-	Ke-	Panjang saluran	R at 90	X at 50 Hz	R (Ω)	X (Ω)	R (p.u.)	X (p.u.)	Description
			(km)	(Ω/km)	(Ω/km)					Line FDR
6	1	17	0,21300	0,06400	0,10700	0,01363	0,02279	0,00111846	0,00186993	*30FDR-17 3/C,4/0, 213m,400mm2*
7	1	18	3,60400	0,06400	0,10700	0,23066	0,38563	0,01892460	0,03163956	*30FDR-18, 3/C,4/0, 3604m,400mm2*
8	1	19	2,40500	0,06400	0,10700	0,15392	0,25734	0,01262865	0,02111352	*30FDR-21, 3/C,4/0, 2405m,400mm2*
9	2	20	0,16400	0,06400	0,10700	0,01050	0,01755	0,00086116	0,00143976	*30FDR-23, 3/C,4/0, 164m,400mm2*
10	2	21	0,27900	0,06400	0,10700	0,01786	0,02985	0,00146503	0,00244934	*30FDR-24, 3/C,4/0, 279m,400mm2*
11	2	22	1,00000	0,06400	0,10700	0,06400	0,10700	0,00525100	0,00877901	*30FDR-25A/B, 3/C,4/0, 1000m,400mm2*
12	2	23	3,85700	0,06400	0,10700	0,24685	0,41270	0,02025310	0,03386065	*30FDR-26A/B/C/D, 3/C,4/0, 3857m,400mm2*
13	2	24	0,19700	0,06400	0,10700	0,01261	0,02108	0,00103445	0,00172947	*30FDR-27, 3/C,4/0, 197m,400mm2*
14	2	25	3,72900	0,06400	0,10700	0,23866	0,39900	0,01958097	0,03273693	*30FDR-28, 3/C,4/0, 3729m,400mm2*
15	3	26	0,32000	0,06400	0,10700	0,02048	0,03424	0,00168032	0,00280928	*30FDR-31, 3/C,4/0, 320m,400m2*
16	3	27	0,29500	0,06400	0,10700	0,01888	0,03157	0,00154904	0,00258981	*30FDR-32, 3/C,4/0, 295m,400mm2*
17	3	28	1,00000	0,06400	0,10700	0,06400	0,10700	0,00525100	0,00877901	*30FDR-33A/B, 3/C,4/0, 1000m,400mm2*
18	3	29	3,78200	0,06400	0,10700	0,24205	0,40467	0,01985927	0,03320222	*30FDR-34A/B, 3/C,4/0, 3782m, 400mm2*
19	3	30	0,21300	0,06400	0,10700	0,01363	0,02279	0,00111846	0,00186993	*30FDR-35, 3/C,4/0, 213m,400mm2*
20	3	31	1,50000	0,19600	0,10500	0,29400	0,15750	0,02412177	0,01292238	*30FDR-36A/B, 3/C,4/0, 1500M,120mm2*
21	3	32	2,14000	0,09800	0,09520	0,20972	0,20373	0,01720686	0,01671524	*30FDR-37, 3/C,4/0, 2140m,240mm2*
22	4	33	0,16400	0,06400	0,10700	0,01050	0,01755	0,00086116	0,00143976	*30FDR-41, 3/C,4/0, 164m, 400mm2*
23	4	34	0,27900	0,06400	0,10700	0,01786	0,02985	0,00146503	0,00244934	*30FDR-42, 3/C,4/0, 279m, 400mm2*
24	4	35	1,00000	0,06400	0,10700	0,06400	0,10700	0,00525100	0,00877901	*30FDR-43A/B, 3/C,4/0, 1000m, 400mm2*
25	4	36	3,86700	0,06400	0,10700	0,24749	0,41377	0,02030561	0,03394844	*30FDR-44A/B, 3/C,4/0, 3867m, 400mm2*
26	4	37	1,19700	0,06400	0,10700	0,07661	0,12808	0,00628544	0,01050848	*30FDR-45, 3/C,4/0, 164m, 400mm2*
27	4	38	1,50000	0,06400	0,10700	0,09600	0,16050	0,00787650	0,01316852	*30FDR-46A/B, 3/C,4/0, 1500m, 400mm2*
28	4	39	2,14000	0,06400	0,10700	0,13696	0,22898	0,01123714	0,01878709	*30FDR-47, 3/C,4/0, 2140m, 400mm2*
29	50	61	0,20500	0,15900	0,10200	0,03260	0,02091	0,00267432	0,00171560	*30FDR-51, 1-3/C, 205m, 150mm2*

No.	Dari-	Ke-	Panjang saluran	R at 90	X at 50 Hz	R (Ω)	X (Ω)	R (p.u.)	X (p.u.)	Description
			(km)	(Ω/km)	(Ω/km)					Line FDR
30	50	62	0,23000	0,15900	0,10200	0,03657	0,02346	0,00300045	0,00192482	*30FDR-52-2, 2-3/C, 230m, 150mm2*
31	50	63	1,21500	0,15900	0,10200	0,19319	0,12393	0,01585022	0,01016806	*30FDR-55A/B, 2-3/C, 1215m, 150mm2*
32	50	64	1,78200	0,15900	0,10200	0,28334	0,18176	0,02324699	0,01491316	*30FDR-56A/B, 2-3/C, 1782m, 150mm2*
33	50	65	0,21300	0,08000	0,09220	0,01704	0,01964	0,00139808	0,00161129	*30FDR-57, 2-3/C, 213m, 300mm2*
34	51	66	0,27600	0,15900	0,10200	0,04388	0,02815	0,00360054	0,00230978	*30FDR-61, 2-3/C, 276m, 150mm2*
35	51	67	0,24100	0,15900	0,10200	0,03832	0,02458	0,00314395	0,00201688	*30FDR-62, 2-3/C, 241m, 150mm2*
36	51	68	2,16400	0,08000	0,09220	0,17312	0,19952	0,01420395	0,01637005	*30FDR-64A/B, 2-3/C, 2164m, 300mm2*
37	51	69	1,27900	0,15900	0,10200	0,20336	0,13046	0,01668513	0,01070367	*30FDR-65A/B, 2-3/C, 1279m, 150mm2*
38	51	70	1,00000	0,15900	0,10200	0,15900	0,10200	0,01304545	0,00836878	*30FDR-66A/B, 2-3/C, 1000m, 150mm2*
39	51	71	0,25700	0,15900	0,10200	0,04086	0,02621	0,00335268	0,00215078	*30FDR-67, 2-3/C, 257m, 150mm2*
40	52	72	0,29500	0,15900	0,10200	0,04691	0,03009	0,00384841	0,00246879	*30FDR-71, 2-3/C, 295m, 150mm2*
41	52	73	1,00000	0,15900	0,10200	0,15900	0,10200	0,01304545	0,00836878	*30FDR-72, 2-3/C, 1000m, 150mm2*
42	52	74	0,21600	0,15900	0,10200	0,03434	0,02203	0,00281782	0,00180766	*30FDR-73, 2-3/C, 216m, 150mm2*
43	52	75	0,21300	0,08000	0,09220	0,01704	0,01964	0,00139808	0,00161129	*30FDR-74, 2-3/C, 213m, 300mm2*
44	52	76	0,21400	0,15900	0,10200	0,03403	0,02183	0,00279173	0,00179092	*30FDR-75, 2-3/C, 214m, 150mm2*
45	52	77	3,60400	0,15900	0,10200	0,57304	0,36761	0,04701579	0,03016107	*30FDR-77, 2-3/C, 3604m, 150mm2*
46	53	78	0,295	0,159	0,102	0,04691	0,03009	0,0038484	0,0024688	*30FDR-81, 2-3/C, 295m, 150mm2*
47	53	79	1	0,159	0,102	0,159	0,102	0,0130455	0,0083688	*30FDR-82, 2-3/C, 1000m, 150mm2*
48	53	80	0,216	0,159	0,102	0,03434	0,02203	0,0028178	0,0018077	*30FDR-83, 2-3/C, 216m, 150mm2*
49	53	81	0,213	0,08	0,0922	0,01704	0,01964	0,0013981	0,0016113	*30FDR-84, 2-3/C, 213m, 300mm2*
50	53	82	0,214	0,159	0,102	0,03403	0,02183	0,0027917	0,0017909	*30FDR-85, 2-3/C, 214m, 150mm2*
51	53	83	3,604	0,159	0,102	0,57304	0,36761	0,0470158	0,0301611	*30FDR-87, 2-3/C, 3604m, 150mm2*

(Sumber : Hasil perhitungan, S_{base} = 15.625 MVA, V_{base} = 13.8 kV)

4.2.5 Data Beban

Nilai pembebanan seperti yang tercantum dalam diagram segaris Gambar 4.2 dan 4.3 akan dikonversi ke dalam satuan p.u. dengan menggunakan daya dasar 15,625 MVA. Dari hasil konversi satuan tersebut diperoleh data pembebanan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.13 berikut:

Tabel 4.13 Data Pembebanan *Module-1* dan *Module-2*

No.	Bus	Kode Beban	P (p.u)	Q (p.u.)
1	13	PS-13	0,02953	0,01830
2	14	PS-14	0,05742	0,03558
3	15	PS-15	0,16492	0,10221
4	16	PS-16	0,07264	0,04502
5	17	PS-17	0,00909	0,00563
6	18	PS-18	0,19114	0,11846
7	19	PS-21	0,01357	0,00841
8	20	PS-23	0,09087	0,05632
9	21	PS-24	0,09242	0,05728
10	22	PS-25	0,30233	0,18737
11	23	PS-26	0,69780	0,44723
12	24	PS-27	0,05452	0,03379
13	25	PS-28	0,09061	0,05615
14	26	PS-31	0,07270	0,04505
15	27	PS-32	0,02726	0,01689
16	28	PS-33	0,16523	0,10240
17	29	PS-34	0,46839	0,29028
18	30	PS-35	0,09871	0,06118
19	31	PS-36	0,26103	0,16177
20	32	PS-37	0,21122	0,13090
21	33	PS-41	0,05452	0,03379
22	34	PS-42	0,03635	0,02253
23	35	PS-43	0,15330	0,09501
24	36	PS-44	0,66918	0,41472
25	37	PS-45	0,31272	0,19381
26	38	PS-46	0,20186	0,12510
27	39	PS-47	0,04089	0,02534

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

No.	Bus	Kode Beban	P (p.u)	Q (p.u.)
28	61	PS-51	0,03635	0,02253
29	62	PS-52	0,23782	0,14739
30	63	PS-54	0,48073	0,29793
31	64	PS-55	0,25435	0,15763
32	65	PS-57	0,26898	0,16670
33	66	PS-61	0,02673	0,02272
34	67	PS-62	0,12595	0,07806
35	68	PS-64	0,23808	0,14749
36	69	PS-65	0,14180	0,08788
37	70	PS-66	0,50238	0,31135
38	71	PS-67	0,17401	0,10784
39	72	PS-71	0,18827	0,11668
40	73	PS-72	0,12384	0,07675
41	74	PS-73	0,09030	0,05596
42	75	PS-74	0,87570	0,54271
43	76	PS-75	0,06815	0,04224
44	77	PS-77	0,11033	0,06838
45	78	PS-81	0,13049	0,08087
46	79	PS-82	0,23289	0,14433
47	80	PS-83	0,06809	0,04220
48	81	PS-84	0,88342	0,54749
49	82	PS-85	0,21606	0,13390
50	83	PS-87	0,02726	0,01689

(Sumber : hasil perhitungan, data detail terlampir)

4.3 Simulasi Aliran Daya

Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui besarnya aliran daya pada sistem tersebut saat kondisi *steady-state*. Simulasi yang dilakukan meliputi simulasi *captive module-1*, *captive module-2* dan interkoneksi. Beberapa hal yang harus diketahui sebelum melakukan simulasi yaitu besar tegangan sistem harus mengacu pada peraturan yang berlaku yaitu sebesar +5 % dan -10 % dari tegangan nominal, sedangkan frekuensi diusahakan tidak lebih dari 50,5 Hz dan tidak kurang dari 49,5 Hz pada kondisi normal.

4.3.1 Simulasi Aliran Daya *Captive Module-I*

Pada simulasi aliran daya captive *module-1* ini ditentukan bahwa bus-11 adalah *slack bus* dengan tegangan 1 p.u $\angle 0°$ sedangkan bus-6 s.d. bus-12 merupakan *PV bus* dengan daya keluaran bervariasi (lihat tabel). Sedangkan untuk bus beban dan data saluran dapat dilihat pada tabel 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 dan 4.13. Dari hasil simulasi aliran daya di *Module-I* diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.14 Data Simulasi *Captive Module-I*

No.	*Bus*	V	phase	P (gen)	Q (gen)	P (beban)	Q (beban)
		[p.u.]	[^{O}]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
1	1	0,9999958	0,0030132	0	0	0	0
2	10	1	0,0011571	0,8	0,47369	0	0
3	11	1	0	0,6127	0,54872	0	0
4	12	1	0,0001120	0,8	0,54812	0	0
5	13	0,9864224	0,0012322	0	0	0,0295	0,1830
6	14	0,9975633	-0,1640875	0	0	0,0574	0,0356
7	15	0,9926236	-0,5015671	0	0	0,1649	0,1022
8	16	0,9996731	-0,0265539	0	0	0,4224	0,2618
9	17	0,9994872	-0,0308150	0	0	0,0091	0,0056
10	18	0,9891087	-0,7157415	0	0	0,1911	0,1185
11	19	0,9992586	-0,0480644	0	0	0,0136	0,0084
12	2	0,9999947	0,0028959	0	0	0	0
13	20	0,9949885	-0,3280295	0	0	0,0909	0,0563
14	21	0,9960696	-0,2664769	0	0	0,0924	0,0573
15	22	0,9677370	-2,1582959	0	0	0,2387	0,1480
16	23	0,9996623	-0,0261610	0	0	0,4224	0,2618
17	24	0,9954006	-0,2223595	0	0	0,0641	0,0545
18	25	0,9950464	-0,3388232	0	0	0,0906	0,0562
19	26	0,9959239	-0,2686669	0	0	0,0727	0,0451
20	27	0,9988128	-0,0799686	0	0	0,0273	0,0169
21	28	0,9924943	-0,5127593	0	0	0,1652	0,1024
22	29	0,9996900	-0,0272914	0	0	0,4224	0,2618
23	3	0,9999950	0,0006795	0	0	0	0
24	30	0,9955415	-0,3032776	0	0	0,0982	0,0612
25	31	0,9855030	-0,9933172	0	0	0,2610	0,1618
26	32	0,9997202	-0,0245449	0	0	0,4224	0,2618
27	33	0,9970182	-0,1973918	0	0	0,0545	0,0338
28	34	0,9983968	-0,1092783	0	0	0,0364	0,0225
29	35	0,9930872	-0,4732707	0	0	0,1533	0,0950
30	36	0,9993678	-0,0569855	0	0	0,6337	0,3927
31	37	0,9855529	-0,9838863	0	0	0,3127	0,1938
32	38	0,9563062	-3,7077191	0	0	0	0
33	39	0,9977646	-0,1051785	0	0	0,0409	0,0253
34	4	0,9999943	-0,0003654	0	0	0	0
35	40	0,9964282	-0,2404254	0	0	0,0726	0,0450
36	41	0,9278024	-2,3685208	0	0	0,4224	0,2618
37	42	0,9960185	-0,2041409	0	0	0,0641	0,0545

No.	*Bus*	V	phase	P (gen)	Q (gen)	P (beban)	Q (beban)
		[p.u.]	[^{O}]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
37	42	0,9960185	-0,2041409	0	0	0,0641	0,0545
38	43	0,9971983	-0,1915569	0	0	0,0460	0,0285
39	44	0,9819809	-1,1926130	0	0	0,3127	0,1938
40	45	0,9447765	-4,5328074	0	0	0,2019	0,1251
41	46	0,9999946	0,0021320	0	0	0	0
42	46(twt)	0,9999950	0,0026804	0	0	0	0
43	47	0,9999946	0,0020785	0	0	0	0
44	47(twt)	0,9999950	0,0026625	0	0	0	0
45	48	0,9999953	0,0010142	0	0	0	0
46	48(twt)	0,9999949	0,0004428	0	0	0	0
47	49	0,9999953	0,0009985	0	0	0	0
48	49(twt)	0,9999949	0,0004375	0	0	0	0
49	5	1	0,0032068	0,325	0,40460	0	0
50	6	1	0,0034909	0,8	0,40309	0	0
51	7	1	0,0033735	0,8	0,50157	0	0
52	8	1	0,0033735	0,8	0,50157	0	0
53	9	1	0,0011571	0,8	0,47369	0	0

(sumber: hasil simulasi, detail rincian terlampir)

Dari data aliran daya tersebut dapat ditunjukkan bahwa:

Total pembangkitan : P = 5.7377 p.u. Total beban : P = 5.7077 p.u.

Q = 3.855 p.u. Q = 3.7319 p.u.

Total rugi – rugi : P = 0.02998 p.u.

Q = 0.12311 p.u.

Dari simulasi diatas diketahui bahwa besar rugi-rugi pada *module-1* adalah 0,02998 p.u atau 0,4684 MW dengan rugi reaktif sebesar 0,12311 p.u atau 1,9235 MVAR. Selain itu, tegangan yang ditampilkan pada simulasi tersebut memiliki rentang mulai dari 0.920 - 1 p.u. dan tidak melebihi batas yang ditentukan seperti pada penjelasan sebelumnya yaitu +5 % (1.05 p.u.) dan -10% (0.90 p.u.) dari tegangan nominal yaitu 1 p.u. Selain itu, dari tabel diatas dapat diketahui bahwa tegangan pada bus 41 bernilai kurang dari 0.95 p.u atau dibawah -5%, Hal ini disebabkan oleh adanya beban berupa 2 unit *Motor Cooling Water Pump* yang menyerap daya cukup besar yaitu 3,3 MW/unit.

Pada analisis diatas dapat kita ketahui besar aliran daya yang mengalir pada sistem *module-1* seperti yang tercantum pada tabel 4.15.

Tabel 4.15 Aliran Daya Pada Sistem *Module-1*

Dari	Ke	Saluran	P [p.u.]	Q [p.u.]	P (MW)	Q (MVAR)
Bus 1	*Bus 38*	39	0,05673	0,0417	0,8864	0,6515
Bus 4	*Bus 38*	40	0,14579	0,09328	2,2765	1,4575
Bus 46	*Bus 47*	1	0,00482	-0,00007	0,0753	-0,001093
Bus 47	*Bus 48*	3	0,10643	-0,00412	1,6625	-0,06437
Bus 49	*Bus 48*	4	0,00701	-0,00025	0,1095	-0,003906
Bus 46	*Bus 49*	2	0,0906	-0,0034	1,4156	-0,053125

Sumber : Hasil Simulasi

4.3.2 Simulasi Aliran Daya *Captive Module-2*

Pada simulasi aliran daya captive *Module-1* ini ditentukan bahwa bus-59 adalah *Slack Bus* dengan tegangan 1 p.u$\angle 0°$ sedangkan bus-54 s.d. bus-60 merupakan *PV bus* dengan daya keluaran bervariasi (lihat tabel). Sedangkan untuk data saluran dan bus beban dapat dilihat pada tabel 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 dan 4.13. Dari hasil simulasi aliran daya di *Module-2* diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Data Simulasi *Captive Module-2*

No.	*Bus*	V	phase	P gen	Q gen	P *(beban)*	Q *(beban)*
		[p.u.]	[^{o}]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
1	50	0,99999	-0,00225	0	0	0	0
2	51	1	-0,00097	0	0	0	0
3	52	1	-0,00014	0	0	0	0
4	53	1	-0,00045	0	0	0	0
5	54	1	-0,00177	0,8	0,67420	0	0
6	55	1	-0,00050	0,8	0,45976	0	0
7	56	1	-0,00050	0,8	0,45976	0	0
8	57	1	0,00034	0,8	0,46710	0	0
9	58	1	0,00034	0,8	0,46710	0	0
10	59	1	0,00000	0,75188	0,48920	0	0
11	60	1	0,00003	0,8	0,48904	0	0
12	61	0,99776	-0,15534	0	0	0,036350	0,022530
13	62	0,98967	-0,70615	0	0	0,237820	0,147390
14	63	0,99900	-0,09331	0	0	0,211200	0,130890
15	64	0,98868	-0,78236	0	0	0,254350	0,157630
16	65	0,98823	-0,80273	0	0	0,268900	0,166700
17	66	0,99792	-0,10657	0	0	0,026726	0,022710
18	67	0,99457	-0,37196	0	0	0,125900	0,078060
19	68	0,99843	-0,14452	0	0	0,422440	0,261800
20	69	0,99375	-0,43362	0	0	0,141800	0,087880
21	70	0,97665	-1,59264	0	0	0,502300	0,311350
22	71	0,99236	-0,52256	0	0	0,174010	0,107840
23	72	0,99198	-0,54808	0	0	0,188270	0,116680

No.	*Bus*	V	phase	P gen	Q gen	P (beban)	Q (beban)
		[p.u.]	[^{O}]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
24	73	0,99446	-0,38223	0	0	0,123840	0,076750
25	74	0,99611	-0,26643	0	0	0,090300	0,055960
26	75	0,99970	-0,02764	0	0	0,844800	0,523500
27	76	0,99112	-0,60501	0	0	0,179200	0,111090
28	77	0,99808	-0,13650	0	0	0,040890	0,025340
29	78	0,99446	-0,37927	0	0	0,130490	0,080870
30	79	0,98990	-0,69553	0	0	0,232890	0,144330
31	80	0,99712	-0,19716	0	0	0,068090	0,042200
32	81	0,99969	-0,02819	0	0	0,844800	0,523500
33	82	0,98944	-0,71979	0	0	0,216060	0,133900
34	83	0,99872	-0,09130	0	0	0,027260	0,016890
35	84	0,99647	-0,26498	0	0	0,058290	0,036128
36	85	0,99726	-0,22366	0	0	0,026880	0,016660
37	86	0,99839	-0,11470	0	0	0,030900	0,019150
38	87	0,99806	-0,13710	0	0	0,038640	0,023930
39	88	0,99999	-0,00122	0	0	0	0
40	88(twt)	0,99999	-0,00148	0	0	0	0
41	89	0,99999	-0,00120	0	0	0	0
42	89(twt)	0,99999	-0,00147	0	0	0	0
43	90	0,99999	-0,00070	0	0	0	0
44	90(twt)	0,99999	-0,00043	0	0	0	0
45	91	0,99999	-0,00069	0	0	0	0
46	91(twt)	0,99999	-0,00042	0	0	0	0

(sumber: hasil simulasi, detail rincian terlampir)

Dari data aliran daya tersebut dapat ditunjukkan bahwa:

Total pembangkitan : P = 5.5521 p.u.

Q = 3.5091 p.u.

Total beban : P = 5.5436 p.u.

Q = 3.4419 p.u.

Total rugi – rugi : P = 0.00849 p.u.

Q = 0.06719 p.u.

Dari simulasi diatas diketahui bahwa besar rugi-rugi pada *module-2* adalah 0,00849 p.u atau 0,1326 MW dengan rugi reaktif sebesar 0,06719 p.u atau 1,049 MVAR. Selain itu, tegangan yang ditampilkan pada simulasi tersebut memiliki rentang mulai dari 0.970 - 1 p.u. dan tidak melebihi batas yang ditentukan seperti pada penjelasan sebelumnya yaitu +5 % (1.05 p.u.) dan -10% (0.90 p.u.) dari tegangan nominal yaitu 13,8 kV (1 p.u.).

Pada analisis diatas dapat kita ketahui besar aliran daya yang mengalir pada sistem *module-1* seperti yang tercantum pada tabel 4.17.

Tabel 4.17 Aliran Daya Pada Sistem *Module-2*

Dari	Ke	Saluran	P [p.u.]	Q [p.u.]	P (MW)	Q (MVAR)
Bus 89	*Bus 88*	1	0.01262	-0.00007	0,1971	-0,00109
Bus 91	*Bus 88*	2	0.04272	-0.00041	0.6675	-0,00640
Bus 90	*Bus 89*	3	0.05019	-0.00054	0.7842	-0,00843
Bus 91	*Bus 90*	4	0.0033	-0.00003	0,0515	-0,00046

(sumber: hasil simulasi)

4.3.3 Simulasi Aliran Daya Interkoneksi

Pada simulasi aliran daya interkoneksi ini, *Module-1* dan *Module-2* dihubungkan agar dapat mengetahui besarnya aliran daya yang mengalir diantara keduanya. Pada simulasi ini ditentukan bahwa bus-11 adalah *Slack Bus* dengan tegangan 1 p.u$\angle 0°$ sedangkan bus 5 s.d. 12 dan 54 s.d. 60 merupakan *PV bus* dengan daya keluaran bervariasi (lihat tabel). Sedangkan untuk bus beban dapat dilihat pada tabel 4.13. Dari hasil simulasi aliran daya interkoneksi diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.18. Hasil simulasi aliran daya pada tabel 4.18 menunjukkan bahwa daya yang dibangkitkan generator pada *Bus Generator* tidak jauh berbeda dengan daya generator pada kondisi awal. Hal ini menunjukkan bahwa interkoneksi yang dilakukan tidak mengakibatkan pembebanan yang melebihi kapasitas bus generator.

Tabel 4.18 Data Simulasi Interkoneksi

No.	*Bus*	V	phase	P gen	Q gen	P (beban)	Q (beban)
		[p.u.]	[^{O}]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
1	1	0,999996	0,003449	0	0	0	0
2	10	1	0,001325	0,8	0,47387	0	0
3	11	1	0,000000	0.56459	0.55077	0	0
4	12	1	0,000141	0,8	0,55002	0	0
5	13	0,986422	0,001668	0	0	0,02953	0,18300
6	14	0,997563	-0,163651	0	0	0,05742	0,03558
7	15	0,992624	-0,501131	0	0	0,16490	0,10220
8	16	0,999673	-0,026118	0	0	0,42244	0,26180
9	17	0,999487	-0,030379	0	0	0,00909	0,00563
10	18	0,989109	-0,715305	0	0	0,19114	0,11846
11	19	0,999259	-0,047628	0	0	0,01357	0,00841
12	2	0,999995	0,003332	0	0	0	0
13	20	0,994988	-0,327593	0	0	0,09087	0,05632
14	21	0,996070	-0,266040	0	0	0,09242	0,05728

No.	*Bus*	V	phase	P gen	Q gen	P (beban)	Q (beban)
		[p.u.]	[^{O}]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
15	22	0,967737	-2,157860	0	0	0,23872	0,14795
16	23	0,999662	-0,025725	0	0	0,42244	0,26180
17	24	0,995401	-0,221923	0	0	0,06414	0,05452
18	25	0,995047	-0,338387	0	0	0,09061	0,05615
19	26	0,995924	-0,268499	0	0	0,07270	0,04505
20	27	0,998813	-0,079801	0	0	0,02726	0,01689
21	28	0,992495	-0,512591	0	0	0,16523	0,10240
22	29	0,999690	-0,027124	0	0	0,42244	0,26180
23	3	0,999995	0,000847	0	0	0	0
24	30	0,995542	-0,303110	0	0	0,09817	0,06118
25	31	0,985503	-0,993149	0	0	0,26103	0,16177
26	32	0,999720	-0,024377	0	0	0,42244	0,26180
27	33	0,997018	-0,197363	0	0	0,05452	0,03379
28	34	0,998397	-0,109249	0	0	0,03635	0,02253
29	35	0,993088	-0,473241	0	0	0,15330	0,09501
30	36	0,999368	-0,056957	0	0	0,63366	0,39271
31	37	0,985553	-0,983856	0	0	0,31272	0,19381
32	38	0,956306	-3,707576	0	0	0	0
33	39	0,997765	-0,105150	0	0	0,04089	0,02534
34	4	0,999994	-0,000337	0	0	0	0
35	40	0,996428	-0,239989	0	0	0,07264	0,04502
36	41	0,927802	-2,368085	0	0	0,42244	0,26180
37	42	0,996018	-0,203705	0	0	0,06414	0,05452
38	43	0,997198	-0,191389	0	0	0,04595	0,02848
39	44	0,981981	-1,192584	0	0	0,31270	0,19381
40	45	0,944776	-4,532665	0	0	0,20186	0,12511
41	46	0,999995	0,002605	0	0	0	0
42	46(twt)	0,999995	0,003129	0	0	0	0
43	47	0,999995	0,002479	0	0	0	0
44	47(twt)	0,999995	0,003087	0	0	0	0
45	48	0,999995	0,001307	0	0	0	0
46	48(twt)	0,999995	0,000606	0	0	0	0
47	49	0,999995	0,001318	0	0	0	0
48	49(twt)	0,999995	0,000610	0	0	0	0
49	5	1	0,003643	0,325	0,40483	0	0
50	50	0,999993	0,000275	0	0	0	0
51	51	0,999995	0,001549	0	0	0	0
52	52	0,999995	0,002608	0	0	0	0

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

No.	*Bus*	V	phase	P gen	Q gen	P (beban)	Q (beban)
		[p.u.]	[^{O}]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
53	53	0,999995	0,002435	0	0	0	0
54	54	1	0,000752	0,8	0,67384	0	0
55	55	1	0,002026	0,8	0,45957	0	0
56	56	1	0,002026	0,8	0,45957	0	0
57	57	1	0,003085	0,8	0,46687	0	0
58	58	1	0,003085	0,8	0,46687	0	0
59	59	1	0,002912	0,8	0,48710	0	0
60	6	1	0,003927	0,8	0,40332	0	0
61	60	1	0,002912	0,8	0,48710	0	0
62	61	0,997757	-0,152821	0	0	0,03635	0,02253
63	62	0,989669	-0,703629	0	0	0,23782	0,14739
64	63	0,998998	-0,090791	0	0	0,21120	0,13089
65	64	0,988677	-0,779838	0	0	0,25435	0,15763
66	65	0,988235	-0,800211	0	0	0,26890	0,16670
67	66	0,997917	-0,104044	0	0	0,02673	0,02271
68	67	0,994571	-0,369438	0	0	0,12590	0,07806
69	68	0,998428	-0,141995	0	0	0,42244	0,26180
70	69	0,993748	-0,431102	0	0	0,14180	0,08788
71	7	1	0,003810	0,8	0,50180	0	0
72	70	0,976648	-1,590116	0	0	0,50230	0,31135
73	71	0,992363	-0,520036	0	0	0,17401	0,10784
74	72	0,991978	-0,545330	0	0	0,18827	0,11668
75	73	0,994461	-0,379482	0	0	0,12384	0,07675
76	74	0,996106	-0,263687	0	0	0,09030	0,05596
77	75	0,999695	-0,024893	0	0	0,84480	0,52350
78	76	0,991124	-0,602266	0	0	0,17920	0,11109
79	77	0,998082	-0,133750	0	0	0,04089	0,02534
80	78	0,994462	-0,376390	0	0	0,13049	0,08087
81	79	0,989900	-0,692642	0	0	0,23289	0,14433
82	8	1	0,003810	0,8	0,50180	0	0
83	80	0,997125	-0,194279	0	0	0,06809	0,04220
84	81	0,999693	-0,025310	0	0	0,84480	0,52350
85	82	0,989439	-0,716903	0	0	0,21606	0,13390
86	83	0,998721	-0,088414	0	0	0,02726	0,01689
87	84	0,996468	-0,262459	0	0	0,05829	0,03613
88	85	0,997263	-0,221140	0	0	0,02688	0,01666
89	86	0,998389	-0,111950	0	0	0,03090	0,01915
90	87	0,998059	-0,134218	0	0	0,03864	0,02393
91	88	0,999995	0,001273	0	0	0	0
92	88(twt)	0,999994	0,001032	0	0	0	0

No.	*Bus*	V	phase	P gen	Q gen	P (beban)	Q (beban)
		[p.u.]	[^{O}]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
93	89	0,999995	0,001349	0	0	0	0
94	89(twt)	0,999994	0,001058	0	0	0	0
95	9	1	0,001325	0,8	0,47387	0	0
96	90	0,999995	0,001926	0	0	0	0
97	90(twt)	0,999995	0,002323	0	0	0	0
98	91	0,999995	0,001901	0	0	0	0
99	91(twt)	0,999995	0,002314	0	0	0	0
100	92	0,999995	0,001606	0	0	0	0
101	93	0,999995	0,001714	0	0	0	0

(sumber: hasil simulasi, detail rincian terlampir)

Dari data aliran daya tersebut dapat ditunjukkan bahwa:

Total pembangkitan : P = 11.2895 p.u. ;Total beban: P = 11.2511 p.u.

Q = 7.3611 p.u. Q = 7.1735 p.u.

Total rugi – rugi : P = 0.03846 p.u.

Q = 0.1876 p.u.

Dari simulasi diatas diketahui bahwa besar rugi-rugi pada sistem interkoneksi ini adalah 0,03846 p.u atau 0,600 MW dengan rugi reaktif sebesar 0,1876 p.u. atau 2,9312 MVAR. Selain itu, tegangan yang ditampilkan pada simulasi tersebut memiliki rentang mulai dari 0.944 - 1 p.u. dan tidak melebihi batas yang ditentukan seperti pada penjelasan sebelumnya yaitu +5 % (1.05 p.u.) dan -10% (0.90 p.u.) dari tegangan nominal yaitu 1 p.u.

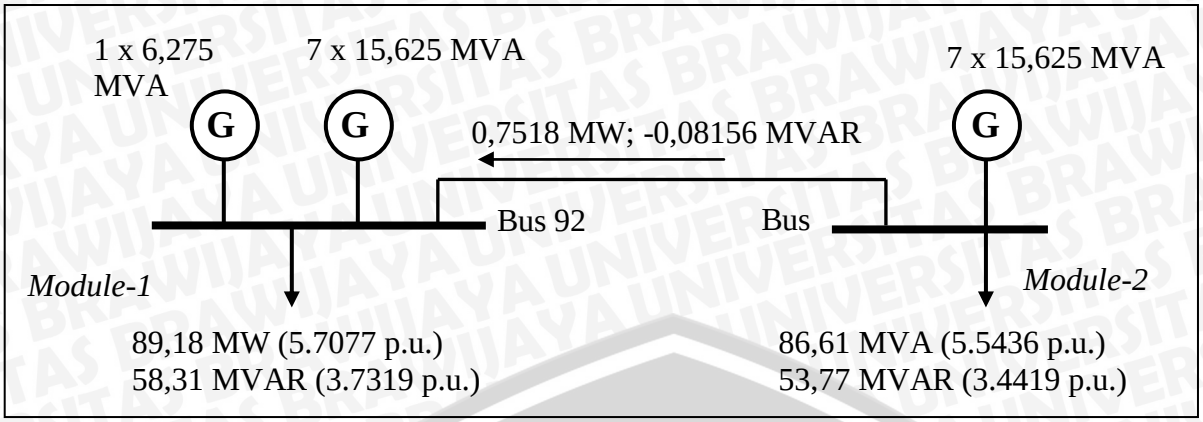
Dari hasil analisis juga diperoleh data mengenai aliran daya pada saluran interkoneksi yang tercantum pada Tabel 4.19 berikut :

Tabel 4.19 Aliran daya pada saluran interkoneksi

Dari	Ke	Saluran	P [p.u.]	Q [p.u.]	P (MW)	Q (MVAR)
Bus 46	*Bus 47*	1	0.01137	-0.00031	0,1775	-0,00484
Bus 46	*Bus 92*	2	0.0798	-0.00221	1,2468	-0,03453
Bus 47	*Bus 48*	3	0.11714	-0.00438	1,8303	-0,06843
Bus 49	*Bus 48*	4	0.00482	-0.00131	0,0753	-0,02046
Bus 92	*Bus 49*	76	0.12801	-0.00743	2,0	-0,1160
Bus 89	*Bus 88*	5	0.00686	-0.00014	0,1071	-0,00218
Bus 93	*Bus 88*	6	0.03521	0.00047	0.5468	0,00734
Bus 90	*Bus 89*	7	0.0577	-0.00070	0.9015	-0,01093
Bus 90	*Bus 91*	8	0.01136	-0.00169	0,1775	-0,02640
Bus 91	*Bus 93*	78	0.08334	-0.00475	1,3021	-0,07421
Bus 93	*Bus 92*	77	0.04812	-0.00522	0,7518	-0,08156

(sumber: hasil simulasi, detail rincian terlampir)

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar 4.5 Aliran Daya Pada Saluran Interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

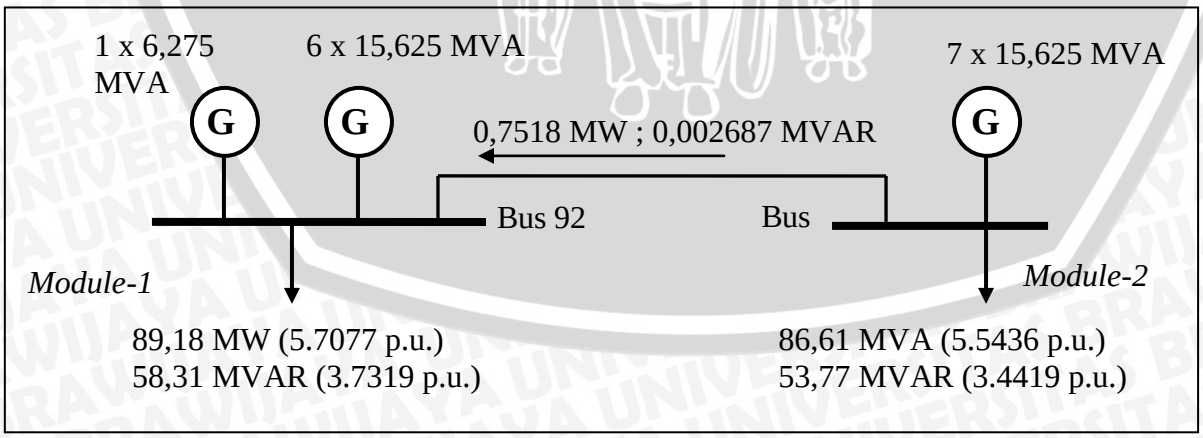
Single-line diagram interkoneksi pada gambar 4.4 dapat disederhanakan untuk mempermudah analisis. Hasil penyederhanaan gambar 4.4 dapat dilihat pada gambar 4.5. dari gambar tersebut diketahui bahwa aliran daya mengalir dari *module-2* ke *module-1* dengan daya sebesar 0,7489 MW.

- **Aliran Daya Saat Generator G-2 Kondisi Mati (Off)**

Pada simulasi ini, generator G-2 dianggap tidak bekerja atau mati sedangkan generator lainnya bekerja, Dari hasil analisis ini diperoleh data mengenai aliran daya pada saluran interkoneksi saat generator G-2 dalam keadaan mati yang tercantum pada Tabel 4.20 berikut:

Tabel 4.20 Aliran daya pada saluran interkoneksi saat Generator G-2 mati

Dari	Ke	Saluran	P [p.u.]	Q [p.u.]
Bus 93	Bus 92	77	0.04812	0.00172



Gambar 4.6 Aliran Daya Pada Saluran Interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

Dari simulasi diatas diketahui bahwa besar aliran daya yang mengalir dari *module-2* ke *module-1* ketika generator G-2 tidak bekerja atau mati adalah sebesar 0,7496 MVA.

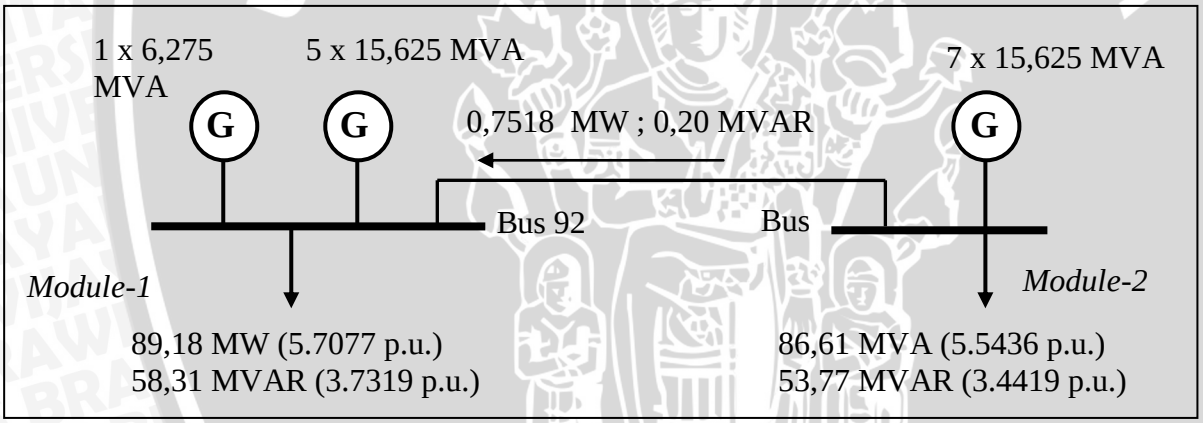
- **Aliran Daya Saat Generator G-2 dan G-4 Kondisi Mati (Off)**

Pada simulasi ini, generator G-2 dan G-4 dianggap tidak bekerja atau mati, Dari hasil analisis ini diperoleh data mengenai aliran daya pada saluran interkoneksi saat generator tersebut dalam keadaan mati yang tercantum pada Tabel 4.21 berikut :

Tabel 4.21 Aliran daya pada saluran interkoneksi Saat Generator G-2 dan G-4 mati

Dari	Ke	Saluran	P [p.u.]	Q [p.u.]
Bus 93	Bus 92	77	0.04812	0.01284

Dari simulasi diatas diketahui bahwa besar aliran daya yang mengalir dari *module-2* ke *module-1* ketika generator G-2 dan G-4 tidak bekerja atau mati adalah sebesar 0,7891 MVA.



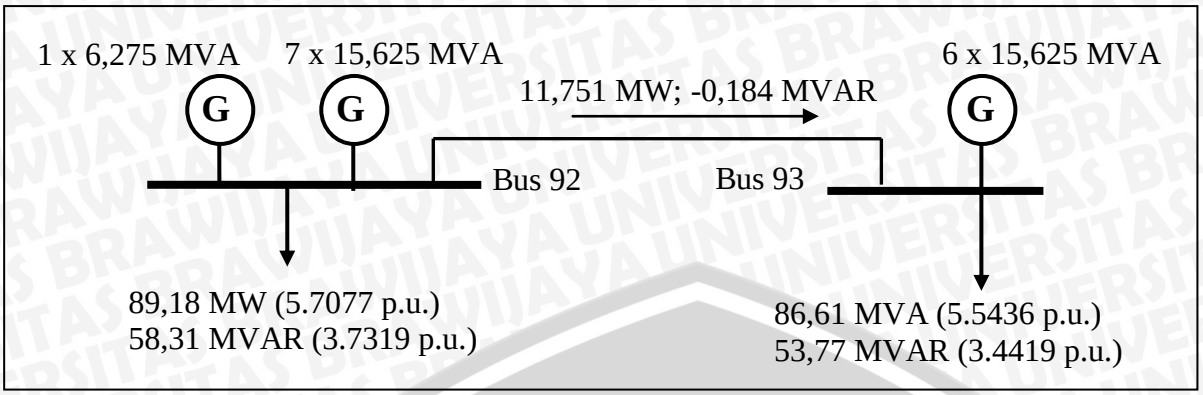
Gambar 4.7 Aliran Daya Pada Saluran Interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

- **Aliran Daya Saat Generator G-11 Kondisi Mati (Off)**

Pada simulasi ini, generator G-11 dianggap tidak bekerja atau mati, Dari hasil analisis ini diperoleh data mengenai aliran daya pada saluran interkoneksi saat generator tersebut dalam keadaan mati yang tercantum pada Tabel 4.22 berikut:

Tabel 4.22 Aliran daya pada saluran interkoneksi Saat Generator G-11 mati

Dari	Ke	Saluran	P [p.u.]	Q [p.u.]
Bus 92	Bus 93	77	0.75208	-0.01183



Gambar 4.8 Aliran Daya Pada Saluran Interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

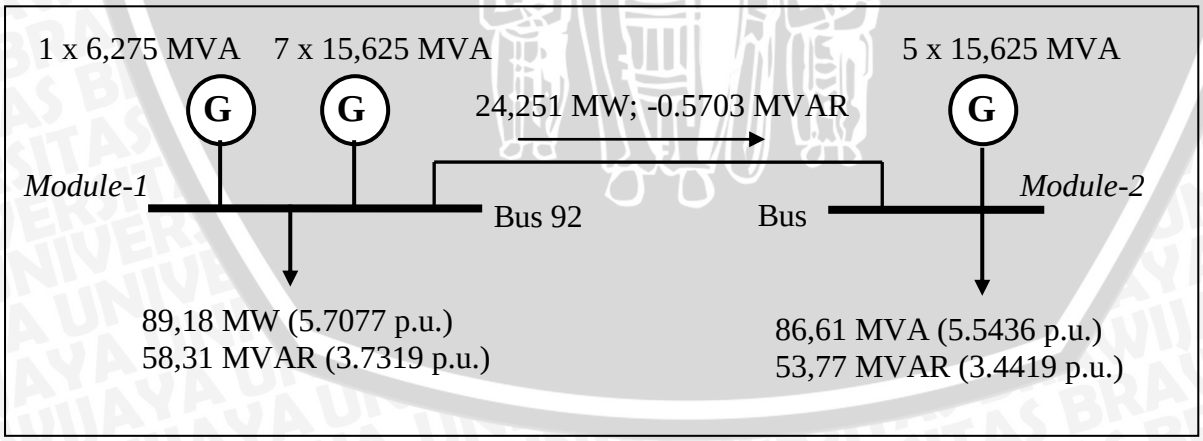
Dari simulasi diatas diketahui bahwa besar aliran daya yang mengalir dari *module-1* ke *module-1* ketika generator G-11 tidak bekerja atau mati adalah sebesar 11,785 MVA

- **Aliran Daya Saat Generator G-11 & G-14 Kondisi Mati (*Off*)**

Pada simulasi ini, generator G-11 & G-14 dianggap tidak bekerja atau mati, Dari hasil analisis ini diperoleh data mengenai aliran daya pada saluran interkoneksi saat generator tersebut dalam keadaan mati yang tercantum pada Tabel 4.23 berikut:

Tabel 4.23 Aliran daya pada saluran interkoneksi Saat Generator G-11 dan G-14 mati

Dari	Ke	Saluran	P [p.u.]	Q [p.u.]
Bus 92	Bus 93	77	1.5521	-
0.03655				



Gambar 4.9 Aliran Daya Pada Saluran Interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

Dari simulasi diatas diketahui bahwa besar aliran daya yang mengalir dari *module-1* ke *module-2* ketika generator G-11 dan G-14 tidak bekerja atau mati adalah sebesar 24,577 MVA.

- Perbandingan Aliran Daya

No.	Aliran Daya	Arah Aliran Daya	P [p.u.]	Q [p.u.]	Daya (MW)	Daya (MVAR)
1.	Saat Normal (G-1 s.d G-15) Aktif	Dari *M-2* ke *M-1*	0.04812	-0.00522	0,7518	-0,08156
2.	Saat G-2 Tidak Aktif	Dari *M-2* ke *M-1*	0.04812	0.00172	0,7518	0,002687
3.	Saat G-2 & G-4 Tidak Aktif	Dari *M-2* ke *M-1*	0.04812	0.01284	0,7518	0,20
4.	Saat G-11 Tidak Aktif	Dari *M-1* ke *M-2*	0.75208	-0.01183	11,751	-0,184
5.	Saat G-11 & G-14 Tidak Aktif	Dari *M-1* ke *M-2*	1.5521	-0.03655	24,251	-0,5703

Dimana, *G= Generator, M= Module*

Dari hasil analisa diatas diketahui bahwa daya terbesar yang melalui saluran interkoneksi tersebut ialah sebesar 24,251 MW atau setara dengan 24,576 MVA dengan arus sebesar 411,3 A dengan level tegangan 34500 V (34,5 kV). Dengan besarnya arus yang mengalir maka konduktor yang cocok untuk saluran tersebut ialah tipe kabel tanah berinti tunggal berpenghantar tembaga berisolasi kertas yang dipasang berjajar pada sistem arus tiga fase dengan luas penampang nominal sebesar 400 mm^2 dan diletakan didalam atau dibawah tanah (*underground*) seperti yang ditertera pada tabel gambar 4.10.

Pemilihan konduktor bawah tanah (*underground*) dipilih berdasarkan penilaian dari faktor keamanan dikarenakan lingkungan kelistrikan berada pada kilang minyak dan gas bumi.

Tabel 710-25A

KHA terus menerus dari 3 kabel tanah berinti tunggal berpenghantar tembaga berisolasi kertas yang dipasang berjajar pada suatu sistem arus fase tiga pada suhu keliling 30°C

Jenis kabel	Penampang nominal (mm²)	U=0,6/1 kV dan U=3,6/6 kV		U=6/10 kV		U=8,7/15 kV dan 12/20 kV		U=18/30 kV		U=36/60kV	
		KHA terus menerus dalam Ampere									
		Di tanah	Di udara	Di tanah	Di udara	Di tanah	Di udara	Di tanah	Di udara	Di tanah	Di udara
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Semua jenis kabel berinti tunggal dan berpelindung timbel (K) berpenghantar tembaga berisolasi kertas.	16	113	120	102	105	-	-	-	-	-	-
	25	150	160	133	145	123	135	-	.	-	-
	35	182	200	160	175	145	165	134	150	-	-
	50	213	245	191	215	176	200	160	180	-	-
	70	263	310	235	-	215	250	200	230	-	-
	95	309	370	280	330	255	300	234	275	208	240
	120	354	430	315	380	290	350	269	320	233	275
	150	400	500	356	440	325	400	300	360	263	315
	185	436	560	400	500	360	455	334	410	293	355
	240	500	660	453	580	413	530	378	475	331	410
	300	555	750	498	660	457	600	421	540	365	460
	400	637	880	569	770	519	700	478	630	416	530
	500	700	990	623	870	572	780	522	700	-	-

Catatan : KHA kabel tanah ini dihitung berdasarkan kondisi tersebut dalam Ayat 710.E.2 dan 710.E.4.

Gambar 4.10 Tabel Konduktor
Sumber : PUIL Indonesia 1987

4.4 Reaktansi Sistem Sebelum, Saat, dan Setelah Gangguan

4.4.1 Reaktansi Saluran Sebelum Gangguan

Sebelum menganalisa gangguan lebih jauh, kita tentukan terlebih dahulu reaktansi total rangkaian pada gambar 4.5 dan data saluran pada tabel 4.24.

Tabel 4.24 Tabel reaktansi saluran interkoneksi

Dari-	Ke-	Panjang Saluran (Km)	Reaktansi Saluran (p.u.)
1	36	2,405	0,017620
1	13	0,23	0,001690
1	14	0,295	0,032086
1	15	1	0,021956
1	16	3,782	0,027710
1	17	0,213	0,137560
1	18	3,604	0,026410
2	19	2,405	0,017620
2	20	0,164	0,001200
2	21	0,279	0,031940
2	22	1	0,008810
2	23	3,857	0,028260

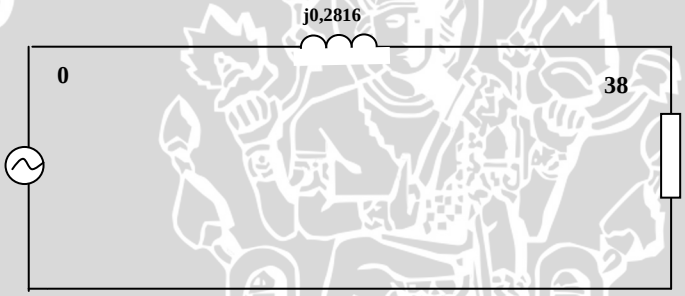
Dari-	Ke-	Panjang Saluran (Km)	Reaktansi Saluran (p.u.)
2	24	0,197	0,135440
2	25	3,729	0,027320
3	26	0,32	0,002340
3	27	0,295	0,073510
3	28	1	0,022180
3	29	3,782	0,027710
3	30	0,213	0,016360
3	31	1,5	0,012920
3	32	2,14	0,016720
4	33	0,164	0,001200
4	34	0,279	0,074240
4	35	1	0,022030
4	36	3,867	0,028330
4	37	1,197	0,023700
4	38	1,5	0,164980
4	39	2,14	0,010990
50	61	0,205	0,078616
50	62	0,23	0,016140
50	63	1,215	0,017360
50	64	1,782	0,024190
50	65	0,213	0,025760
51	66	0,276	0,015900
51	67	0,241	0,076860
51	68	2,164	0,016220
51	69	1,279	0,016370
51	70	1	0,024660
51	71	0,257	0,019220
52	72	0,295	0,016570
52	73	1	0,016430
52	74	0,216	0,022710
52	75	0,213	0,016080
52	76	0,214	0,001610
52	77	3,604	0,018060
53	78	0,295	0,044340
53	79	1	0,016430
53	80	0,216	0,022150
53	81	0,213	0,015800
53	82	0,214	0,001610

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Dari-	Ke-	Panjang Saluran (Km)	Reaktansi Saluran (p.u.)
53	83	3,604	0,043890
46	47	0,4	0,000586
47	48	0,4	0,000557
48	49	0,4	0,000238
46	92	0,4	0,000557
92	93	0,4	0,000557
82	89	0,4	0,000557
89	90	0,4	0,000238
90	91	0,4	0,000557
91	93	0,4	0,000557

Sumber: hasil perhitungan

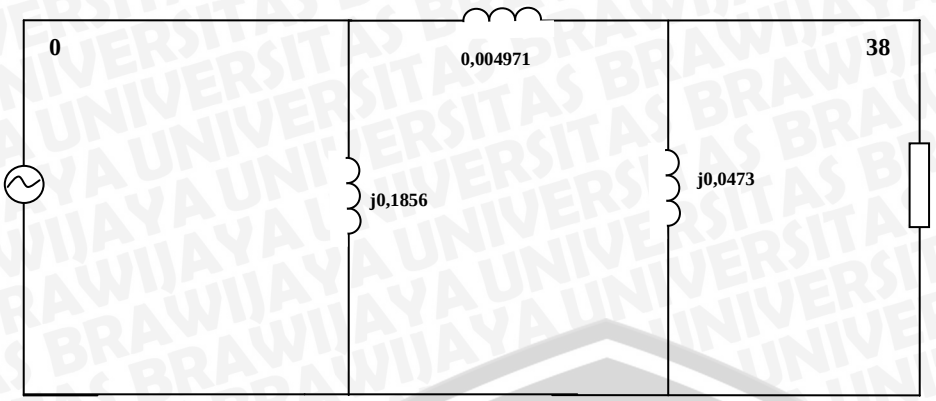
Setelah melakukan transformasi dengan menggunakan transformasi *delta-wye (Δ-Y)* maupun *wye-delta (Y-Δ)* sesuai dengan yang tercantum dalam (Grainger dan Stevenson, 1994: 22), maka didapatkan nilai reaktansi total sebelum gangguan yaitu sebesar 0,2816 p.u.



Gambar 4.11 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.2 sebelum gangguan
Sumber : Hasil perhitungan

4.4.2 Reaktansi Saluran Saat Gangguan

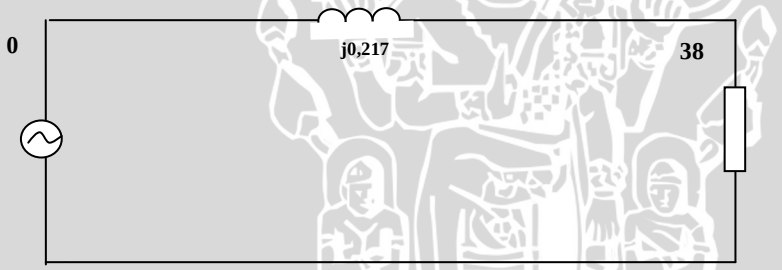
Seperti pada gambar 4.5, gangguan terjadi pada *bus* 53 dan menyebabkan hubung singkat pada *bus* tersebut. Setelah melakukan transformasi dengan menggunakan transformasi *delta-wye (Δ-Y)* maupun *wye-delta (Y-Δ)* sesuai dengan yang tercantum dalam (Grainger dan Stevenson, 1994: 22), maka didapatkan nilai reaktansi total sebelum gangguan yaitu sebesar 0,004971 p.u.



Gambar 4.12 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.2 selama gangguan
Sumber : Hasil perhitungan

4.4.3 Reaktansi Saluran Setelah Gangguan

Seperti pada gambar 4.5, setelah terjadi gangguan. Setelah melakukan transformasi dengan menggunakan transformasi *delta-wye (Δ-Y)* maupun *wye-delta (Y-Δ)* sesuai dengan yang tercantum dalam (Grainger dan Stevenson, 1994: 22), maka didapatkan nilai reaktansi total sebelum gangguan yaitu sebesar 0,217 p.u.



Gambar 4.13 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.2 setelah gangguan
Sumber : Hasil perhitungan

4.5 Persamaan Sudut Daya

Perhitungan tegangan dalam peralihan generator akan dilakukan menggunakan persamaan 4-2 (Grainger dan Stevenson, 1994: 102) berikut:

$$E' = V_t + jX'_d . I_t \qquad (4\text{-}2)$$

4.5.1 Generator G-2

Daya generator G-2 diperoleh berdasarkan Tabel 4.18, yaitu nilai daya pada bus 6 :

$(P_1 - jQ_1) = 0{,}8 - j\,0{,}40332$

Selanjutnya nilai daya tersebut digunakan untuk menghitung arus keluaran dari generator, sehingga:

$$\begin{aligned} I_t &= \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} \\ &= \frac{0{,}8 - j\,0{,}40332}{1 - j0} \\ &= 0{,}8 - j\,0{,}40332 \text{p.u.} \end{aligned}$$

Tegangan dalam peralihan generator adalah:

$$\begin{aligned} E' &= V_1 + jX'_d . I_1 \\ &= 1 + j0{,}28\,.\,(0{,}8 - j\,0{,}40332) \\ &= 1{,}1129 + j\,0{,}224 \text{ p.u.} \\ &= 1{,}1631 \angle 11{,}37° \end{aligned}$$

Selanjutnya persamaan sudut daya pada kondisi sebelum, selama, dan setelah gangguan akan dianalisis menggunakan Persamaan 2-11 :

Daya sebelum gangguan,

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{E_1 . E'}{X_{sebelum\ gangguan}} \sin\delta \\ &= \frac{1\,.\,1{,}1631}{0{,}2816} \sin\delta \\ &= 4{,}13 \sin\delta \end{aligned}$$

Daya selama gangguan,

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{E_1 . E'}{X_{selama\ gangguan}} \sin\delta \\ &= \frac{1\,.\,1{,}1631}{0{,}004971} \sin\delta \\ &= 233{,}97 \sin\delta \end{aligned}$$

Daya setelah gangguan,

$$P_e = \frac{E_1 . E'}{X_{setelah\ gangguan}} \sin\delta$$

$$= \frac{1 . 1{,}1631}{0{,}217} \sin\delta$$

$$= 5{,}359 \sin\delta$$

Nilai δ_0 dan δ_{maks} dapat diperoleh menggunakan persamaan :

$P_e = P_{maks} \sin\delta_0$ dan,

$P_e = r_2 P_{maks} \sin\delta_{maks}$

Sehingga diperoleh,

$$\delta_0 = sin^{-1} \frac{0{,}8}{4{,}13}$$

$$= 11{,}17°$$

$$= 0{,}195\ radian$$

$$\delta_{maks} = \pi - \delta_0$$

$$= 180° - 11{,}17°$$

$$= 168{,}83°$$

$$= 2{,}945\ radian$$

4.5.2 Generator G-8

Daya generator G-8 diperoleh berdasarkan Tabel 4.18, yaitu nilai daya pada bus 12 :

$(P_8 - jQ_8) = 0{,}8 - j0{,}55002$

Selanjutnya nilai daya tersebut digunakan untuk menghitung arus keluaran dari generator, sehingga:

$$I_t = \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*}$$

$$= \frac{0{,}8 - j0{,}55002}{1 - j0}$$

$$= 0{,}8 - j0{,}55002 \quad \text{p.u.}$$

Tegangan dalam peralihan generator adalah :

$$E' = V_1 + jX'_d . I_1$$

$$= 1 + j0{,}28 . (0{,}8 - j0{,}55002)$$

$$= 1{,}154 + j\,0{,}224 \quad \text{p.u.}$$

$$= 1{,}2042 \angle 10{,}98°$$

Selanjutnya persamaan sudut daya pada kondisi sebelum, selama, dan setelah gangguan akan dianalisis menggunakan Persamaan 2-11 :

Daya sebelum gangguan,

$$P_e = \frac{E_1 . E'}{X_{sebelum\ gangguan}} \sin\delta$$

$$= \frac{1\ .\ 1{,}2042}{0{,}2816} \sin\delta$$

$$= 4{,}2762 \sin\delta$$

Daya selama gangguan,

$$P_e = \frac{E_1 . E'}{X_{selama\ gangguan}} \sin\delta$$

$$= \frac{1\ .\ 1{,}2042}{0{,}004971} \sin\delta$$

$$= 242{,}24 \sin\delta$$

Daya setelah gangguan,

$$P_e = \frac{E_1 . E'}{X_{setelah\ gangguan}} \sin\delta$$

$$= \frac{1\ .\ 1{,}2042}{0{,}217} \sin\delta$$

$$= 5{,}5493 \sin\delta$$

Nilai δ_0 dan δ_{maks} dapat diperoleh menggunakan persamaan :

$P_e = P_{maks} \sin\delta_0$ dan,

$P_e = r_2 P_{maks} \sin\delta_{maks}$

Sehingga diperoleh,

$$\delta_0 = sin^{-1} \frac{0{,}8}{4{,}27}$$

$$= 10{,}77°$$

$$= 0{,}188\ radian$$

$$\delta_{maks} = \pi - \delta_0$$

$$= 180° - 10{,}77°$$

$$= 169{,}23°$$

$$= 2{,}952\ radian$$

4.5.3 Generator G-9

Daya generator G-9 diperoleh berdasarkan Tabel 4.18, yaitu nilai daya pada bus 54 :

$(P_1 - jQ_1) = 0.8 - j0{,}67384$

Selanjutnya nilai daya tersebut digunakan untuk menghitung arus keluaran dari generator, sehingga:

$$I_t = \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*}$$

$$= \frac{0.8 - j0{,}67384}{1 - j0}$$

$$= 0.8 - j0{,}67384 \text{p.u.}$$

Tegangan dalam peralihan generator adalah :

$$E' = V_1 + jX'_d . I_1$$

$$= 1 + j0{,}28 . (0.8 - j0{,}67384)$$

$$= 1{,}1886 + j\ 0{,}224 \text{ p.u.}$$

$$= 1{,}2387 \angle 10{,}64°$$

Selanjutnya persamaan sudut daya pada kondisi sebelum, selama, dan setelah gangguan akan dianalisis menggunakan Persamaan 2-11 :

Daya sebelum gangguan,

$$P_e = \frac{E_1 . E'}{X_{sebelum\ gangguan}} \sin\delta$$

$$= \frac{1 . 1{,}2387}{0{,}2818} \sin\delta$$

$$= 4{,}3956 \sin\delta$$

Daya selama gangguan,

$$P_e = \frac{E_1 . E'}{X_{selama\ gangguan}} \sin\delta$$

$$= \frac{1 . 1{,}2387}{0{,}004971} \sin\delta$$

$$= 249{,}18 \sin\delta$$

Daya setelah gangguan,

$$P_e = \frac{E_1 . E'}{X_{setelah\ gangguan}} \sin\delta$$

$$= \frac{1 . 1{,}2387}{0{,}217} \sin\delta$$

$$= 5{,}708 \sin\delta$$

Nilai δ_0 dan δ_{maks} dapat diperoleh menggunakan persamaan :

$P_e = P_{maks} \sin\delta_0$ dan,

$P_e = r_2 P_{maks} \sin\delta_{maks}$

Sehingga diperoleh,

$$\delta_0 = sin^{-1}\frac{0,8}{4,3956}$$
$$= 10,48°$$
$$= 0,1829\ radian$$
$$\delta_{maks} = \pi - \delta_0$$
$$= 180° - 10,48°$$
$$= 169,5285°$$
$$= 2,957\ radian$$

4.5.4 Generator G-14

Daya generator G-14 diperoleh berdasarkan Tabel 4.18, yaitu nilai daya pada bus 58 :

$(P_1 - jQ_1) = 0.8 - j0,46687$

Selanjutnya nilai daya tersebut digunakan untuk menghitung arus keluaran dari generator, sehingga:

$$I_t = \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*}$$
$$= \frac{0.8 - j0,46687}{1 - j0}$$
$$= 0.8 - j0,46687 \text{p.u.}$$

Tegangan dalam peralihan generator adalah :

$$E' = V_1 + jX_d'.I_1$$
$$= 1 + j0,28\,.\,(0.8 - j0,46687)$$
$$= 1,130 + j\,0,224\ \text{p.u.}$$
$$= 1,1801\angle 11,19°$$

Selanjutnya persamaan sudut daya pada kondisi sebelum, selama, dan setelah gangguan akan dianalisis menggunakan Persamaan 2-11 :

Daya sebelum gangguan,

$$P_e = \frac{E_1.E'}{X_{sebelum\ gangguan}}\sin\delta$$
$$= \frac{1\,.\,1,1801}{0,2816}\sin\delta$$
$$= 4,190\sin\delta$$

Daya selama gangguan,

$$P_e = \frac{E_1 . E'}{X_{selama\ gangguan}} \sin\delta$$

$$= \frac{1\ .\ 1{,}1801}{0{,}004971} \sin\delta$$

$$= 237{,}39 \sin\delta$$

Daya setelah gangguan,

$$P_e = \frac{E_1 . E'}{X_{setelah\ gangguan}} \sin\delta$$

$$= \frac{1\ .\ 1{,}1801}{0{,}217} \sin\delta$$

$$= 5{,}4382 \sin\delta$$

Nilai δ_0 dan δ_{maks} dapat diperoleh menggunakan persamaan :

$P_e = P_{maks} \sin\delta_0$ dan,

$P_e = r_2 P_{maks} \sin\delta_{maks}$

Sehingga diperoleh,

$$\delta_0 = sin^{-1} \frac{0{,}8}{4{,}19}$$

$$= 11{,}005°$$

$$= 0{,}1919\ radian$$

$$\delta_{maks} = \pi - \delta_0$$

$$= 180° - 11{,}005°$$

$$= 168{,}995°$$

$$= 2{,}948\ radian$$

Variabel – variable persamaan reaktansi dan sudut daya tersebut akan digunakan untuk mengetahui perubahan sudut rotor, frekuensi dan waktu pemutusan kritis.

- **Perhitungan Dengan Metode *Runge-Kutta***

Perhitungan perubahan sudut rotor dan frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah akan dianalisis menggunakan metode *Runge-Kutta*. Perbedaan variable seperti reaktansi, konstanta inersia, sudut minimum dan daya masukan mekanis membuat perubahan sudut rotor dan frekuensi antara generator satu dengan generator yang lain menjadi berbeda. Sebagian proses perhitungan akan dilakukan pada generator G-2 yang mewakili sistem.

Variabel –variabel yang digunakan adalah:

$$\Delta t = 0{,}05\ detik$$

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

ω_s = 314,15 $radian/detik$

ω_0 = 314,15 $radian/detik$

H = 6,0 MJ/MVA

δ_0 = 0,195 $radian$

P_e = 233,97 $\sin\delta$

P_m = 0,8

Berdasarkan variabel – variabel tersebut, akan dilakukan analisis perubahan sudut rotor dan kecepatan sudut generator dengan metode *Runge-Kutta* sebagai berikut:

Pada t = 0,05 detik

Perkiraan pertama:

$$k_1 = (\omega_0 - \omega_s)\,\Delta t$$
$$= (314{,}15 - 314{,}15)\ 0{,}05$$
$$= 0$$
$$P_e^{(1)} = 233{,}97\ \sin\delta_0$$
$$= 233{,}97\ \sin 0{,}1958$$
$$= 0{,}7995$$
$$l_1 = \frac{2\pi f}{2H}\left(P_m - P_e{}^{(1)}\right)\Delta t$$
$$= \frac{2\,.\,3{,}14\,.\,50}{2\ (6)}(0{,}8 - 0{,}7995)\ 0{,}05$$
$$= 0{,}00058$$

Perkiraan kedua:

$$k_2 = \left\{\left(\omega_0 + \frac{l_1}{2}\right) - \omega_s\right\}\Delta t$$
$$= \left\{\left(314{,}15 + \frac{0{,}00058}{2}\right) - 314{,}15\right\}\ 0{,}05$$
$$= 0{,}00001449$$
$$P_e^{(2)} = 233{,}97\ \sin\left(\delta_0 + \frac{k_1}{2}\right)$$
$$= 233{,}97\ \sin\left(0{,}1958 + \frac{0}{2}\right)$$
$$= 0{,}7995$$
$$l_2 = \frac{2\pi f}{2H}\left(P_m - P_e{}^{(2)}\right)\Delta t$$
$$= \frac{2\,.\,3{,}14\,.\,50}{2(6)}(0{,}8 - 0{,}7995)\ 0{,}05$$
$$= 0{,}0005796$$

Perkiraan ketiga:

$$k_3 = \left\{\left(\omega_0 + \frac{l_2}{2}\right) - \omega_s\right\}\Delta t$$

$$= \left\{\left(314{,}15 + \frac{0{,}0005796}{2}\right) - 314{,}15\right\} 0{,}05$$

$$= 0{,}0000145$$

$$P_e^{(3)} = 233{,}97 \ \sin\left(\delta_0 + \frac{k_2}{2}\right)$$

$$= 233{,}97 \ \sin\left(0{,}1958 + \frac{0{,}00001449}{2}\right)$$

$$= 0{,}7996$$

$$l_3 = \frac{2\pi f}{2H}\left(P_m - P_e{}^{(3)}\right)\Delta t$$

$$= \frac{2\,.\,3{,}14\,.\,50}{2\,(6)}(0{,}8 - 0{,}7996)\ 0{,}05$$

$$= 0{,}000549$$

Perkiraan keempat:

$$k_4 = \left\{\left(\omega_0 + \frac{l_3}{2}\right) - \omega_s\right\}\Delta t$$

$$= \left\{\left(314{,}15 + \frac{0{,}000549}{2}\right) - 314{,}15\right\} 0{,}05$$

$$= 0{,}0000135$$

$$P_e^{(4)} = 233{,}97 \ \sin\left(\delta_0 + \frac{k_3}{2}\right)$$

$$= 233{,}97 \ \sin\left(0{,}1958 + \frac{0{,}0000145}{2}\right)$$

$$= 0{,}79959$$

$$l_4 = \frac{2\pi f}{2H}\left(P_m - P_e{}^{(4)}\right)\Delta t$$

$$= \frac{2\,.\,3{,}14\,.\,50}{2(6)}(0{,}8 - 0{,}79959)\ 0{,}05$$

$$= 0{,}0005409$$

diperoleh nilai sudut daya dan kecepatan sudut:

$$\delta_1 = \delta_0 + \frac{1}{6}\,(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) = 0{,}1958\ radian = 11{,}22^0$$

$$\omega_1 = \omega_0 + \frac{1}{6}\,(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) = 314{,}1505\ radian/detik$$

Pada t = 0,1 detik

Perkiraan pertama:

$$k_1 = (\omega_1 - \omega_s)\,\Delta t$$
$$= (314{,}1505 - 314{,}15)\ 0{,}05$$
$$= 0{,}000028$$
$$P_e^{(1)} = 233{,}97\ \sin\delta_1$$
$$= 233{,}97\ \sin 0{,}1958$$
$$= 0{,}7996$$
$$l_1 = \frac{2\pi f}{2H}\left(P_m - P_e{}^{(1)}\right)\Delta t$$
$$= \frac{2\,.\,3{,}14\,.\,50}{2\ (6)}(0{,}8 - 0{,}7996)\ 0{,}05$$
$$= 0{,}000516$$

Perkiraan kedua:

$$k_2 = \left\{\left(\omega_1 + \frac{l_1}{2}\right) - \omega_s\right\}\Delta t$$
$$= \left\{\left(315{,}19 + \frac{0{,}000516}{2}\right) - 314{,}15\right\}\ 0{,}05$$
$$= 0{,}00004091$$
$$P_e^{(2)} = 233{,}97\ \sin\left(\delta_1 + \frac{k_1}{2}\right)$$
$$= 233{,}97\ \sin\left(0{,}1958 + \frac{0{,}000028}{2}\right)$$
$$= 0{,}79966$$
$$l_2 = \frac{2\pi f}{2H}\left(P_m - P_e{}^{(2)}\right)\Delta t$$
$$= \frac{2\,.\,3{,}14\,.\,50}{2(6)}(0{,}8 - 0{,}79966)\ 0{,}05$$
$$= 0{,}0004411$$

Perkiraan ketiga:

$$k_3 = \left\{\left(\omega_1 + \frac{l_2}{2}\right) - \omega_s\right\}\Delta t$$
$$= \left\{\left(315{,}19 + \frac{0{,}0004411}{2}\right) - 314{,}15\right\}\ 0{,}05$$
$$= 0{,}0000390$$

$$P_e^{(3)} = 233{,}97 \ \sin\left(\delta_1 + \frac{k_2}{2}\right)$$
$$= 233{,}97 \ \sin\left(0{,}1958 + \frac{0{,}00004091}{2}\right)$$
$$= 0{,}79969$$
$$l_3 = \frac{2\pi f}{2H}\left(P_m - P_e{}^{(3)}\right)\Delta t$$
$$= \frac{2\,.\,3{,}14\,.\,50}{2(6)}(0{,}8 - 0{,}79969)\ 0{,}05$$
$$= 0{,}0004067$$

Perkiraan keempat:

$$k_4 = \left\{\left(\omega_1 + \frac{l_3}{2}\right) - \omega_s\right\}\Delta t$$
$$= \left\{\left(315{,}19 + \frac{0{,}0004067}{2}\right) - 314{,}15\right\}\ 0{,}05$$
$$= 0{,}0000382$$
$$P_e^{(4)} = 233{,}97 \ \sin\left(\delta_1 + \frac{k_3}{2}\right)$$
$$= 233{,}97 \ \sin\left(0{,}1958 + \frac{0{,}0000390}{2}\right)$$
$$= 0{,}79969$$
$$l_4 = \frac{2\pi f}{2H}\left(P_m - P_e{}^{(4)}\right)\Delta t$$
$$= \frac{2\,.\,3{,}14\,.\,50}{2\ (6)}(0{,}8 - 0{,}79969)\ 0{,}05$$
$$= 0{,}0004117$$

diperoleh nilai sudut daya dan kecepatan sudut:

$$\delta_2 = \delta_1 + \frac{1}{6}\,(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) = 0{,}1959\ radian$$
$$\omega_2 = \omega_1 + \frac{1}{6}\,(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) = 314{,}151\ radian/detik$$

- Perhitungan Sudut Daya Generator G2 dan G-9

No.	Detik	Generator G-2		Generator G-9	
		Radian (rad)	Derajat (^{O})	*Radian (rad)*	Derajat (^{O})
1	0,00	0,1958	11,171	0,1934	11,080
2	0,05	0,1958	11,171	0,1934	11,080
3	0,10	0,1958	11,171	0,1934	11,080
4	0,15	0,1958	11,171	0,1934	11,080
5	0,20	0,1958	11,171	0,1934	11,080
6	0,25	0,1958	11,171	0,1934	11,080
7	0,30	0,1958	11,171	0,1934	11,080
8	0,35	0,1958	11,171	0,1934	11,080
9	0,40	0,1958	11,171	0,1934	11,080

No.	Detik	Generator G-2		Generator G-9	
		Radian (rad)	Derajat (^{o})	*Radian (rad)*	Derajat (^{o})
10	0,45	0,1958	11,171	0,1934	11,080
11	0,50	0,1958	11,171	0,1934	11,080
12	0,55	0,1958	11,171	0,1934	11,080
13	0,60	0,1958	11,171	0,1934	11,080
14	0,65	0,1958	11,171	0,1934	11,080
15	0,70	0,1958	11,171	0,1934	11,080
16	0,75	0,1958	11,171	0,1934	11,080
17	0,80	0,1958	11,171	0,1934	11,080
18	0,85	0,1958	11,171	0,1934	11,080
19	0,90	0,1958	11,171	0,1934	11,080
20	0,95	0,1958	11,171	0,1934	11,080
21	1,00	0,1958	11,171	0,1934	11,080
22	1,05	0,1959	11,221	0,1939	11,112
23	1,10	0,1962	11,243	0,1945	11,144
24	1,15	0,1970	11,287	0,1951	11,180
25	1,20	0,1971	11,291	0,1952	11,182
26	1,25	0,1965	11,260	0,1947	11,154
27	1,30	0,1957	11,213	0,1939	11,107
28	1,35	0,1946	11,151	0,1929	11,055
29	1,40	0,1940	11,114	0,1924	11,021
30	1,45	0,1936	11,093	0,1921	11,004
31	1,50	0,1936	11,090	0,1920	11,003
32	1,55	0,1938	11,106	0,1923	11,019
33	1,60	0,1944	11,138	0,1929	11,052
34	1,65	0,1950	11,172	0,1934	11,082
35	1,70	0,1955	11,202	0,1939	11,110
36	1,75	0,1961	11,233	0,1944	11,139
37	1,80	0,1962	11,244	0,1946	11,147
38	1,85	0,1962	11,242	0,1945	11,143
39	1,90	0,1961	11,238	0,1944	11,139
40	1,95	0,1957	11,212	0,1940	11,113
41	2,00	0,1952	11,186	0,1936	11,091
42	2,05	0,1948	11,164	0,1932	11,069
43	2,10	0,1945	11,145	0,1928	11,049
44	2,15	0,1942	11,128	0,1926	11,036
45	2,20	0,1943	11,133	0,1927	11,041
46	2,25	0,1944	11,137	0,1928	11,046
47	2,30	0,1946	11,150	0,1930	11,058
48	2,35	0,1949	11,167	0,1933	11,075
49	2,40	0,1952	11,185	0,1936	11,092

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

No.	Detik	Generator G-2		Generator G-9	
		Radian (rad)	Derajat (^{O})	Radian (rad)	Derajat (^{O})
50	2,45	0,1954	11,195	0,1937	11,101
51	2,50	0,1956	11,205	0,1939	11,112
52	2,55	0,1956	11,207	0,1939	11,111
53	2,60	0,1955	11,203	0,1939	11,107
54	2,65	0,1954	11,198	0,1938	11,102
55	2,70	0,1952	11,187	0,1936	11,091
56	2,75	0,1951	11,176	0,1934	11,081
57	2,80	0,1949	11,169	0,1933	11,074
58	2,85	0,1948	11,164	0,1932	11,071
59	2,90	0,1948	11,159	0,1931	11,066
60	2,95	0,1948	11,163	0,1932	11,070
61	3,00	0,1949	11,166	0,1933	11,073

Sumber: hasil perhitungan

4.6 Simulasi Sistem Daya

4.6.1 Simulasi Stabilitas Sistem Daya Sebelum Interkoneksi

Simulasi stabilitas ini meliputi dua (2) hal yaitu stabilitas sudut rotor dan frekuensi pada sistem daya *module-1* dan *module-2* di PT Badak NGL Bontang. Sebelum melakukan simulasi terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu pengaturan nilai dasar pada perangkat yang digunakan, pada simulasi yang akan dibahas ini menggunakan frekuensi 50 Hz, daya dasar 15.625 MVA dengan tegangan dasar 13800 V atau 13.8 kV. Waktu gangguan dimulai dari detik ke-1 dengan durasi simulasi selama 20 detik, dan waktu gangguan 0,1 detik. Gangguan yang diberikan ialah gangguan hubung singkat 3 fasa seperti yang telah disebutkan dalam batasan masalah. Selain itu, saat gangguan, batas frekuensi yang dianjuran tidak lebih tinggi dari 52 Hz dan lebih rendah dari 47.5 Hz (Permen ESDM: 2007).

4.6.1.1 Simulasi Stabilitas Sistem Daya Captive *Module-1*

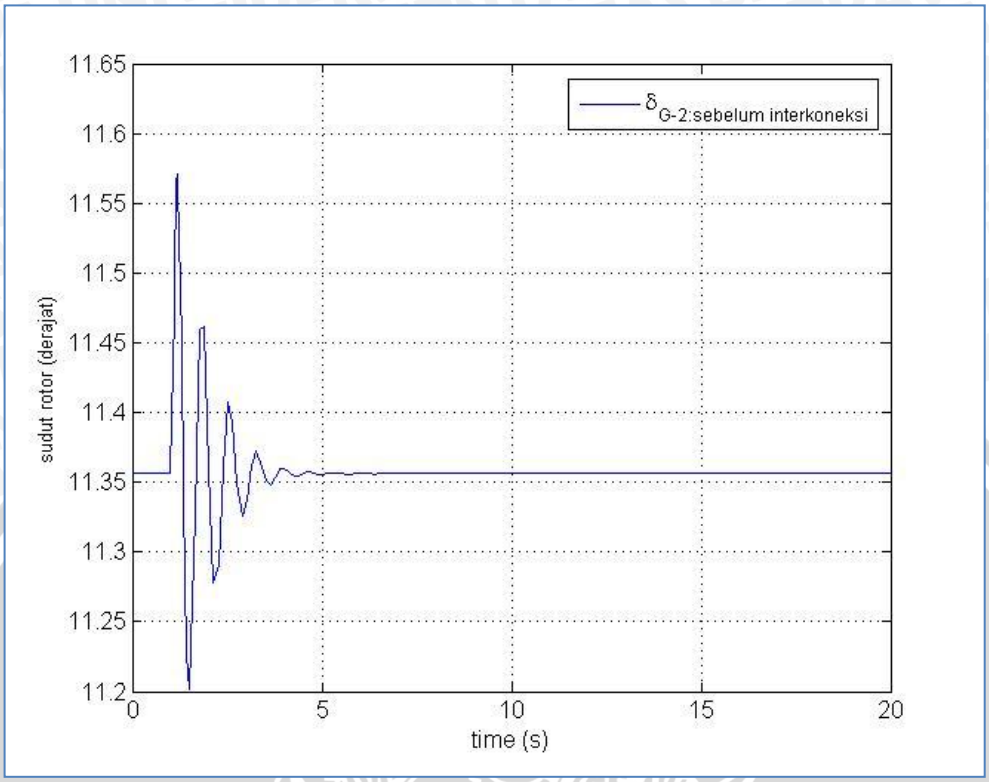
Simulasi stabilitas sistem daya captive di *module-1* PT Badak NGL dilakukan dengan memberikan gangguan pada bus 4. Analisis dilakukan pada salah satu generator yang terdapat pada *bus generator* di *module-1* yaitu bus 6 dan bus 12 yang mewakili generator G-2 dan G-8. Hal ini dilakukan karena generator yang terdapat pada bus ini memiliki karakteristik yang sama. Data yang ditampilkan berupa data grafik mengenai sudut rotor dan frekuensi yang menampilkan kondisi sebelum, sesaat, maupun setelah terjadinya gangguan pada bus 4.

4.6.1.1.1 Simulasi Stabilitas Sudut Rotor di Captive *Module-1* Sebelum Interkoneksi

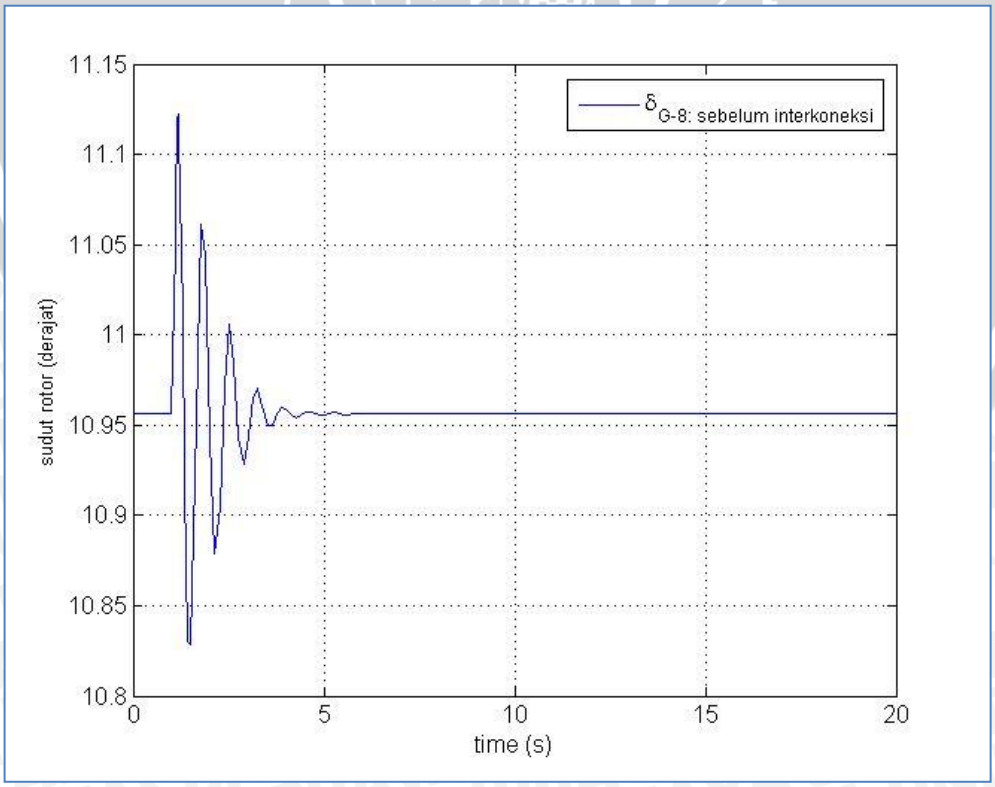
Hasil simulasi sudut rotor yang telah dilakukan ditampilkan pada gambar 4.14 dan gambar 4.15, kondisi sudut rotor pada generator G-2 ditunjukan pada gambar 4.14. Sebelum terjadi gangguan besar sudut rotor bernilai 11,36^o, sedangkan pada saat terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan besar mencapai nilai maksimum sebesar 11,57^o ketika 1,17 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu 11,57^o selama 4,9 detik. Sedangkan pada generator G-8, sebelum terjadi gangguan, besar sudut rotor bernilai 10,97^o. Sedangkan saat terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotornya meningkat hingga mencapai 11,12^o dan ketika 1,17 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu 10,96^o selama 5,1 detik.

Berdasarkan gambar 4.14 dan 4.15 tersebut, generator G-2 dan G-8 pada kondisi awal memiliki perbedaan sudut rotor karena adanya perbedaan daya yang dikeluarkan oleh kedua generator tersebut. namun, kedua generator tersebut mengalami peningkatan sudut rotor yang hampir sama yaitu berkisar 0,15^o – 0,21^o Hal ini membuktikan bahwa stabilitas sudut rotor di

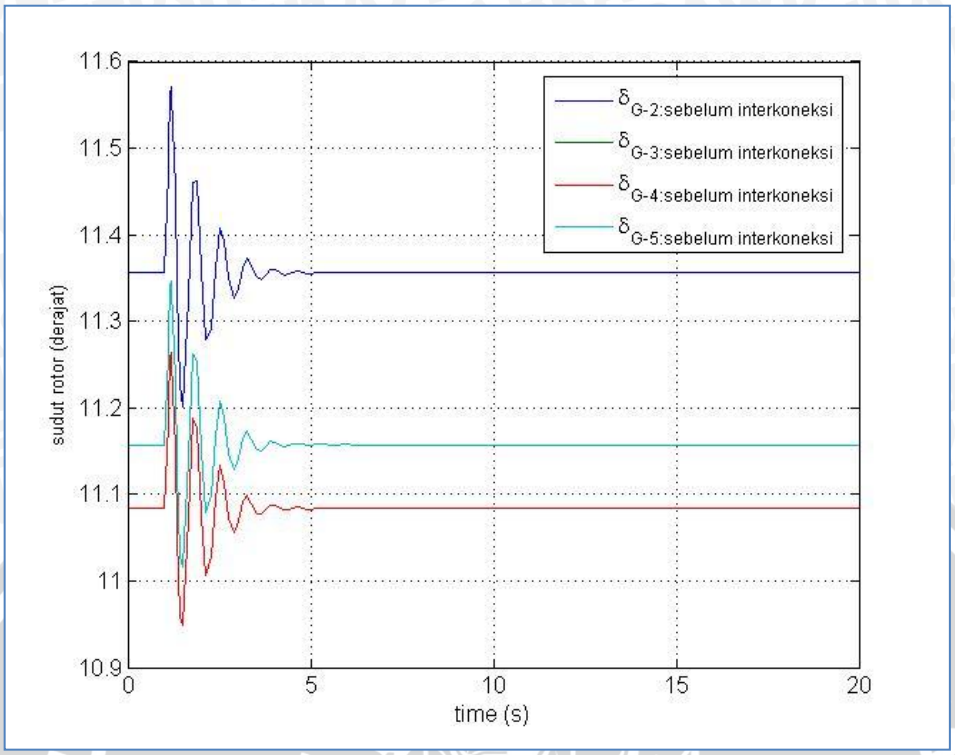
module-1 masih dalam kondisi stabil terhadap gangguan hubung singkat tiga (3) fasa pada bus tersebut.



Gambar 4.14 Grafik Sudut Rotor = *f(t)* pada generator G-2 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.15 Grafik Sudut Rotor = f(t) pada generator G-8 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.16 Performa Grafik Sudut Rotor = f(t) pada generator G-2, G-3, G-4, dan G-5 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

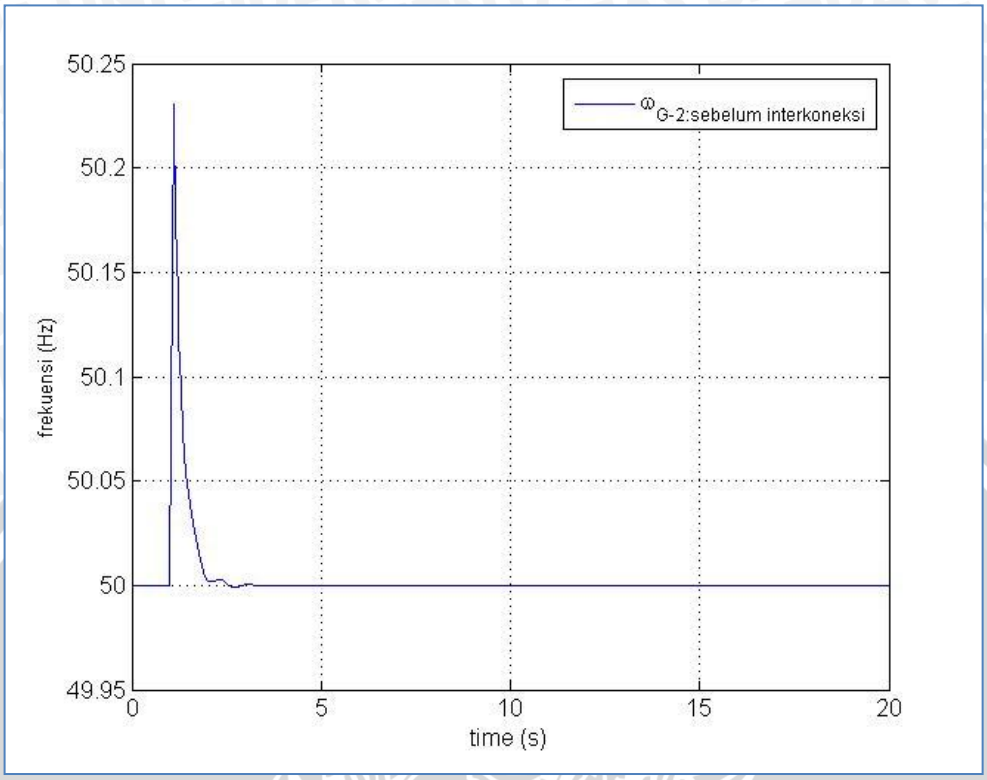
4.6.1.1.2 Simulasi Stabilitas Frekuensi di Captive *Module-1* Sebelum Interkoneksi

Hasil simulasi stabilitas frekuensi yang telah dilakukan ditunjukan pada gambar 4.17 dan 4.18. Grafik frekuensi yang dihasilkan oleh generator G-2 ditunjukan pada gambar 4.17. Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi frekuensi hingga mencapai nilai 50,23 Hz pada detik ke-1,1 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal selama 2,9 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

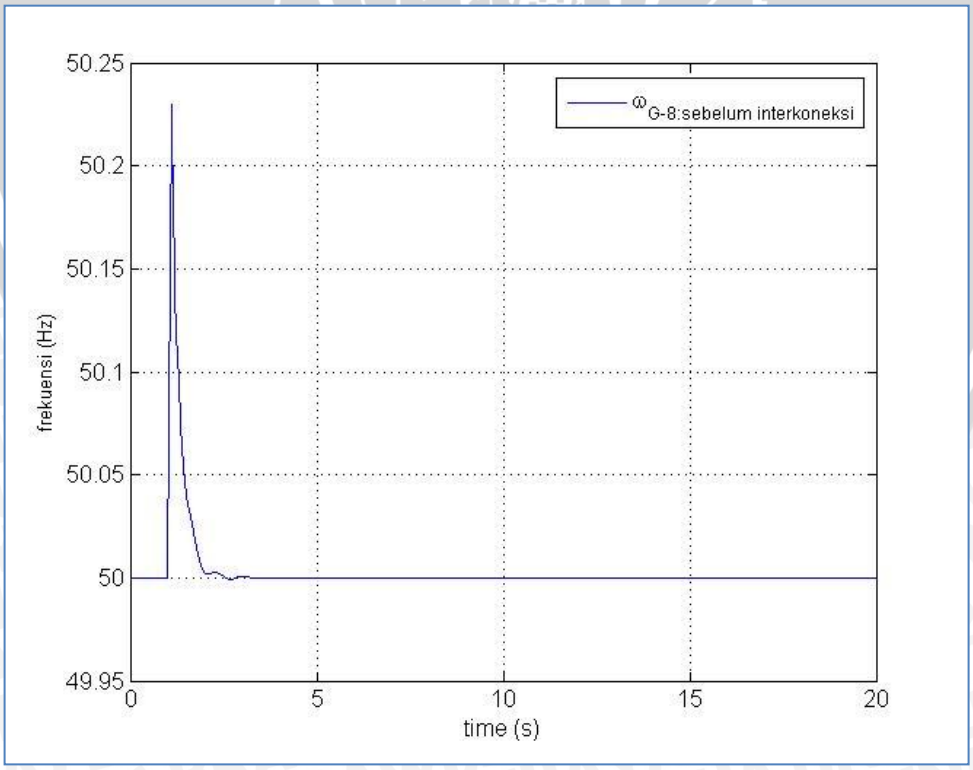
Grafik Frekuensi yang dihasilkan oleh generator G-8 ditunjukan pada gambar 4.18. Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi frekuensi hingga mencapai nilai 50,23 Hz pada detik ke-1,1 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal selama 2,9 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

Berdasarkan gambar 4.17 dan gambar 4.18 tersebut, frekuensi generator G-2 dan G-8 meningkat sebesar 0,23 Hz saat mengalami gangguan tiga (3) fasa pada bus 4. Saat gangguan, frekuensi tidak melebihi batas yang ditentukan yaitu tidak lebih dari 52 Hz dan tidak kurang dari 47,5 Hz (Permen ESDM: 2007). Frekuensi keduanya generator tersebut juga dapat kembali ke

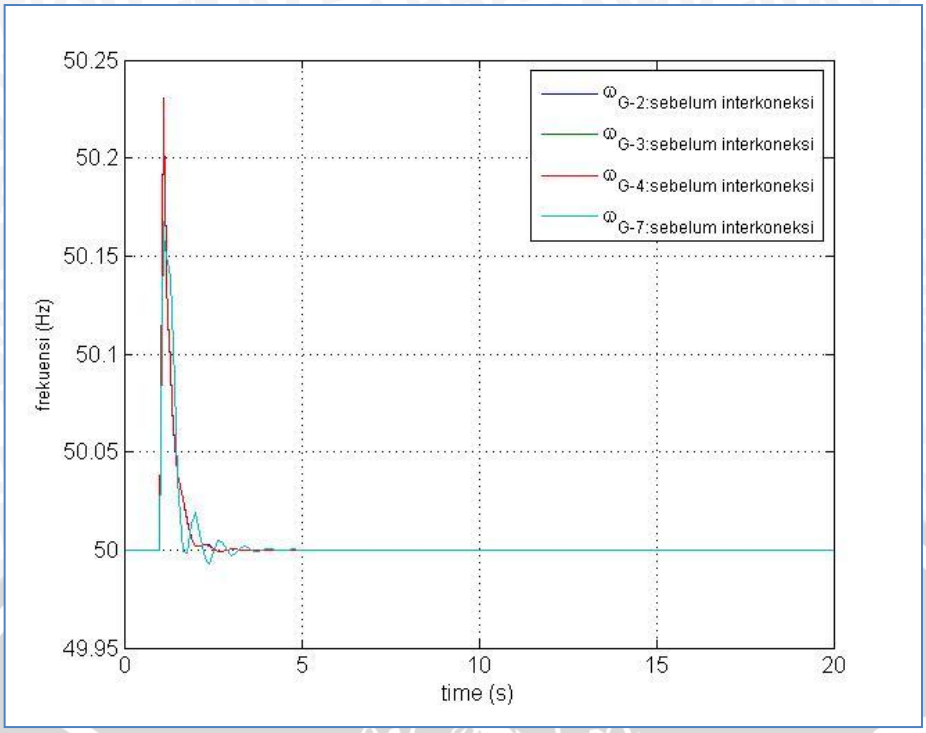
kondisi normal yaitu 50 Hz. Hal ini menunjukan bahwa stabilitas frekuensi akibat hubung singkat tiga (3) fasa di *module-1* masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.17 Grafik Frekuensi = f(t) pada generator G-2 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.18 Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-8 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.19 Performa Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-2, G-3, G-4 dan G-7 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

4.6.1.2 Simulasi Stabilitas Sistem Daya *Captive Module-2*

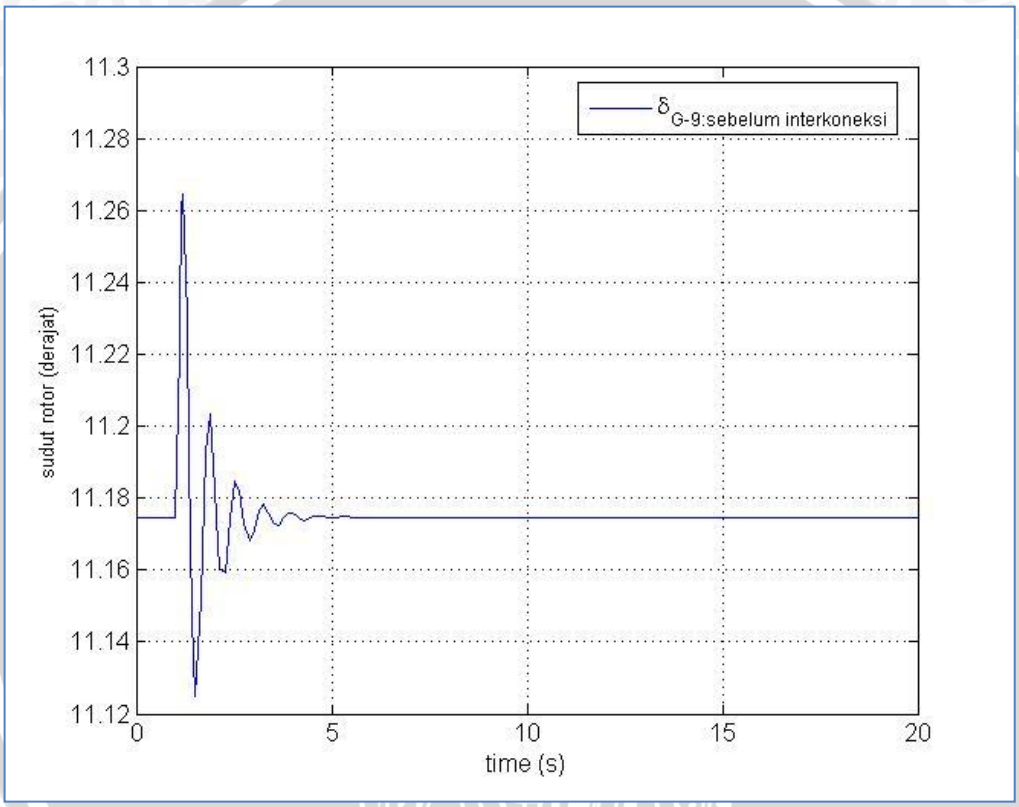
Simulasi stabilitas sistem daya captive *module-2* di PT Badak NGL dilakukan dengan memberikan gangguan pada bus 53. Analisis dilakukan pada salah satu generator yang terdapat pada *bus generator* di *module-2* yaitu bus 54 dan bus 60 dimana masing-masing mewakili generator G-9 dan G-14. Hal ini dilakukan karena generator yang terdapat pada bus ini memiliki karakteristik yang sama. Data yang ditampilkan berupa data grafik mengenai sudut rotor dan frekuensi yang menampilkan kondisi sebelum, sesaat, maupun setelah terjadinya gangguan pada bus 53.

Sebelum melakukan simulasi terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu pengaturan nilai dasar pada perangkat yang digunakan, pada simulasi yang akan dibahas ini menggunakan frekuensi 50 Hz, daya dasar 15.625 MVA dengan tegangan dasar 13800 V atau 13,8 kV. Waktu gangguan dimulai dari detik ke-1 dengan durasi simulasi selama 20 detik, dan waktu gangguan 0,1 detik. Gangguan yang diberikan ialah gangguan hubung singkat 3 fasa seperti yang telah disebutkan dalam batasan masalah. Selain itu, saat gangguan, batas frekuensi yang dianjuran tidak lebih tinggi dari 52 Hz dan lebih rendah dari 47.5 Hz.

4.6.1.2.1 Simulasi Stabilitas Sudut Rotor di *Captive Module-2* Sebelum Interkoneksi

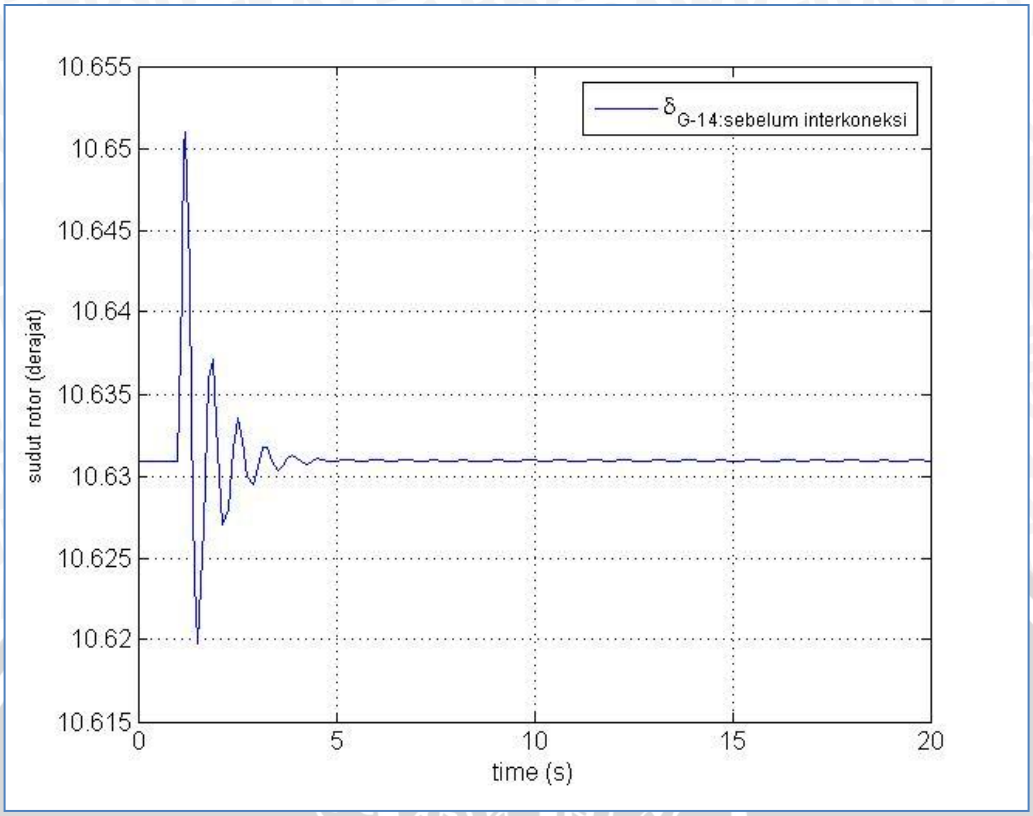
Hasil simulasi sudut rotor yang telah dilakukan ditampilkan pada gambar 4.20 dan 4.21, kondisi sudut rotor pada generator G-9 ditunjukan pada gambar 4.20. Sebelum terjadi gangguan

besar sudut rotor bernilai 11,18^o, sedangkan pada saat terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan (kenaikan) besar mencapai nilai maksimum sebesar 11,26^o ketika 1,19 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu sebesar 11,17^o selama 4,3 detik. Sedangkan pada generator G-14, sebelum terjadi gangguan besar sudut rotor bernilai 10,63^o ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotornya meningkat hingga mencapai10,65^o ketika 1,19 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu 10,63^o selama 4,5 detik.

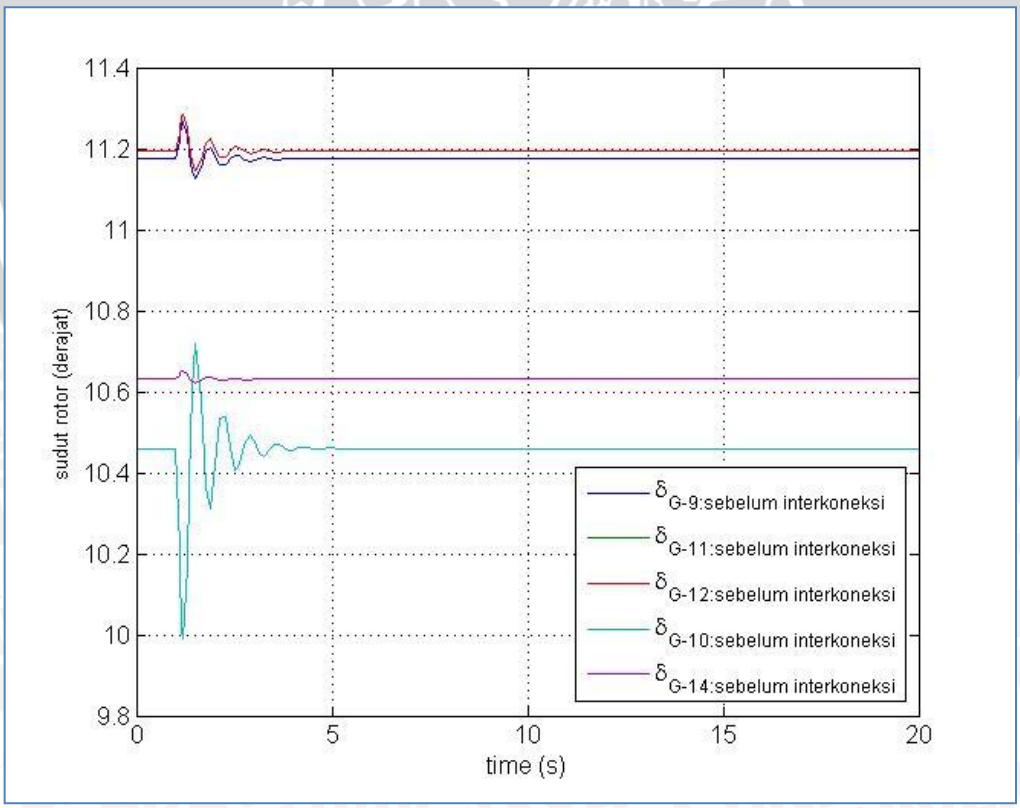


Gambar 4.20 Grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-09 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

Berdasarkan gambar 4.20 dan 4.21 tersebut, generator G-9 dan G-14 pada kondisi awal memiliki perbedaan sudut rotor karena adanya perbedaan daya yang dikeluarkan oleh kedua generator tersebut. namun, kedua generator tersebut mengalami peningkatan sudut rotor yang hampir sama yaitu sekitar 0,02^o - 0,08^o. Hal ini membuktikan bahwa stabilitas sudut rotor di *module-2* masih dalam kondisi stabil terhadap gangguan hubung singkat tiga (3) fasa pada bus tersebut.



Gambar 4.21 Grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-14 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

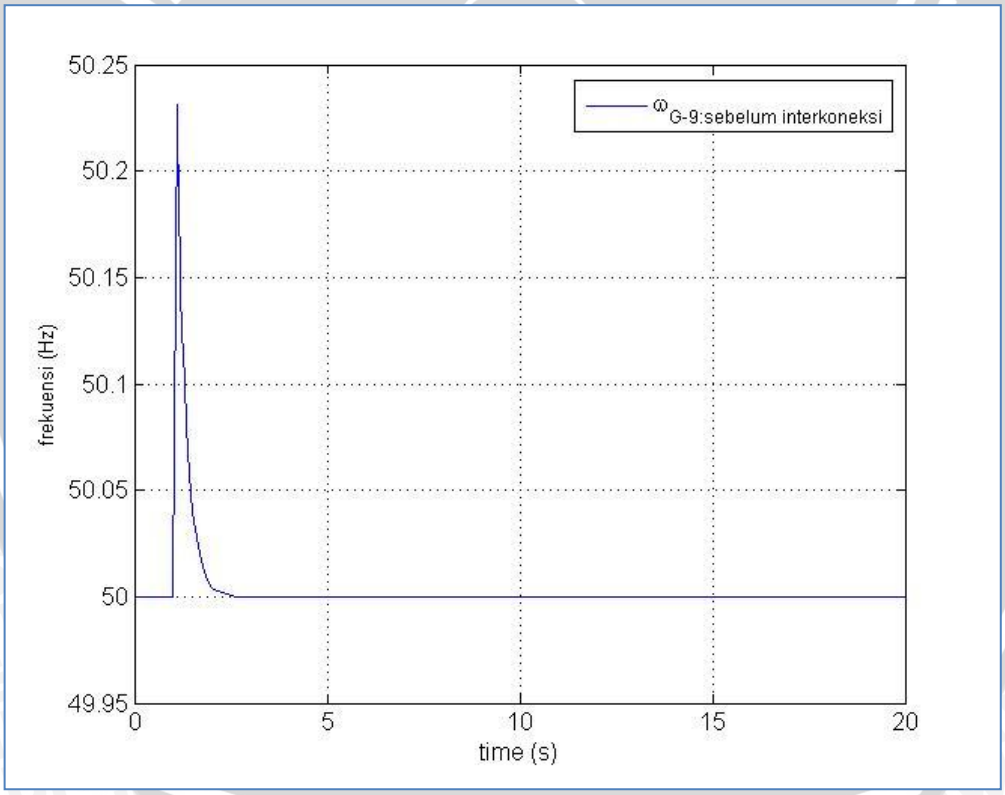


Gambar 4.22 Performa Grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-9, G-11, G-12, G-10, dan G-14 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

4.6.1.2.2 Simulasi Stabilitas Frekuensi di Captive *Module-2* Sebelum Interkoneksi

Hasil simulasi stabiitas frekuensi yang telah dilakukan ditunjukan pada gambar 4.23 dan 4.24. Grafik Frekuensi yang dihasilkan oleh generator G-09 ditunjukan pada gambar 4.23. Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi frekuensi hingga mencapai nilai 50,23 Hz pada detik ke-1,1 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal selama 1,7 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

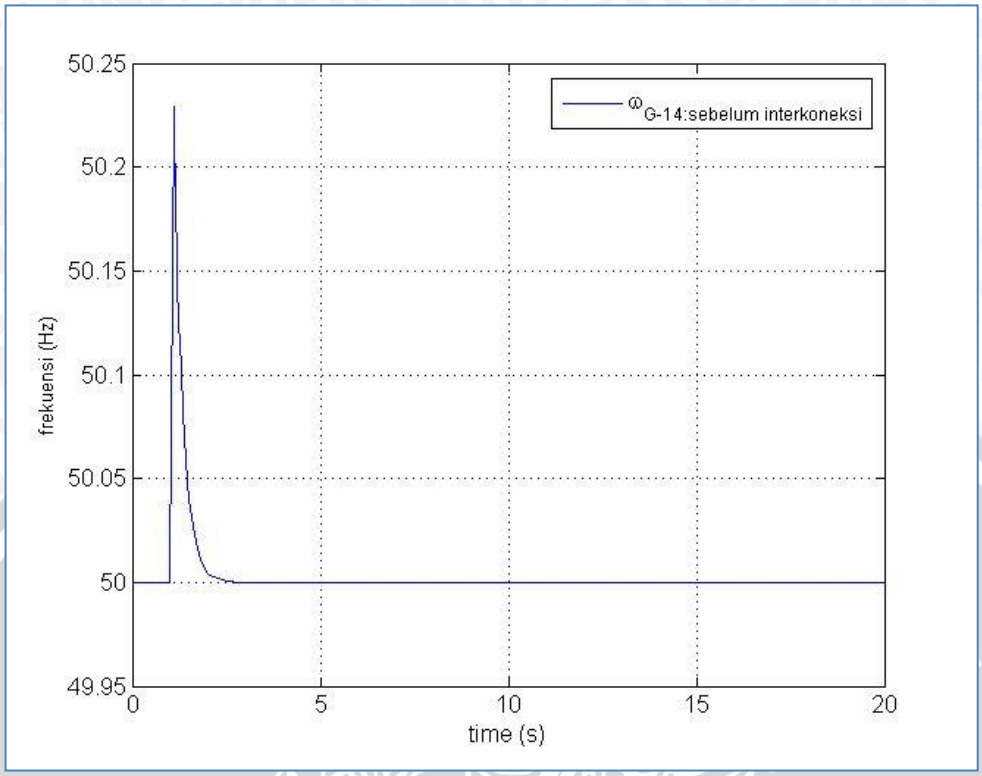
Grafik Frekuensi yang dihasilkan oleh generator G-14 ditunjukan pada gambar 4.24. Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi frekuensi hingga mencapai nilai maksimal sebesar 50,23 Hz pada detik ke-1,12 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal selama 1,75 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.



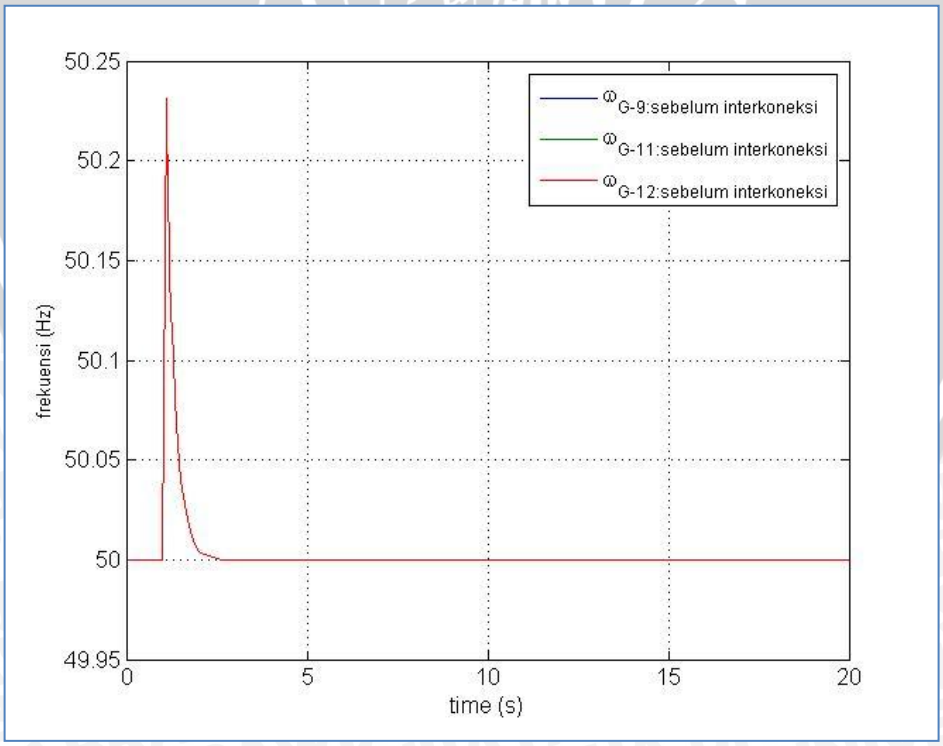
Gambar 4.23 Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-09 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

Berdasarkan gambar 4.23 dan 4.24 tersebut, frekuensi generator G-09 dan G-14 meningkat sebesar 0,23 Hz ketika mengalami gangguan tiga (3) fasa pada bus 53. Saat gangguan, frekuensi tidak melebihi batas yang ditentukan yaitu tidak lebih dari 52 Hz dan tidak kurang dari 47,5 Hz (Permen ESDM: 2007). Frekuensi kedua generator tersebut juga dapat kembali ke kondisi normal

yaitu 50 Hz. Hal ini menunjukan bahwa stabilitas frekuensi akibat hubung singkat tiga (3) fasa di *module-2* masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.24 Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-14 sebelum interkoneksi,
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.25 Performa Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-9, G-11,
dan G-14 sebelum interkoneksi,
Sumber : hasil simulasi

4.6.2 Simulasi Stabilitas Sistem Daya Setelah Interkoneksi

Simulasi stabilitas interkoneksi sistem daya ini meliputi dua (2) aspek yaitu stabilitas sudut rotor dan frekuensi. Sebelum melakukan simulasi terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu pengaturan nilai dasar pada perangkat yang digunakan, pada simulasi yang akan dibahas ini menggunakan frekuensi 50 Hz, daya dasar 15.625 MVA dengan tegangan dasar 13800 V atau 13,8 kV. Waktu gangguan dimulai dari detik ke-1 dengan durasi simulasi selama 20 detik, dan waktu gangguan 0,1 detik. Gangguan yang diberikan ialah gangguan hubung singkat 3 fasa seperti yang telah disebutkan dalam batasan masalah.

4.6.2.1 Simulasi Stabilitas Sudut Rotor Setelah Interkoneksi

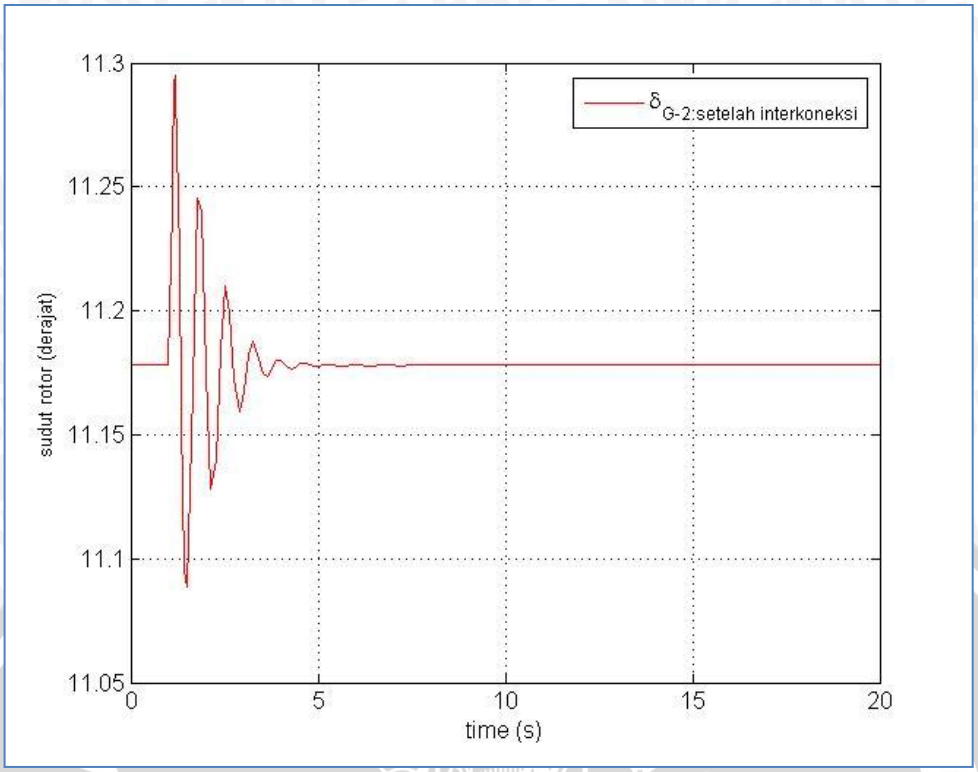
Hasil simulasi sudut rotor yang telah dilakukan ditampilkan pada gambar 4.26, 4.27, 4.28 dan 4.29. Setiap bus yaitu bus 5, bus 12, bus 54 dan bus 60 masing-masing mewakili generator G-2, G-8, G-9 dan G-14. Kondisi sudut rotor pada generator G-2 ditunjukan pada gambar 4.26. Sebelum terjadi gangguan besar sudut rotor bernilai 11,18^o, sedangkan pada saat terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan (kenaikan dan penurunan) mencapai nilai maksimum sebesar 11,30^o ketika 1,18 detik. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu 11,18^o selama 3,9 detik.

Sedangkan pada generator G-8 (gambar 4.27), Sebelum terjadi gangguan besar sudut rotor bernilai 11,36^o, sedangkan pada saat terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan (kenaikan dan penurunan) mencapai nilai maksimum sebesar 11,51^o ketika 1,17 detik. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu 11,36^o selama 4,5 detik.

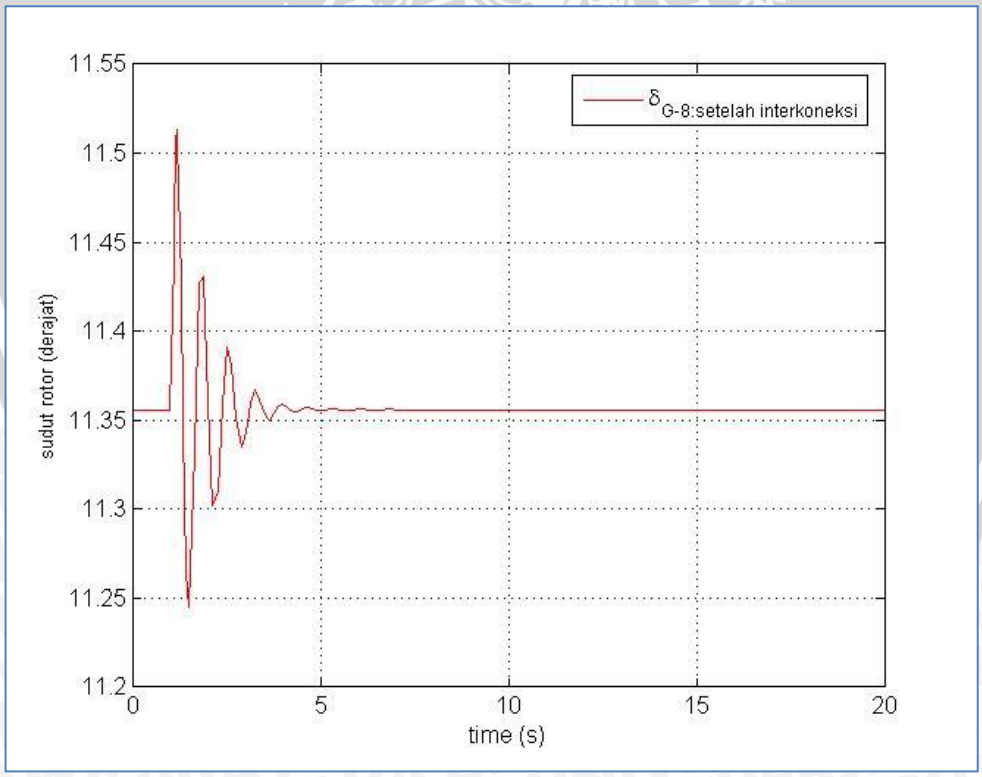
Sedangkan pada generator G-9 (gambar 4.28), Sebelum terjadi gangguan besar sudut rotor bernilai 11,09^o, sedangkan pada saat terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan (kenaikan dan penurunan) mencapai nilai maksimum sebesar 11,19^o ketika 1,19 detik. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu 11,08^o selama 4,7 detik.

Sedangkan pada generator G-14 (gambar 4.29), Sebelum terjadi gangguan besar sudut rotor bernilai 10,63^o, sedangkan pada saat terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan mencapai nilai maksimum sebesar 10,68^o ketika 1,77 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu 10,68^o selama 4,4 detik.

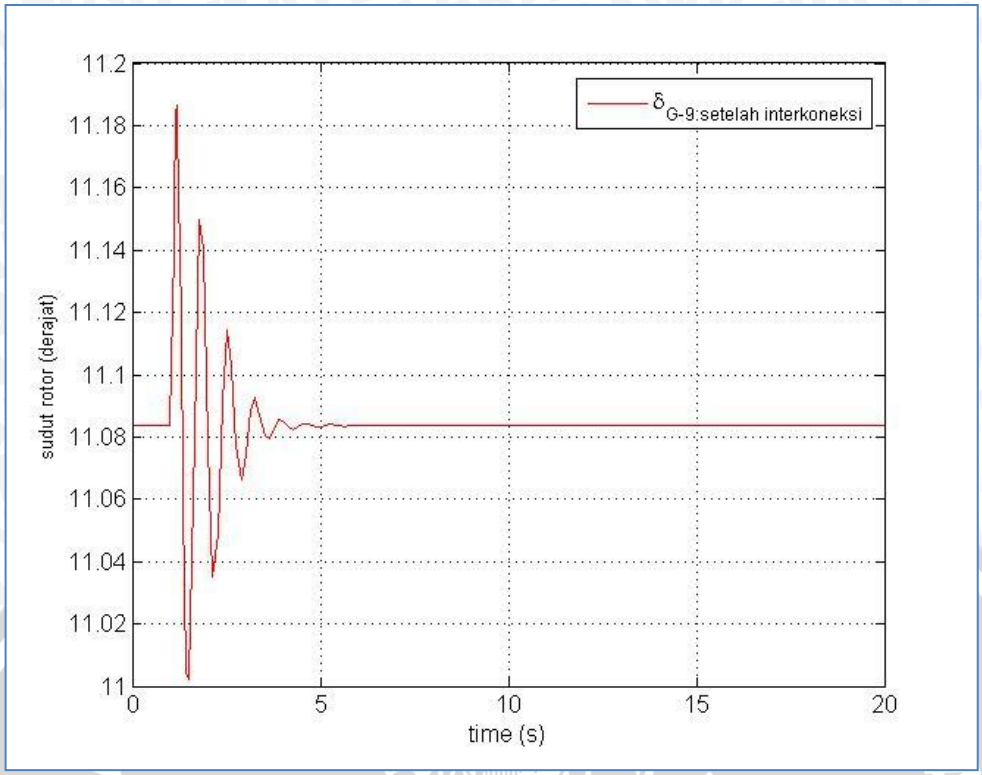
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



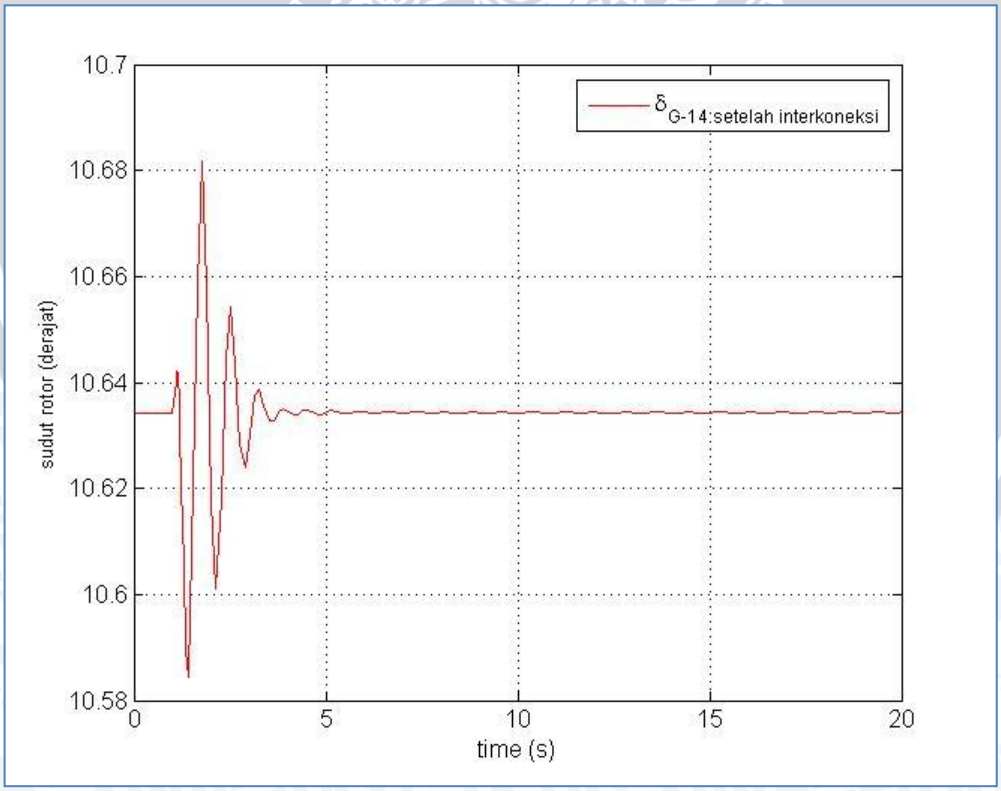
Gambar 4.26 Grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-2 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



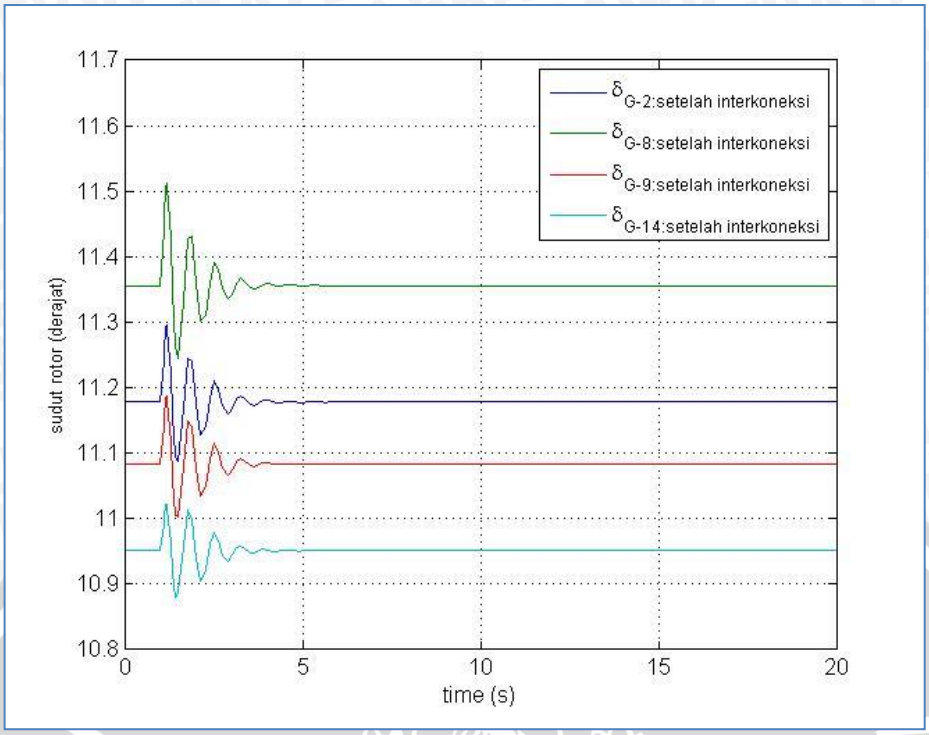
Gambar 4.27 Grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-8 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.28 Grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-9 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.29 Grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-14 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.30 Performa grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-2, G-8, G-9, dan G-14 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

Dari pembahasan diatas mengenai stabilitas sudut rotor pada kondisi sebelum interkoneksi maupun sesudah interkoneksi, terlihat bahwa adanya kenaikan dan penurunan sudut rotor generator pada kondisi interkoneksi lebih kecil dari kondisi sebelum interkoneksi. Kenaikan dan penurunan sudut rotor yang terjadi pada generator G-2 dan G-8 pada kondisi interkoneksi ialah 11,18^{o} dan 11,36^{o} atau 0,18° dan 0,39° lebih kecil jika dibandingkan dengan kondisi sebelum interkoneksi. Sedangkan pada generator G-9 penurunan sudut rotornya 11,09^{o} atau 0,09° lebih kecil dari kondisi sebelum interkoneksi. Namun, untuk waktu gangguan 0,1 detik kedua kondisi sistem menunjukkan bahwa sistem masih dapat kembali dalam keadaan operasi normal atau sinkron. Perbandingan mengenai perubahan sudut rotor tersebut menunjukkan bahwa stabilitas sudut rotor generator di PT Badak NGL pada kondisi interkoneksi lebih baik daripada kondisi *captive*.

4.6.2.2 Simulasi Stabilitas Frekuensi Setelah Interkoneksi

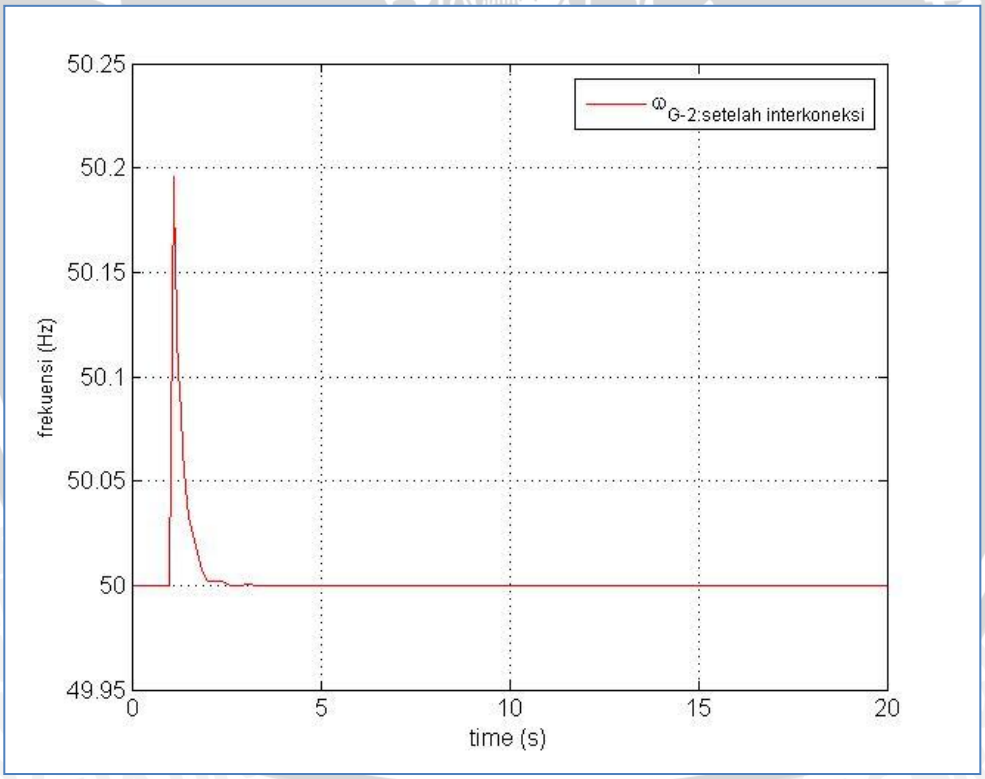
Hasil simulasi frekuensi yang telah dilakukan ditampilkan pada gambar 4.31, 4.32, 4.33, dan 4.34. Setiap bus yaitu bus 6, bus 12, bus 54 dan bus 60 masing-masing mewakili generator G-2, G-8, G-9 dan G-14. Kondisi frekuensi pada generator G-2 ditunjukan pada gambar 4.31. Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi frekuensi hingga mencapai nilai 50,18 Hz pada

detik ke-1,1 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal selama 2,3 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

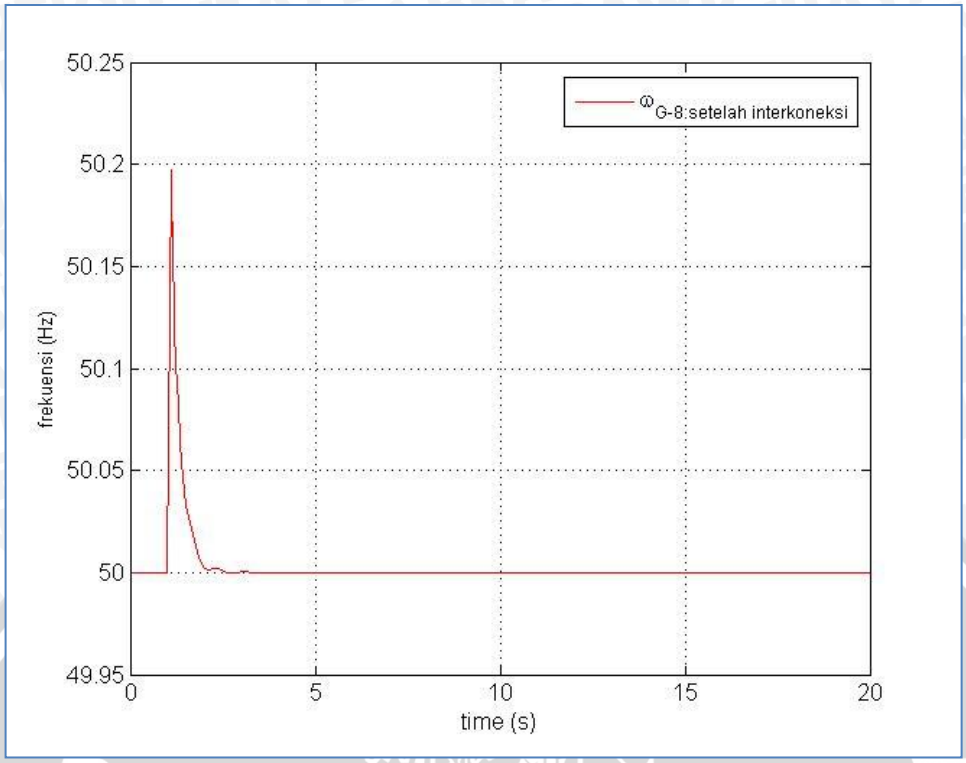
Pada generator G-8 (gambar 4.32), Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi frekuensi hingga mencapai nilai 50,19 Hz pada detik ke-1,1 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal selama 2,4 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

Pada generator G-9 (gambar 4.33), Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi frekuensi hingga mencapai nilai 50,19 Hz pada detik ke-1,1 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal selama 1,6 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

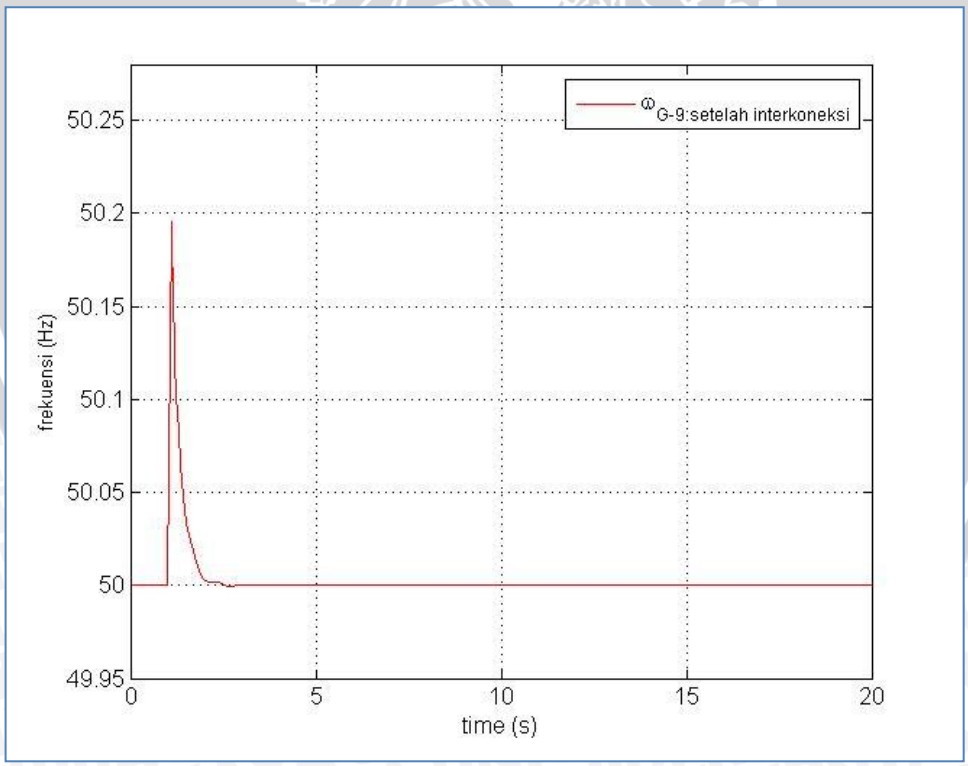
Pada generator G-14 (gambar 4.34), Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi rekuensi hingga mencapai nilai 50,18 Hz pada detik ke-1,1 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal 1,3 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.



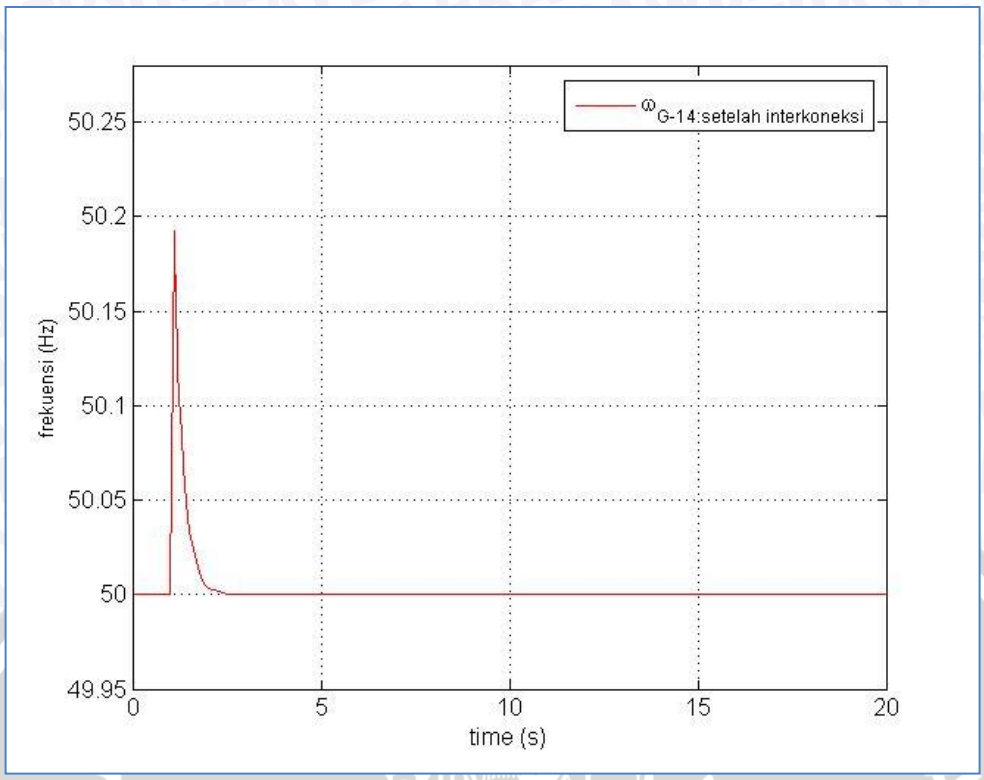
Gambar 4.31 Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-2 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



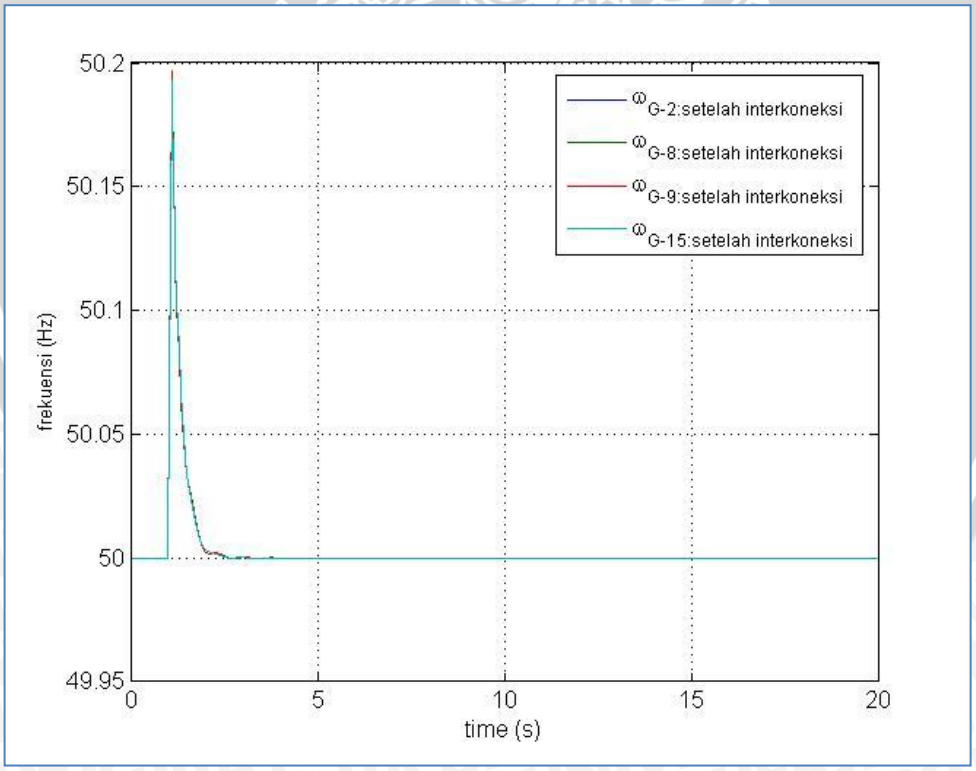
Gambar 4.32 Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-8 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.33 Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-9 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.34 Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-14 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.35 Performa grafik frekuensi = f(t) pada generator G-2, G-8, G-9, dan G-14 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

4.7 Perbandingan Stabilitas Sudut Rotor Generator

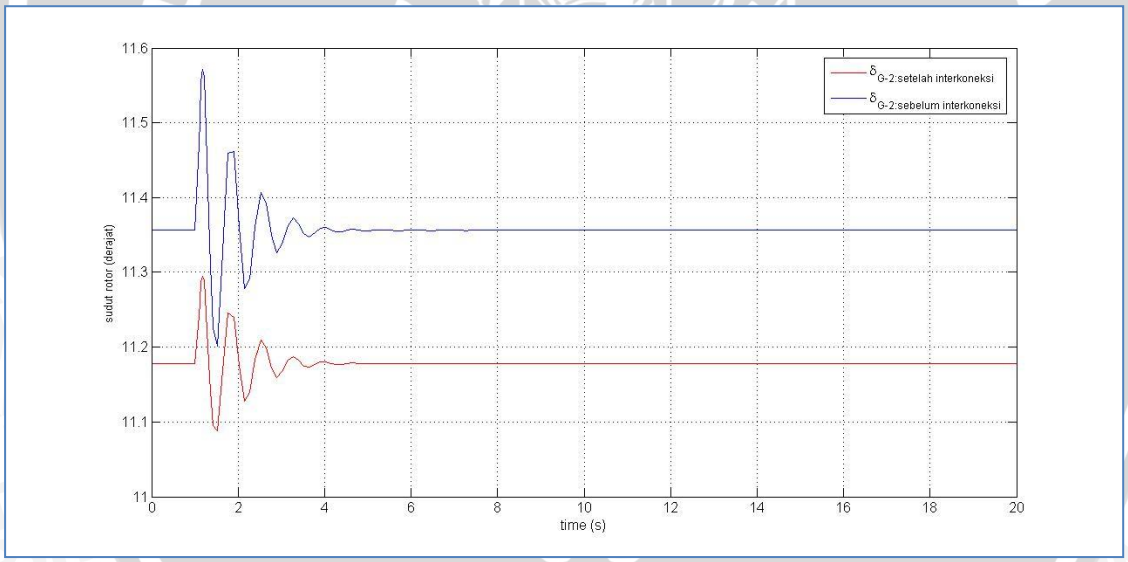
Tabel 4.25 Perbandingan stabilitas sudut rotor generator

Generator	Sebelum interkoneksi		Setelah interkoneksi	
	δ (°)	$t_{pemulihan}$ (detik)	δ (°)	$t_{pemulihan}$ (detik)
G-02	11,36	4,9	11,18	3,9
G-08	10,97	5,1	11,36	4,5
G-09	11,18	4,9	11,09	4,7
G-14	10,63	4,8	10,63	4,4

Sumber : Hasil simulasi

Grafik perbandingan stabilitas sudut rotor pada generator di Kilang PT Badak NGL ditunjukkan pada Gambar 4.36 – 4.39. Pada grafik tersebut ditunjukkan bagaimana perbedaan perubahan sudut rotor generator pada kondisi peralihan dan perbedaan waktu yang diperlukan generator untuk dapat beroperasi pada kondisi sinkronnya setelah terjadi gangguan.

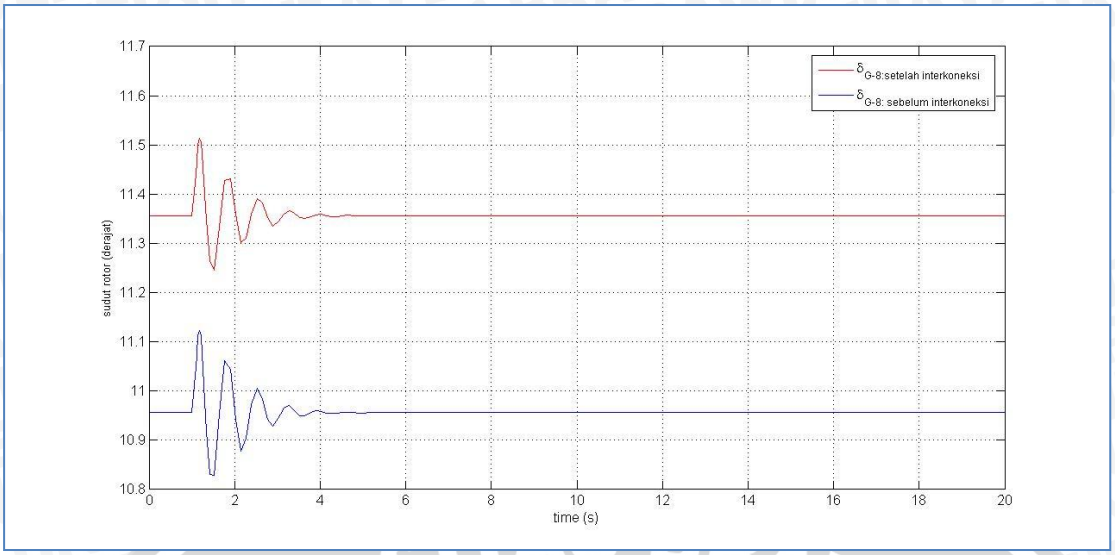
Dari tabel diatas diketahui bahwa waktu pemulihan gangguan yang dibutuhkan sistem saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.



Gambar 4.36 Perbandingan grafik sudut rotor = f (t) pada generator G-02 sebelum dan setelah interkoneksi

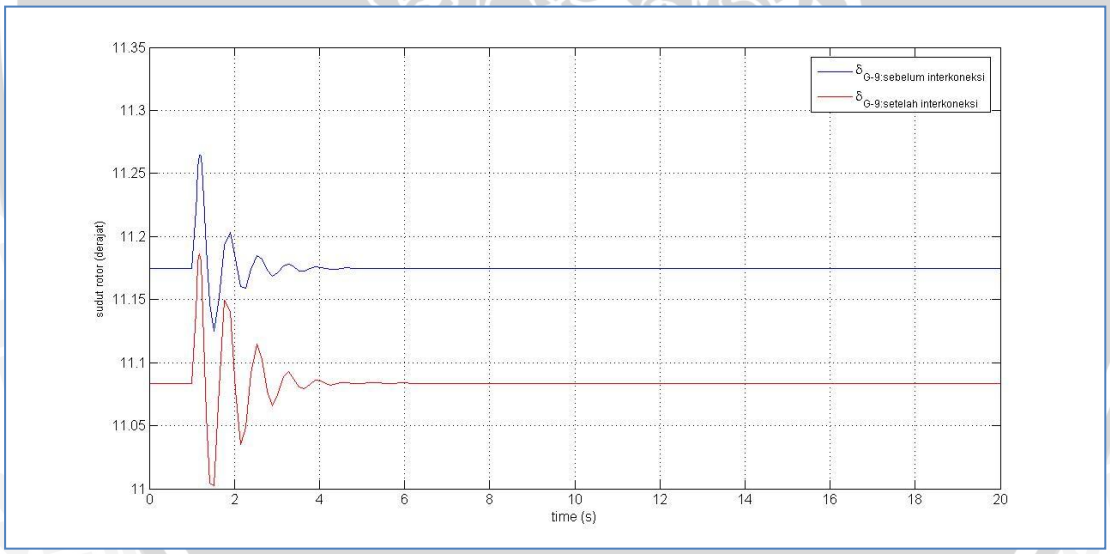
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas (gambar 4.36) diketahui bahwa waktu pemulihan gangguan yang dibutuhkan sistem saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.



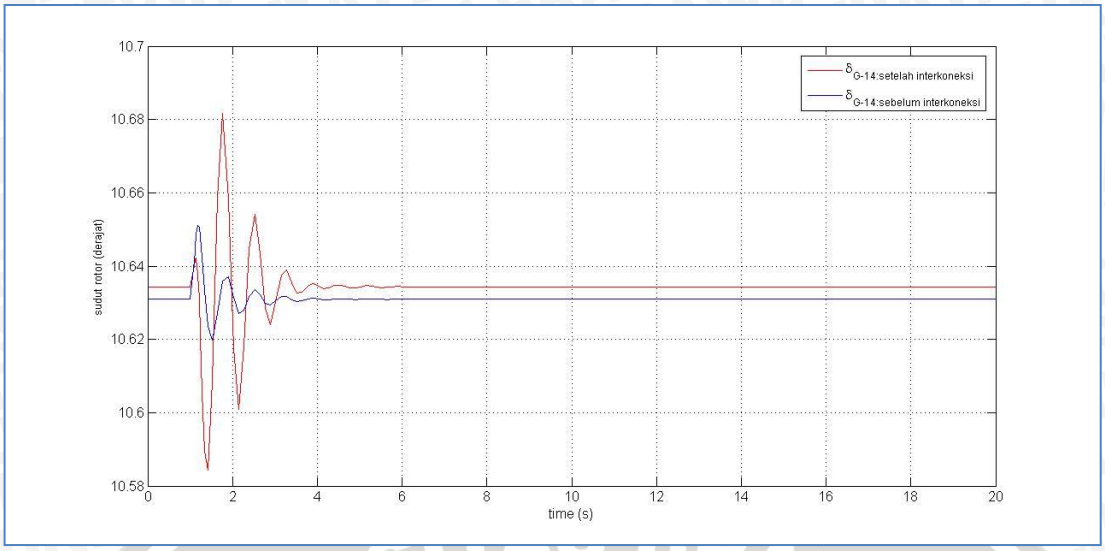
Gambar 4.37 Perbandingan grafik sudut rotor = f (t) pada generator G-08 sebelum dan setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas (gambar 4.37) diketahui bahwa waktu pemulihan gangguan yang dibutuhkan sistem saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.



Gambar 4.38 Perbandingan grafik sudut rotor = f (t) pada generator G-09 sebelum dan setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas diketahui bahwa waktu pemulihan gangguan yang dibutuhkan sistem saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.



Gambar 4.39 Perbandingan grafik sudut rotor = f (t) pada generator G-14 sebelum dan setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas diketahui bahwa waktu pemulihan gangguan yang dibutuhkan sistem saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.

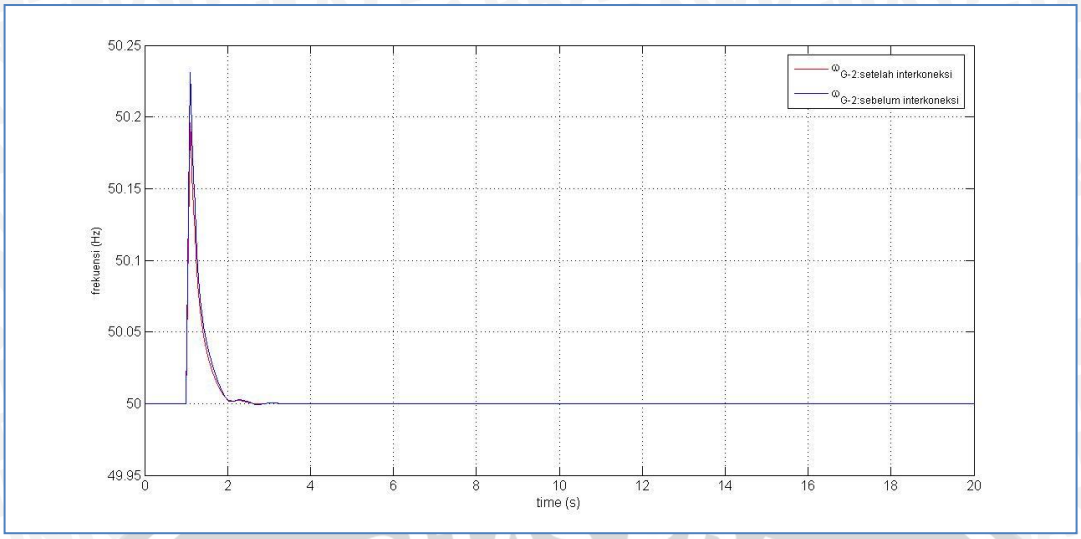
4.8 Perbandingan Stabilitas Frekuensi Generator

Tabel 4.26 Perbandingan stabilitas frekuensi generator

Generator	Sebelum interkoneksi		Setelah interkoneksi	
	f_{max} (Hz)	$t_{pemulihan}$ (detik)	f_{max} (Hz)	$t_{pemulihan}$ (detik)
30-PG-02	50,23	2,9	50,18	2,3
30-PG-03	50,23	2,9	50,19	2,4
30-PG-09	50,23	1,7	50,19	1,6
30-PG-13	50,23	1,7	50,18	1,3

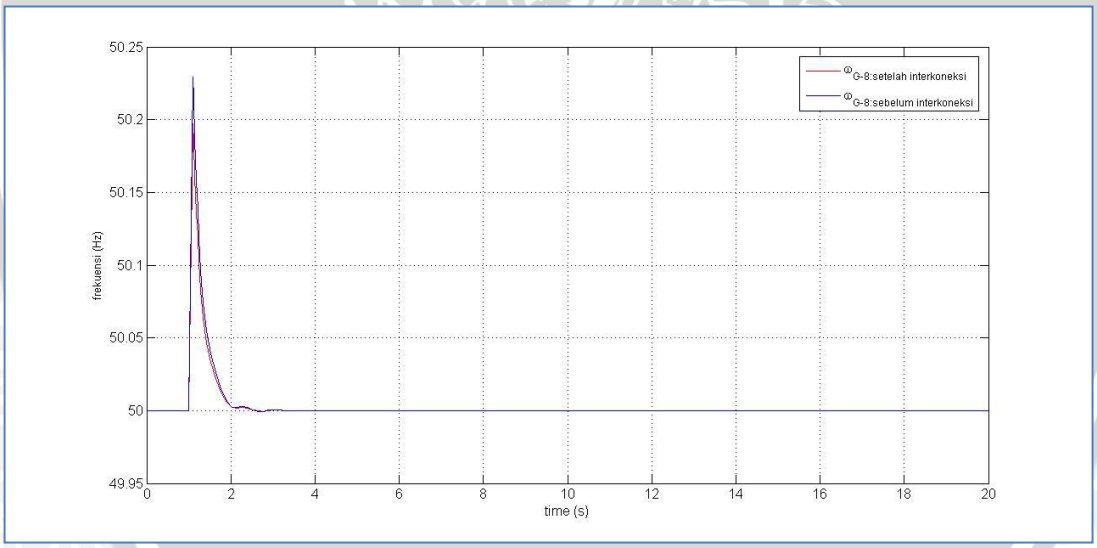
Sumber : Hasil simulasi (*f* = frekuensi)

Grafik perbandingan stabilitas sudut rotor pada generator di Kilang PT Badak NGL ditunjukkan pada Gambar 4.40 – 4.43. Pada grafik tersebut ditunjukkan bagaimana perbedaan perubahan frekuensi generator pada kondisi peralihan dan perbedaan waktu yang diperlukan generator untuk dapat beroperasi pada frekuensi kerjanya setelah terjadi gangguan.



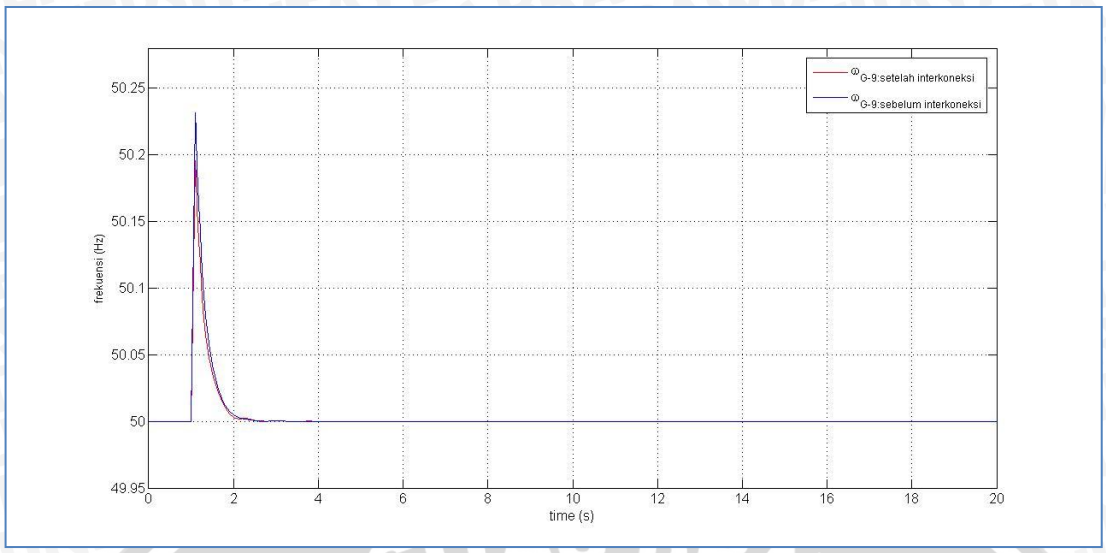
Gambar 4.40 Perbandingan grafik frekuensi = f (t) pada generator G-02 sebelum dan setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas (gambar 4.40) diketahui bahwa waktu pemulihan yang dibutuhkan sistem setelah gangguan saat interkoneksi lebih cepat 2,5 detik dibandingkan sebelum interkoneksi.



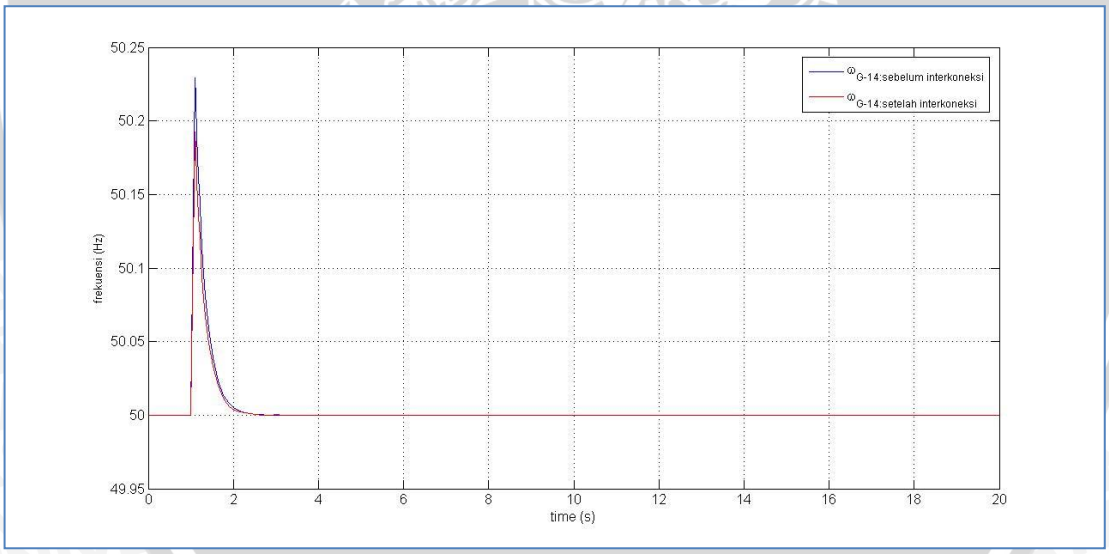
Gambar 4.41 Perbandingan grafik frekuensi = f (t) pada generator G-08 sebelum dan setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas (gambar 4.41) diketahui bahwa waktu pemulihan yang dibutuhkan sistem setelah gangguan saat interkoneksi lebih detik dibandingkan sebelum interkoneksi.



Gambar 4.42 Perbandingan grafik frekuensi = f (t) pada generator G-09 sebelum dan setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas diketahui bahwa waktu pemulihan yang dibutuhkan sistem setelah gangguan saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.



Gambar 4.43 Perbandingan grafik frekuensi = f (t) pada generator G-14 sebelum dan setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas diketahui bahwa waktu pemulihan yang dibutuhkan sistem setelah gangguan saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.

4.9 Simulasi Sistem Daya Kondisi Dinamik Dengan Pengaruh *Governor* dan *AVR*

4.9.1 Simulasi Stabilitas Sistem Daya Sebelum Interkoneksi Dengan Pengaruh Governor dan AVR

Simulasi stabilitas ini meliputi dua (2) hal yaitu stabilitas sudut rotor dan frekuensi pada sistem daya *module-1* dan *module-2* di PT Badak NGL Bontang. Sebelum melakukan simulasi terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu pengaturan nilai dasar pada perangkat yang digunakan, pada simulasi yang akan dibahas ini menggunakan frekuensi 50 Hz, daya dasar 15.625 MVA dengan tegangan dasar 13800 V atau 13,8 kV. Waktu gangguan dimulai dari detik ke-1 dengan durasi simulasi selama 20 detik, dan waktu gangguan 0,1 detik. Gangguan yang diberikan ialah gangguan hubung singkat 3 fasa seperti yang telah disebutkan dalam batasan masalah. Selain itu, saat gangguan, batas frekuensi yang dianjuran tidak lebih tinggi dari 52 Hz dan lebih rendah dari 47.5 Hz (Permen ESDM: 2007).

4.9.1.1 Simulasi Stabilitas Sistem Daya Captive *Module-1*

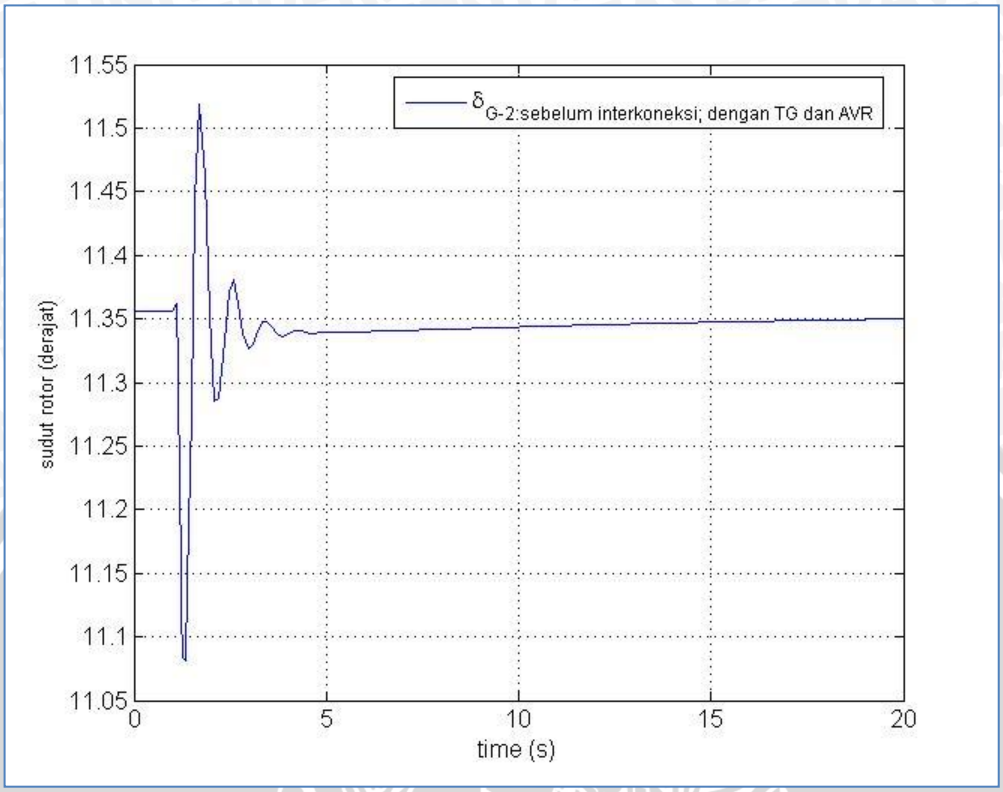
Simulasi stabilitas sistem daya *captive* di *module-1* PT Badak NGL dilakukan dengan memberikan gangguan pada bus 4. Analisis dilakukan pada salah satu generator yang terdapat pada *bus generator* di *module-1* yaitu bus 6 dan bus 12 yang mewakili generator G-2 dan G-8. Hal ini dilakukan karena generator yang terdapat pada bus ini memiliki karakteristik yang sama. Data yang ditampilkan berupa data grafik mengenai sudut rotor dan frekuensi yang menampilkan kondisi sebelum, sesaat, maupun setelah terjadinya gangguan pada bus 4.

4.9.1.1.1 Simulasi Stabilitas Sudut Rotor di Captive *Module-1*

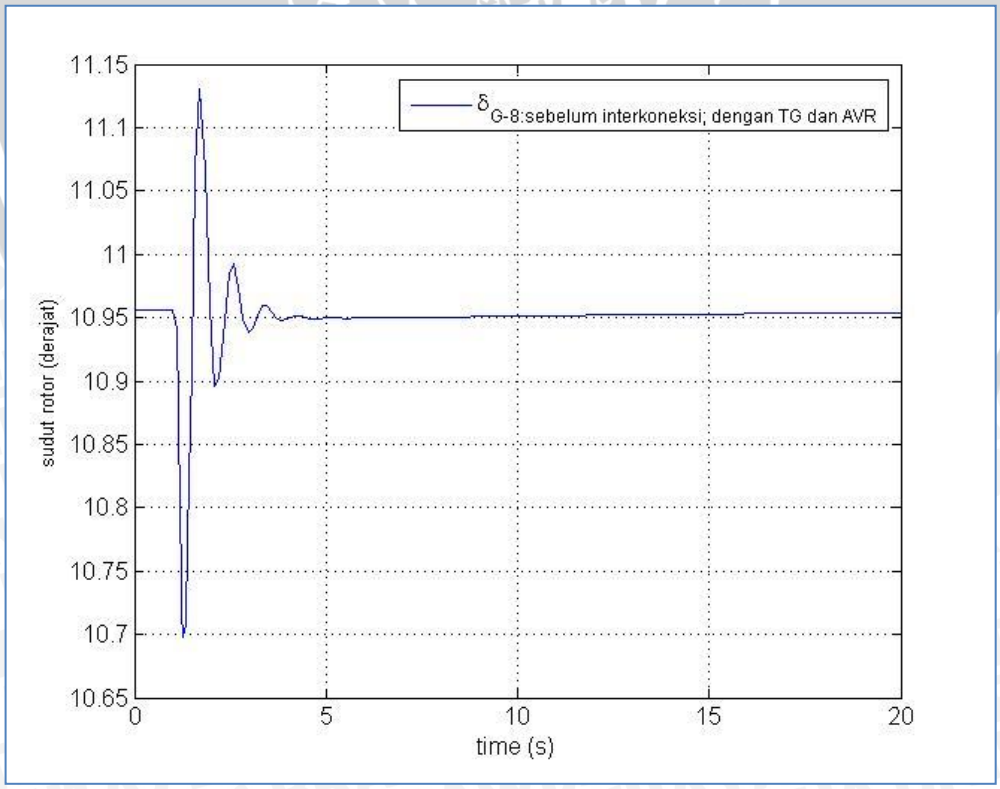
Hasil simulasi sudut rotor yang telah dilakukan ditampilkan pada gambar 4.44 dan gambar 4.45, kondisi sudut rotor pada generator G-2 ditunjukan pada gambar 4.44. Sebelum terjadi gangguan besar sudut rotor bernilai 11,34^o, sedangkan pada saat terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan besar mencapai nilai maksimum sebesar 11,52^o ketika 1,72 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu 11,34^o selama 13,5 detik. Sedangkan pada generator G-8, sebelum terjadi gangguan, besar sudut rotor bernilai 10,94^o. Sedangkan saat terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotornya meningkat hingga mencapai 11,13^o dan ketika 1,71 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu 10,95^o selama 4,6 detik.

Berdasarkan gambar 4.44 dan 4.45 tersebut, generator G-2 dan G-8 pada kondisi awal memiliki perbedaan sudut rotor karena adanya perbedaan daya yang dikeluarkan oleh kedua generator tersebut. namun, kedua generator tersebut mengalami peningkatan sudut rotor yang hampir sama yaitu berkisar 0,18^o – 0,19^o Hal ini membuktikan bahwa stabilitas sudut rotor di

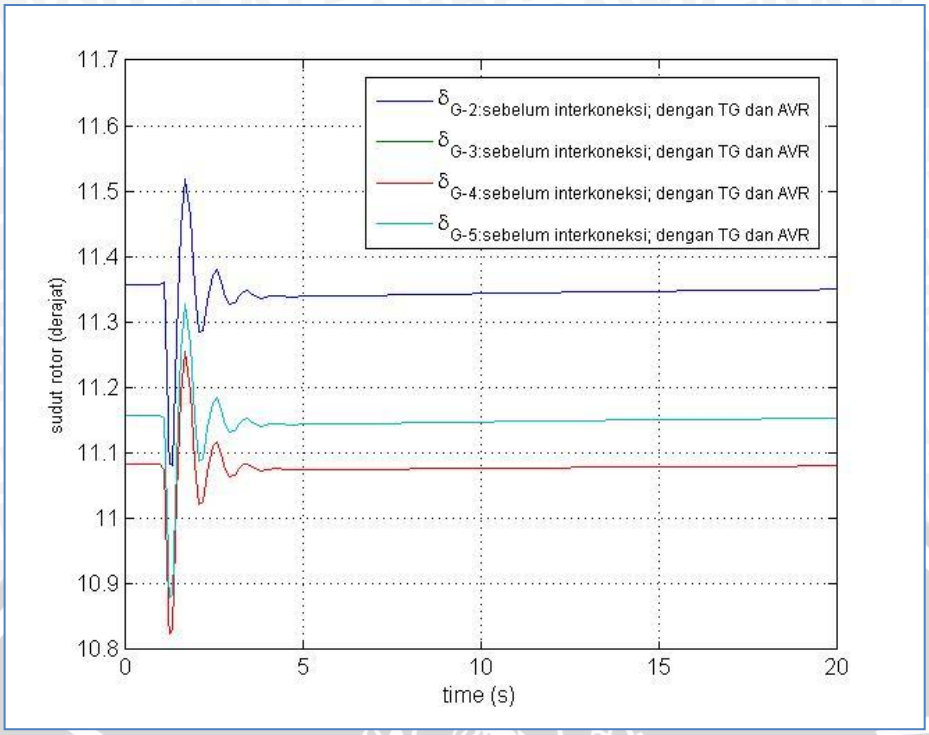
module-1 masih dalam kondisi stabil terhadap gangguan hubung singkat tiga (3) fasa pada bus tersebut.



Gambar 4.44 Grafik Sudut Rotor = *f(t)* pada generator G-2 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.45 Grafik Sudut Rotor = f(t) pada generator G-8 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

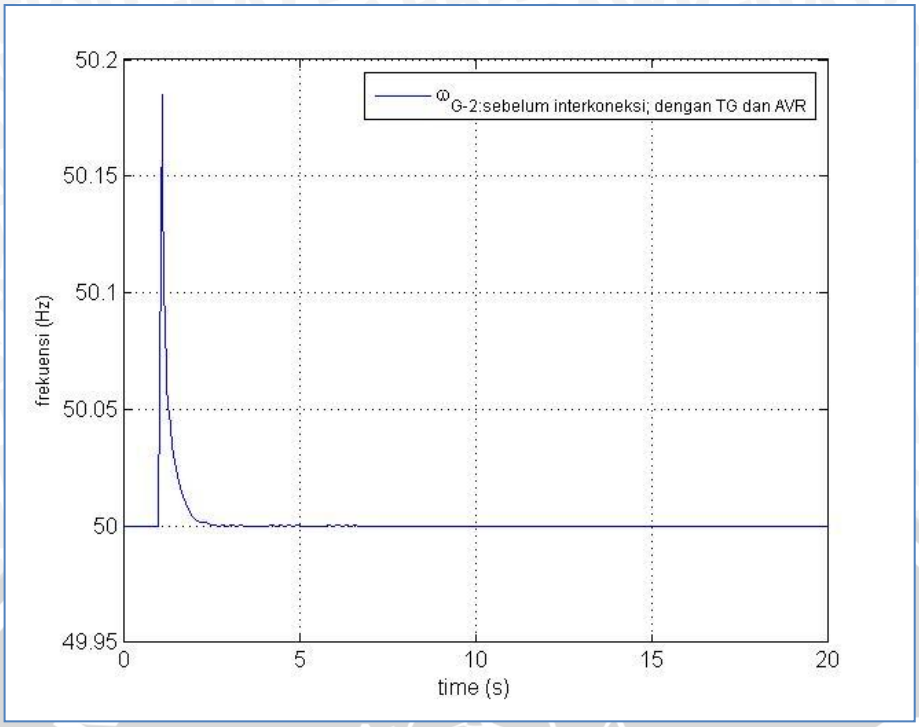


Gambar 4.46 Performa Grafik Sudut Rotor = f(t) pada generator G-2, G-3, G-4, dan G-5 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

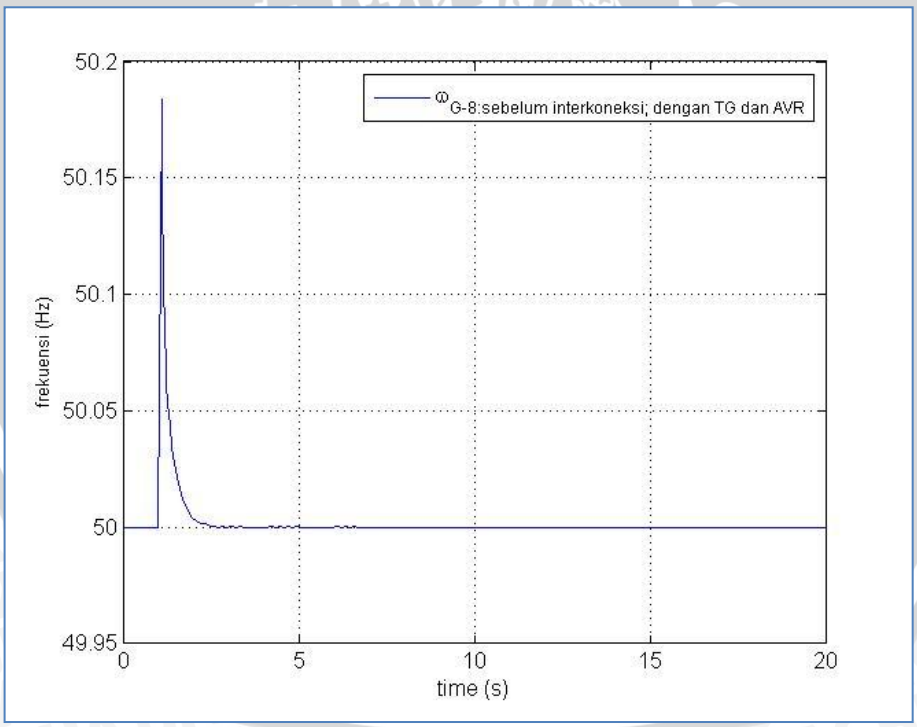
4.9.1.1.2 Simulasi Stabilitas Frekuensi di Captive *Module-1* Sebelum Interkoneksi

Hasil simulasi stabilitas frekuensi yang telah dilakukan ditunjukan pada gambar 4.47 dan 4.48. Grafik frekuensi yang dihasilkan oleh generator G-2 ditunjukan pada gambar 4.47. Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi frekuensi hingga mencapai nilai 50,18 Hz pada detik ke-1,1 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal selama 2,3 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

Grafik Frekuensi yang dihasilkan oleh generator G-8 ditunjukan pada gambar 4.48. Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi frekuensi hingga mencapai nilai 50,18 Hz pada detik ke-1,12 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal selama 2,2 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.



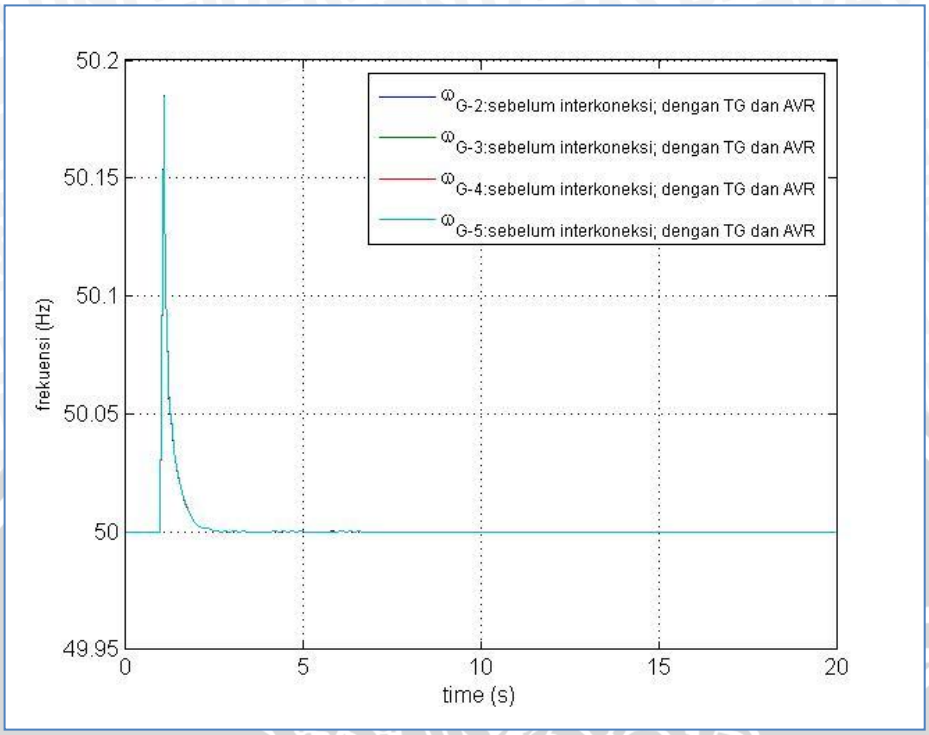
Gambar 4.47 Grafik Frekuensi = f(t) pada generator G-2 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.48 Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-8 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

Berdasarkan gambar 4.47 dan gambar 4.48 tersebut, frekuensi generator G-2 dan G-8 meningkat sebesar 0,18 Hz saat mengalami gangguan tiga (3) fasa pada bus 4. Saat gangguan, frekuensi tidak melebihi batas yang ditentukan yaitu tidak lebih dari 52 Hz dan tidak kurang dari 47,5 Hz (Permen ESDM: 2007). Frekuensi keduanya generator tersebut juga dapat kembali ke

kondisi normal yaitu 50 Hz. Hal ini menunjukan bahwa stabilitas frekuensi akibat hubung singkat tiga (3) fasa di *module-1* masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.49 Performa Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-2, G-3, G-4, dan G-5 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

4.9.1.2 Simulasi Stabilitas Sistem Daya *Captive Module-2*

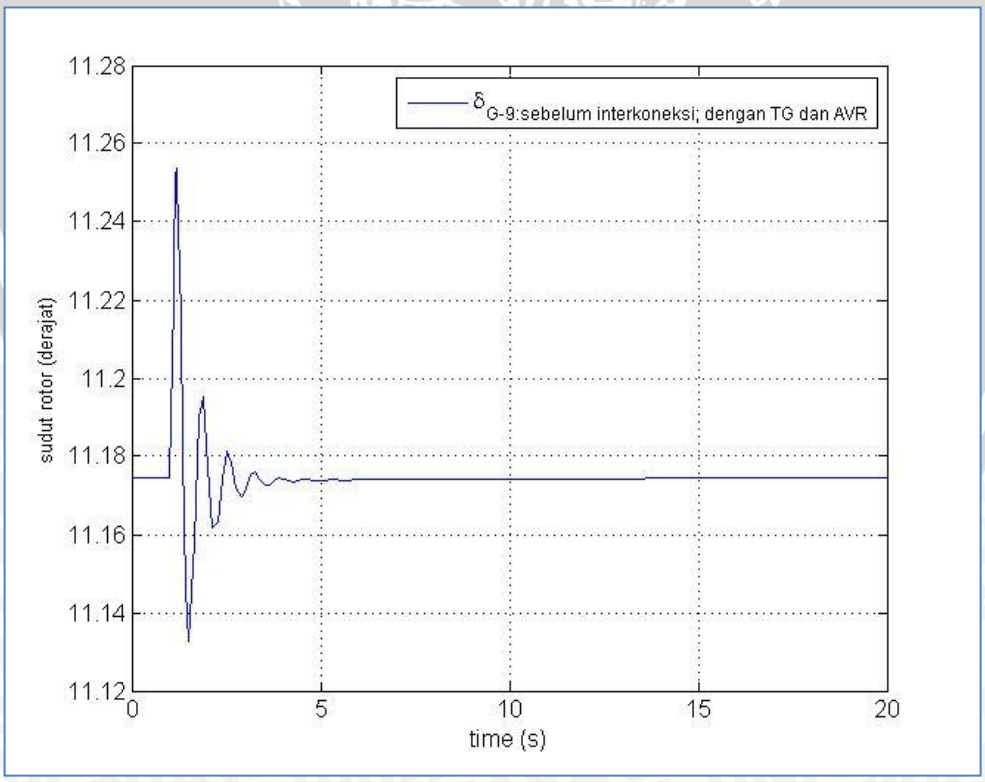
Simulasi stabilitas sistem daya captive *module-2* di PT Badak NGL dilakukan dengan memberikan gangguan pada bus 53. Analisis dilakukan pada salah satu generator yang terdapat pada *bus generator* di *module-2* yaitu bus 54 dan bus 60 dimana masing-masing mewakili generator G-9 dan G-14. Hal ini dilakukan karena generator yang terdapat pada bus ini memiliki karakteristik yang sama. Data yang ditampilkan berupa data grafik mengenai sudut rotor dan frekuensi yang menampilkan kondisi sebelum, sesaat, maupun setelah terjadinya gangguan pada bus 53.

Sebelum melakukan simulasi terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu pengaturan nilai dasar pada perangkat yang digunakan, pada simulasi yang akan dibahas ini menggunakan frekuensi 50 Hz, daya dasar 15.625 MVA dengan tegangan dasar 13800 V atau 13,8 kV. Waktu gangguan dimulai dari detik ke-1 dengan durasi simulasi selama 20 detik, dan waktu gangguan 0,1 detik. Gangguan yang diberikan ialah gangguan hubung singkat 3 fasa seperti yang telah disebutkan dalam batasan masalah. Selain itu, saat gangguan, batas frekuensi yang dianjuran tidak lebih tinggi dari 52 Hz dan lebih rendah dari 47.5 Hz.

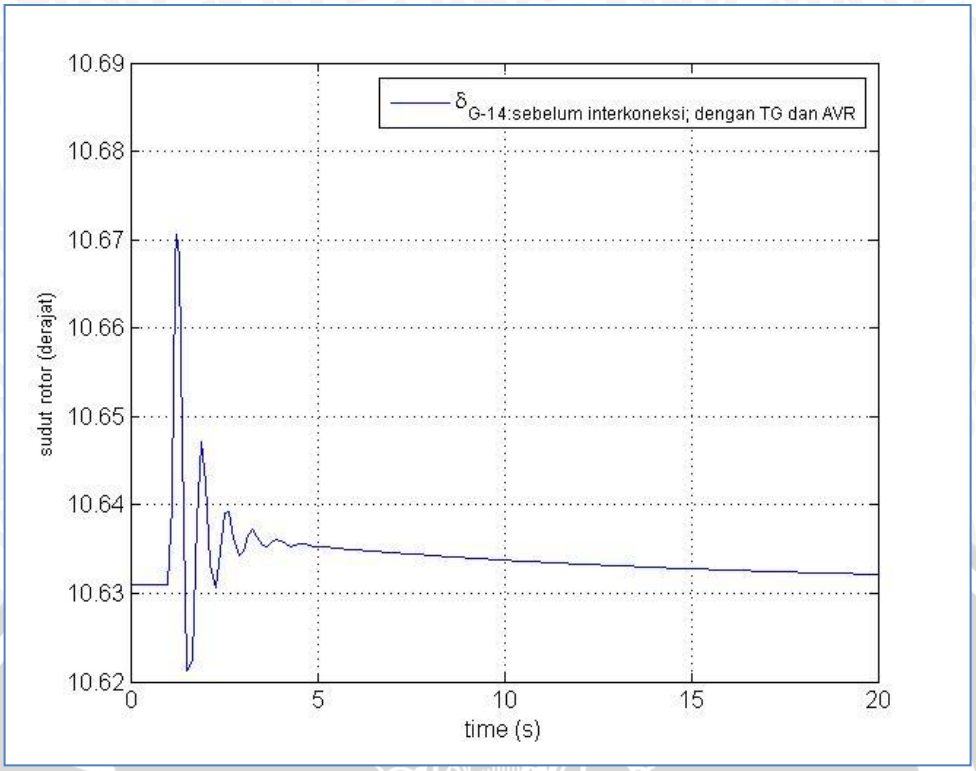
4.9.1.2.1 Simulasi Stabilitas Sudut Rotor di *Captive Module-2* Sebelum Interkoneksi

Hasil simulasi sudut rotor yang telah dilakukan ditampilkan pada gambar 4.50 dan 4.51, kondisi sudut rotor pada generator G-9 ditunjukan pada gambar 4.50. Sebelum terjadi gangguan besar sudut rotor bernilai 11,18^o, sedangkan pada saat terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan (kenaikan) besar mencapai nilai maksimum sebesar 11,25^o ketika 1,18 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu sebesar 11,18^o selama 4,5 detik. Sedangkan pada generator G-14, sebelum terjadi gangguan besar sudut rotor bernilai 10,63^o ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotornya meningkat hingga mencapai 10,67^o ketika 1,24 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu 10,64^o selama 18,1 detik.

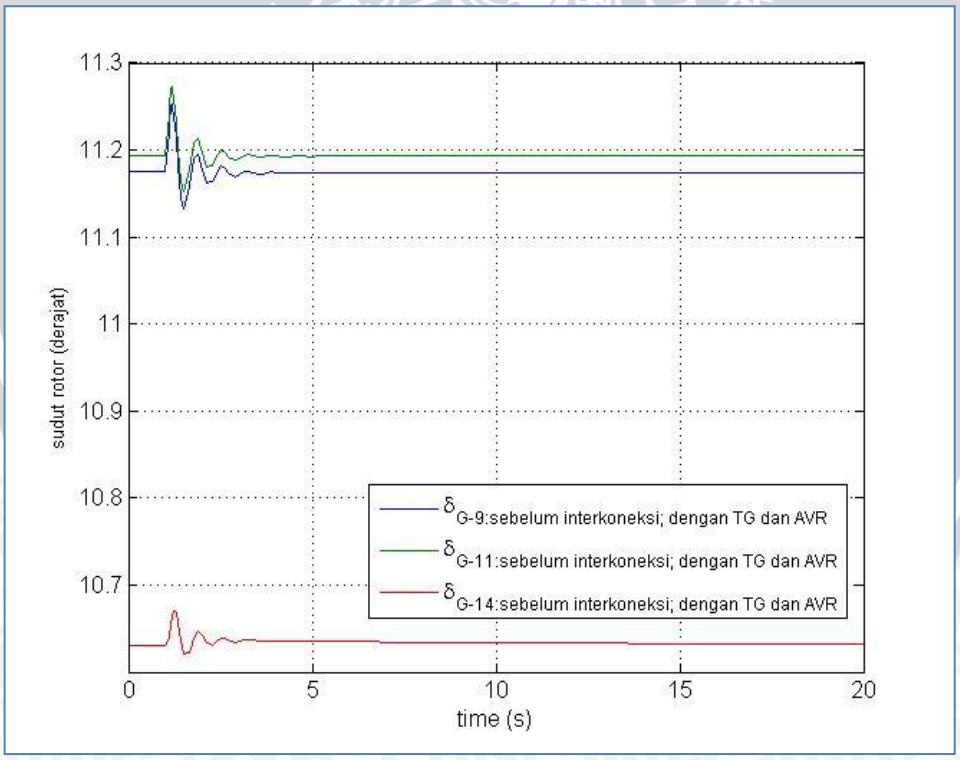
Berdasarkan gambar 4.50 dan 4.51 tersebut, generator G-9 dan G-14 pada kondisi awal memiliki perbedaan sudut rotor karena adanya perbedaan daya yang dikeluarkan oleh kedua generator tersebut. namun, kedua generator tersebut mengalami peningkatan sudut rotor yang hampir sama yaitu sekitar 0,04^o – 0,07^o. Hal ini membuktikan bahwa stabilitas sudut rotor di *module-2* masih dalam kondisi stabil terhadap gangguan hubung singkat tiga (3) fasa pada bus tersebut.



Gambar 4.50 Grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-09 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.51 Grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-14 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

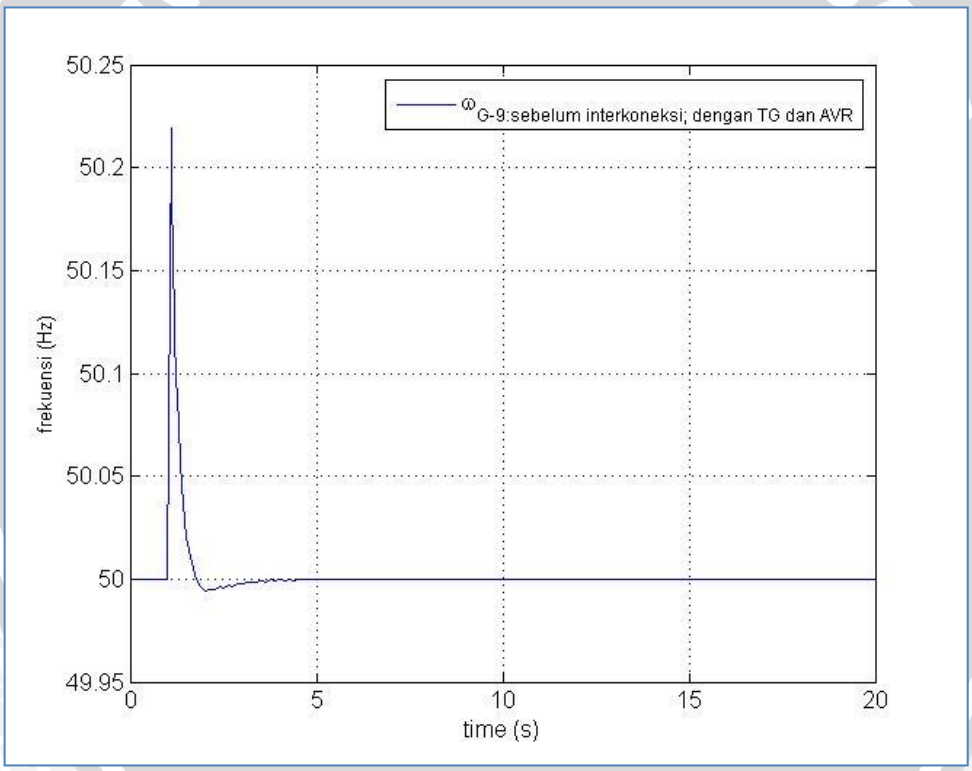


Gambar 4.52 Performa Grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-9, G-11, dan G-14 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

4.9.1.2.2 Simulasi Stabilitas Frekuensi di Captive *Module-2* Sebelum Interkoneksi

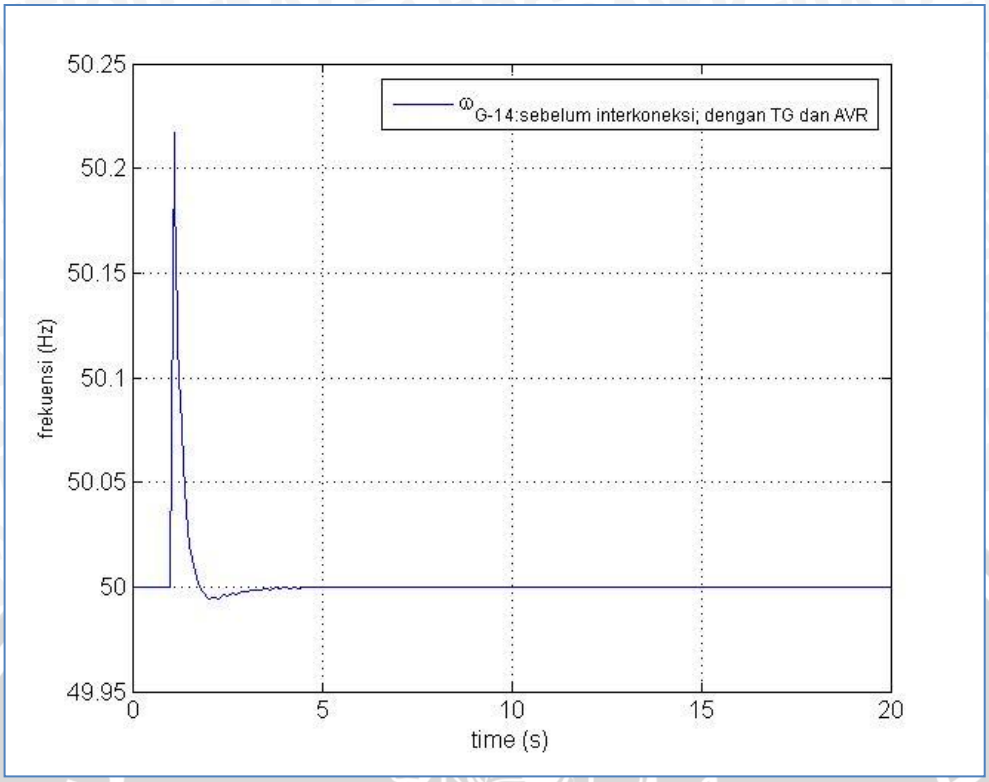
Hasil simulasi stabiitas frekuensi yang telah dilakukan ditunjukan pada gambar 4.53 dan 4.54. Grafik Frekuensi yang dihasilkan oleh generator G-09 ditunjukan pada gambar 4.53, Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi frekuensi hingga mencapai nilai 50,22 Hz pada detik ke-1,1 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal selama 3,5 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

Grafik Frekuensi yang dihasilkan oleh generator G-14 ditunjukan pada gambar 4.54. Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi frekuensi hingga mencapai nilai maksimal sebesar 50,22 Hz pada detik ke-1,1 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal selama 3,5 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

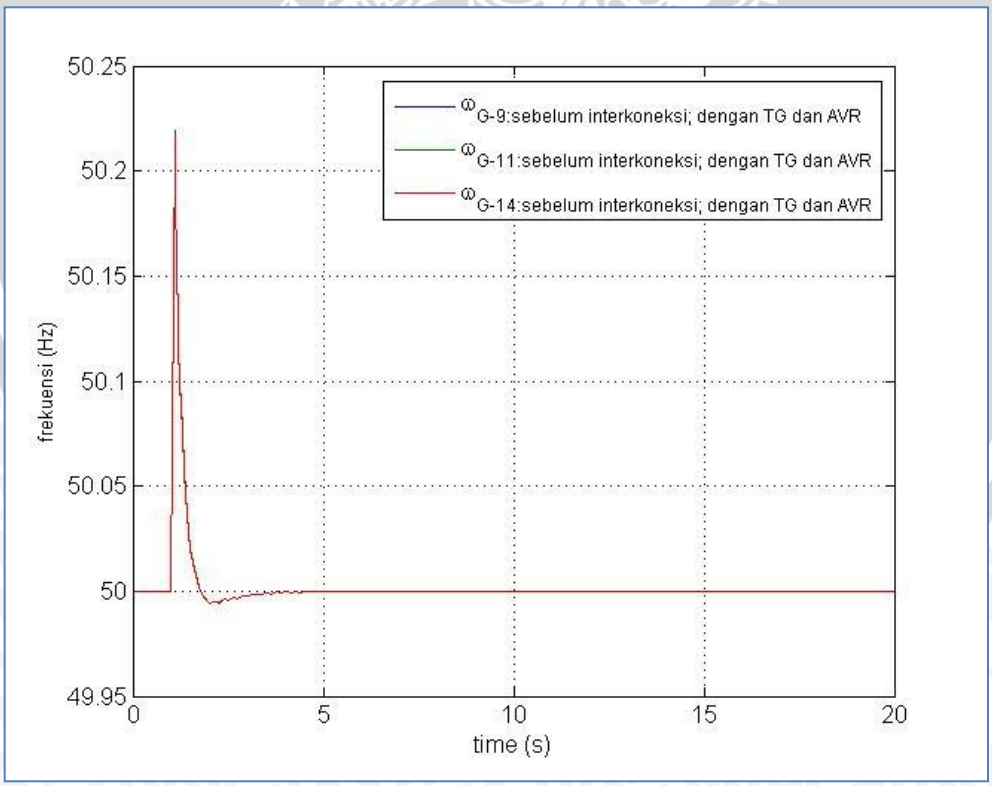


Gambar 4.53 Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-09 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

Berdasarkan gambar 4.53 dan 4.54 tersebut, frekuensi generator G-09 dan G-14 meningkat sebesar 0,22 Hz ketika mengalami gangguan tiga (3) fasa pada bus 53. Saat gangguan, frekuensi tidak melebihi batas yang ditentukan yaitu tidak lebih dari 52 Hz dan tidak kurang dari 47,5 Hz (Permen ESDM: 2007). Frekuensi kedua generator tersebut juga dapat kembali ke kondisi normal yaitu 50 Hz. Hal ini menunjukan bahwa stabilitas frekuensi akibat hubung singkat tiga (3) fasa di *module-2* masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.54 Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-14 sebelum interkoneksi,
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.55 Performa Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-9, G-11,
dan G-14 sebelum interkoneksi,
Sumber : hasil simulasi

4.9.2 Simulasi Stabilitas Sistem Daya Setelah Interkoneksi Dengan Pengaruh Governor dan AVR

Simulasi stabilitas interkoneksi sistem daya ini meliputi tiga (3) aspek yaitu stabilitas sudut rotor, frekuensi. Sebelum melakukan simulasi terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu pengaturan nilai dasar pada perangkat yang digunakan, pada simulasi yang akan dibahas ini menggunakan frekuensi 50 Hz, daya dasar 15.625 MVA dengan tegangan dasar 13800 V atau 13,8 kV. Waktu gangguan dimulai dari detik ke-1 dengan durasi simulasi selama 20 detik, dan waktu gangguan 0,1 detik. Gangguan yang diberikan ialah gangguan hubung singkat 3 fasa seperti yang telah disebutkan dalam batasan masalah. Gangguan terjadi pada bus 53 yang terletak pada *module-2*.

4.9.2.1 Simulasi Stabilitas Sudut Rotor Setelah Interkoneksi

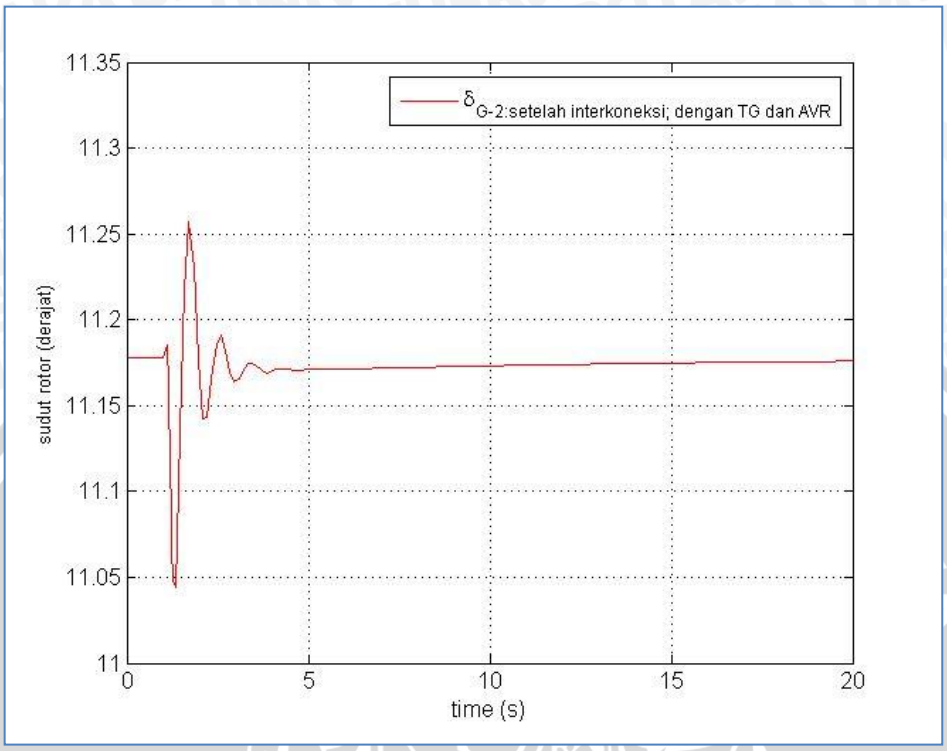
Hasil simulasi sudut rotor yang telah dilakukan ditampilkan pada gambar 4.56, 4.57, 4.58 dan 4.59. Setiap bus yaitu bus 5, bus 12, bus 54 dan bus 60 masing-masing mewakili generator G-2, G-8, G-9 dan G-14. kondisi sudut rotor pada generator G-2 ditunjukan pada gambar 4.56. Sebelum terjadi gangguan besar sudut rotor bernilai 11,17^o, sedangkan pada saat terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan (kenaikan dan penurunan) mencapai nilai maksimum sebesar 11,26^o ketika 1,71 detik dan nilai minimum sebesar 11,04^o ketika 1,33 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu 11,17^o selama 3,7 detik.

Sedangkan pada generator G-8 (gambar 4.57), Sebelum terjadi gangguan besar sudut rotor bernilai 11,35^o, sedangkan pada saat terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan (kenaikan dan penurunan) mencapai nilai maksimum sebesar 11,43^o ketika 1,73 detik dan nilai minimum sebesar 11,23^o ketika 1,33 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu 11,34^o selama 3,5 detik.

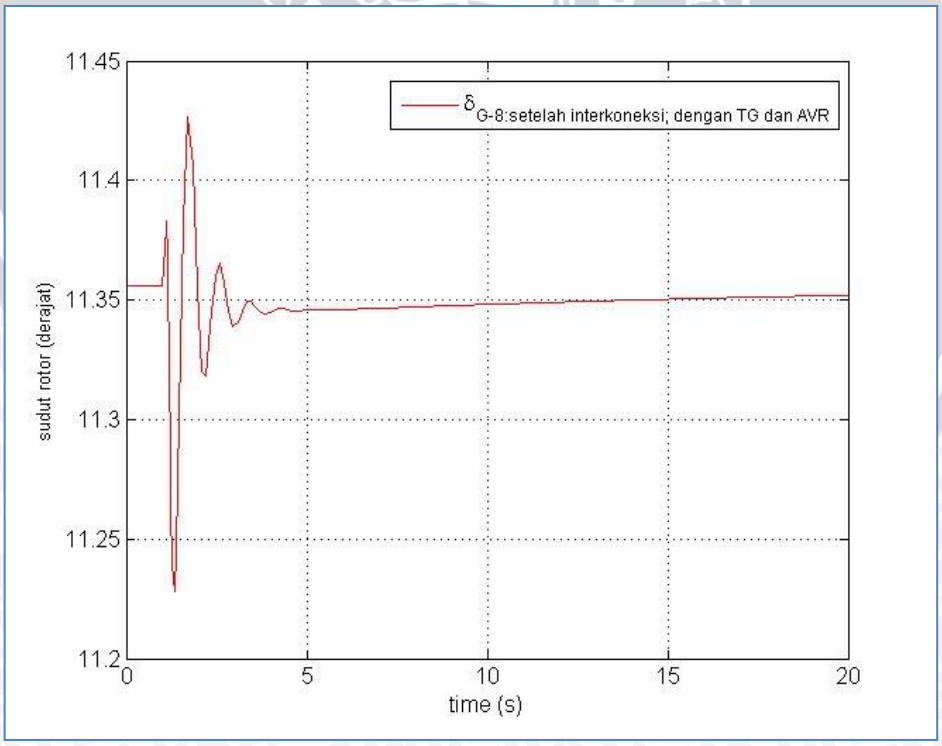
Sedangkan pada generator G-9 (gambar 4.58), Sebelum terjadi gangguan besar sudut rotor bernilai 11,08^o, sedangkan pada saat terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan (kenaikan dan penurunan) mencapai nilai maksimum sebesar 11,16^o ketika 1,73 detik dan nilai minimum sebesar 10,95^o ketika 1,33 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu 11,07^o selama 4,2 detik.

Sedangkan pada generator G-14 (gambar 4.59), Sebelum terjadi gangguan besar sudut rotor bernilai 10,63^o, sedangkan pada saat terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan (kenaikan dan penurunan) mencapai nilai maksimum sebesar 10,71^o ketika

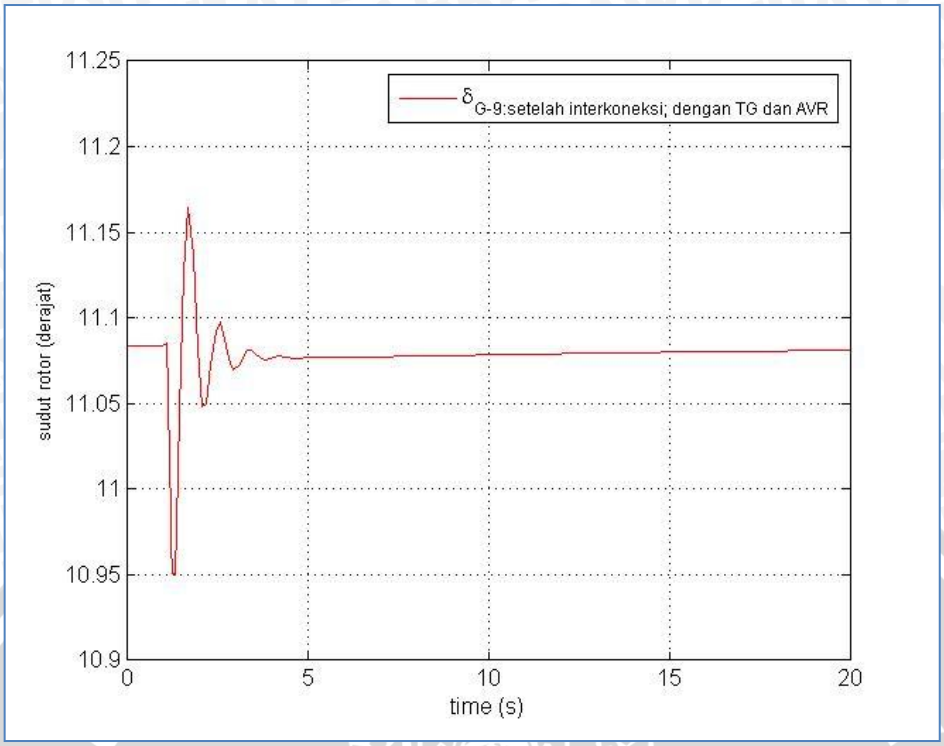
1,72 detik dan nilai minimum sebesar 10,49° ketika 1,24 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali ke kondisi normal yaitu 10,64° selama 5,8 detik.



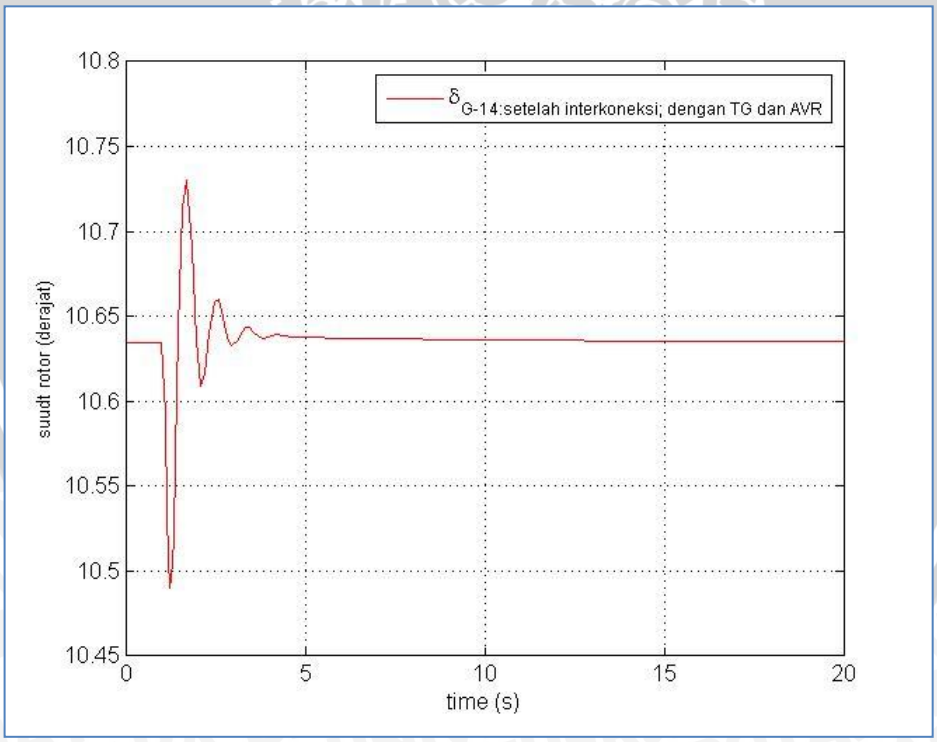
Gambar 4.56 Grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-2 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



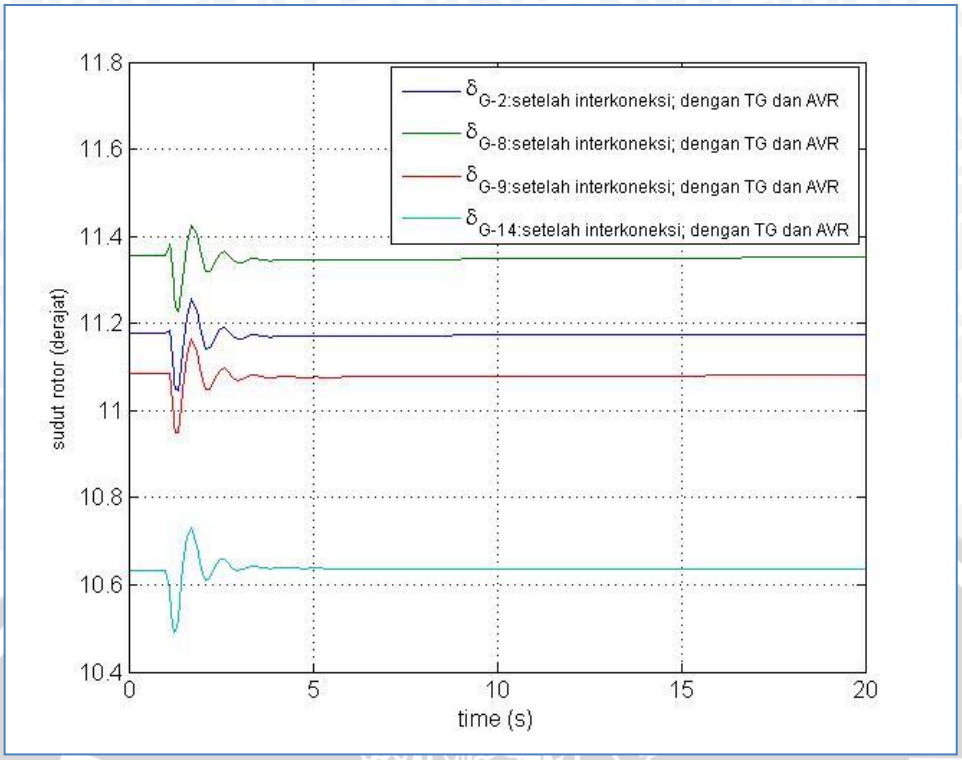
Gambar 4.57 Grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-8 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.58 Grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-9 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.59 Grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-14 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.60 Performa grafik sudut rotor = f(t) pada generator G-2, G-8, G-9, dan G-14 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

Dari pembahasan diatas mengenai stabilitas sudut rotor pada kondisi sebelum interkoneksi maupun sesudah interkoneksi, terlihat bahwa kenaikan sudut rotor generator pada kondisi interkoneksi lebih kecil dari kondisi sebelum interkoneksi. Fluktuasi sudut rotor yang terjadi pada generator G-2 dan G-8 pada kondisi interkoneksi ialah 11,17^{o} dan 11,35^{o} atau 0,27° dan 0,41° lebih kecil jika dibandingkan dengan kondisi sebelum interkoneksi. Sedangkan pada generator G-9 penurunan sudut rotornya 11,08^{o} atau 0,1° lebih kecil dari kondisi sebelum interkoneksi. Namun, untuk waktu gangguan 0,1 detik kedua kondisi sistem menunjukkan bahwa sistem masih dapat kembali dalam keadaan operasi normal atau sinkron. Perbandingan mengenai perubahan sudut rotor tersebut menunjukkan bahwa stabilitas sudut rotor generator di PT Badak NGL pada kondisi interkoneksi lebih baik daripada kondisi *captive*.

4.9.2.2 Simulasi Stabilitas Frekuensi Setelah Interkoneksi

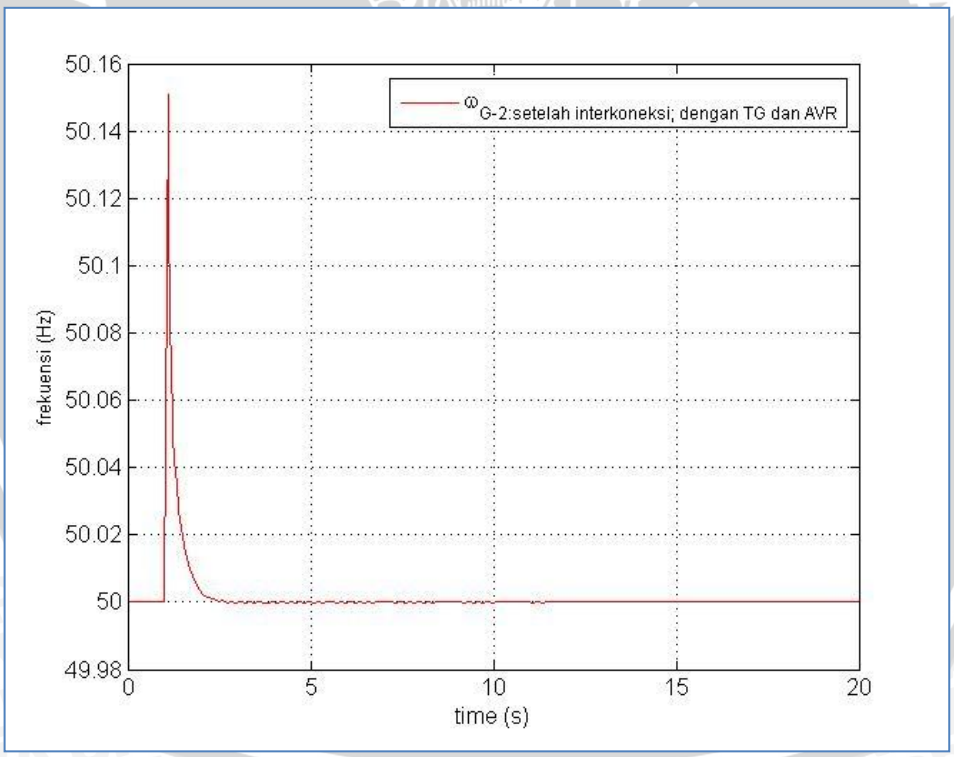
Hasil simulasi frekuensi yang telah dilakukan ditampilkan pada gambar 4.61, 4.62, 4.63, dan 4.64. Setiap bus yaitu bus 6, bus 12, bus 54 dan bus 60 masing-masing mewakili generator G-2, G-8, G-9 dan G-14. Kondisi frekuensi pada generator G-2 ditunjukan pada gambar 4.61. Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi frekuensi hingga mencapai nilai 50,15 Hz pada

detik ke-1,11 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal selama 1,7 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

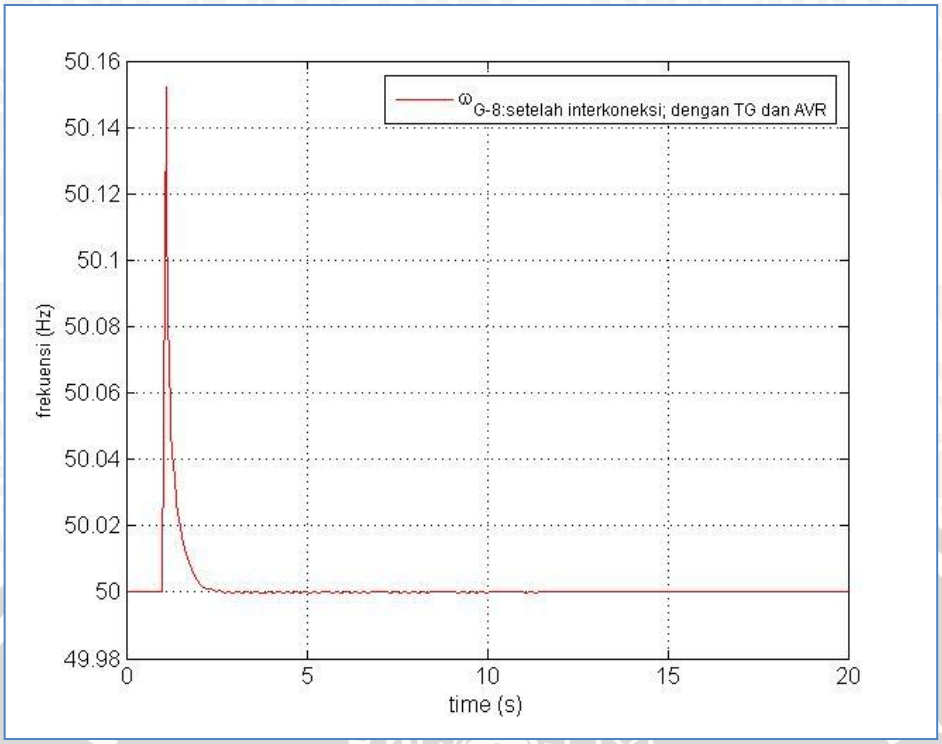
Pada generator G-8 (gambar 4.62), Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi frekuensi hingga mencapai nilai 50,15 Hz pada detik ke-1,12 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal selama 1,8 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

Pada generator G-9 (gambar 4.63), Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi frekuensi hingga mencapai nilai 50,15 Hz pada detik ke-1,11 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal selama 1,8 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

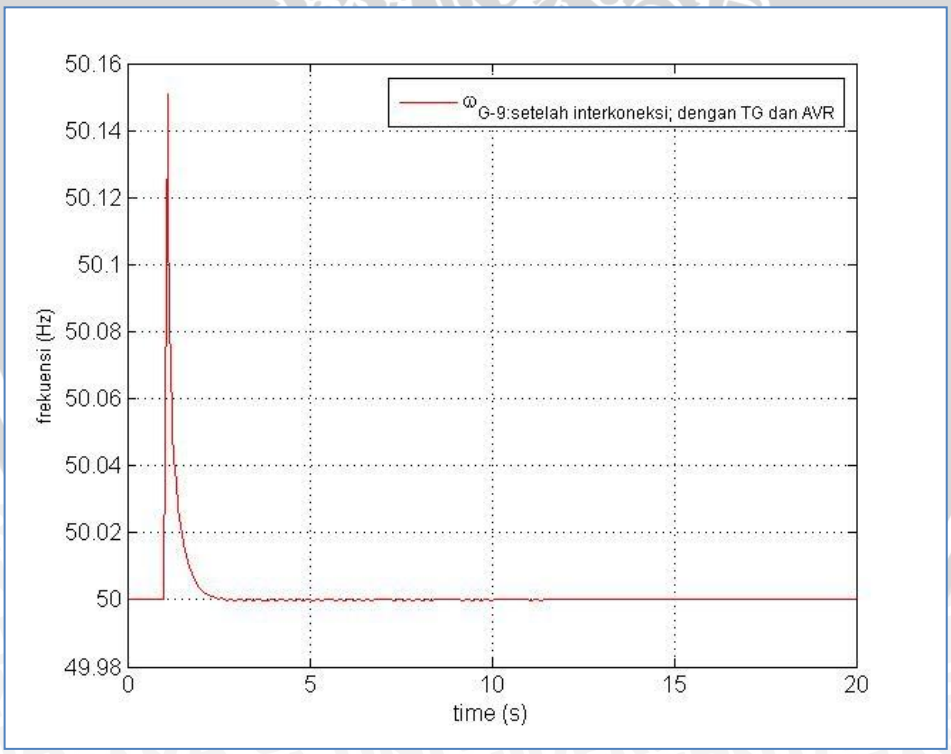
Pada generator G-14 (gambar 4.64), Sebelum terjadinya gangguan, generator bekerja pada frekuensi dasar yaitu 50 Hz. Namun pada saat gangguan, generator mengalami fluktuasi rekuensi hingga mencapai nilai 50,15 Hz pada detik ke-1,12 setelah gangguan. Namun frekuensi berubah kembali ke kondisi normal 1,8 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.



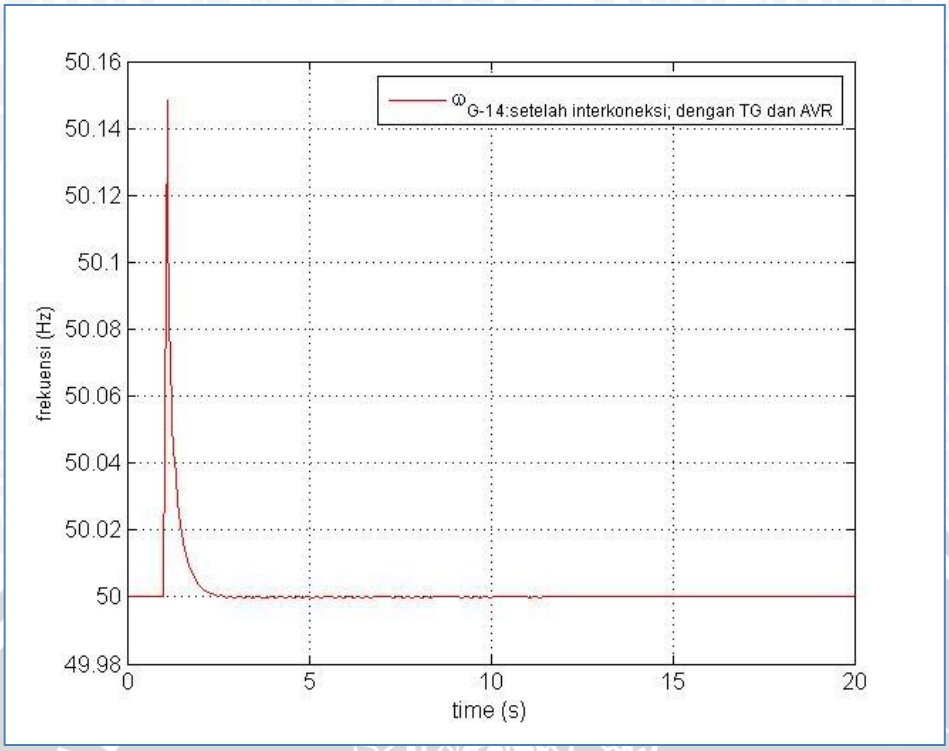
Gambar 4.61 Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-2 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



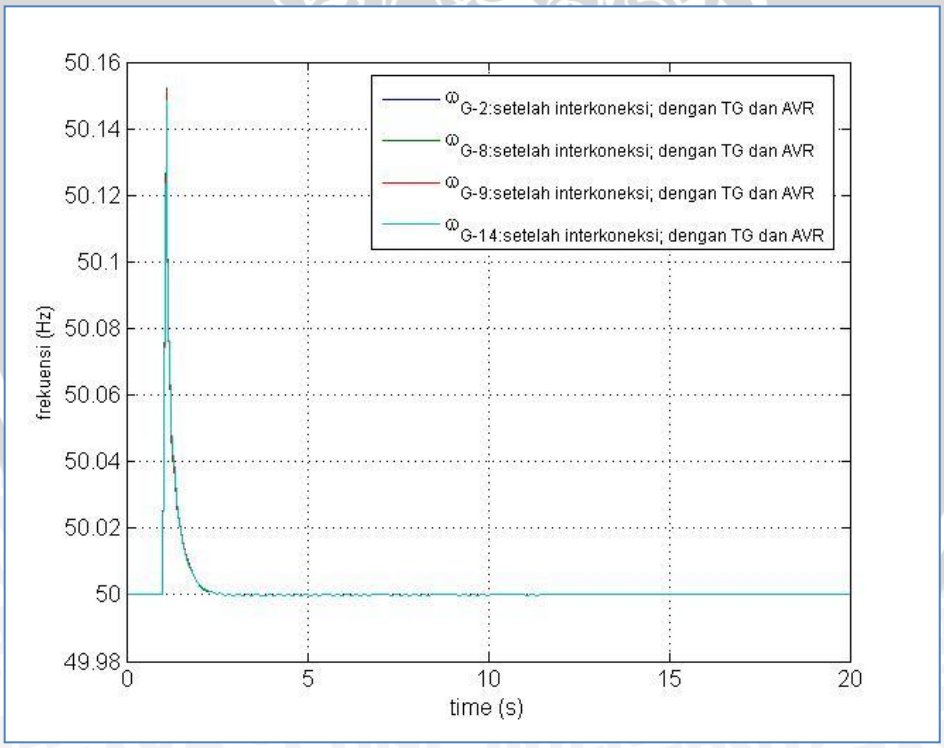
Gambar 4.62 Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-8 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.63 Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-9 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.64 Grafik frekuensi = f(t) pada generator G-14 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.65 Performa grafik frekuensi = f(t) pada generator G-2, G-8, G-9 dan G-14 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

4.10 Perbandingan Stabilitas Sudut Rotor Generator

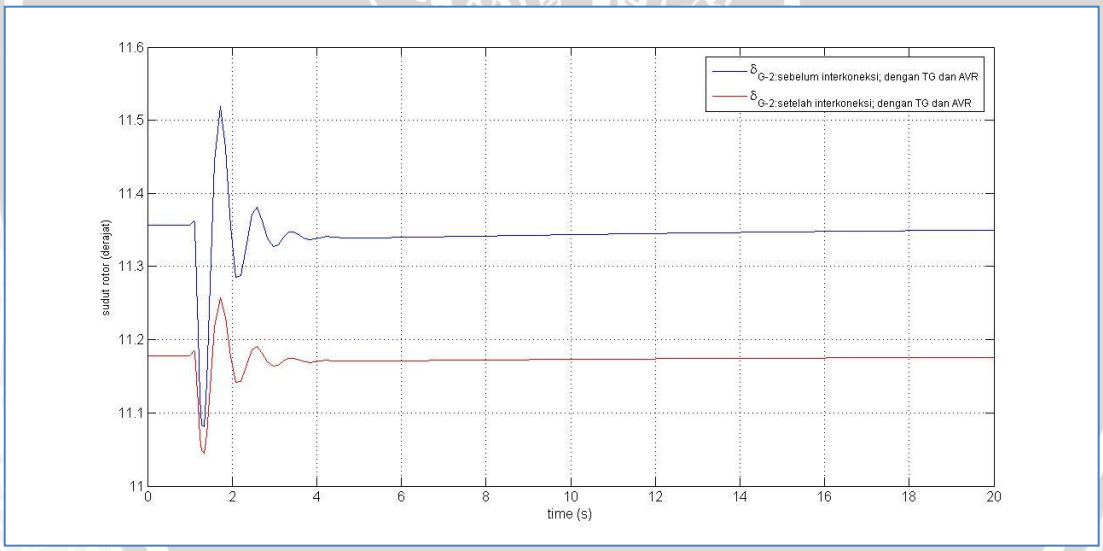
Tabel 4.27 Perbandingan stabilitas sudut rotor generator

Generator	Sebelum interkoneksi		Setelah interkoneksi	
	δ (°)	$t_{pemulihan}$ (detik)	δ (°)	$t_{pemulihan}$ (detik)
G-02	11,34	13,5	11,17	3,7
G-08	10,94	4,6	11,35	3,5
G-09	11,18	4,5	11,08	4,2
G-14	10,63	18,1	10,63	5,8

Sumber : Hasil simulasi

Grafik perbandingan stabilitas sudut rotor pada generator di Kilang PT Badak NGL ditunjukkan pada Gambar 4.66 – 4.69. Pada grafik tersebut ditunjukkan bagaimana perbedaan perubahan sudut rotor generator pada kondisi peralihan dan perbedaan waktu yang diperlukan generator untuk dapat beroperasi pada kondisi sinkronnya setelah terjadi gangguan.

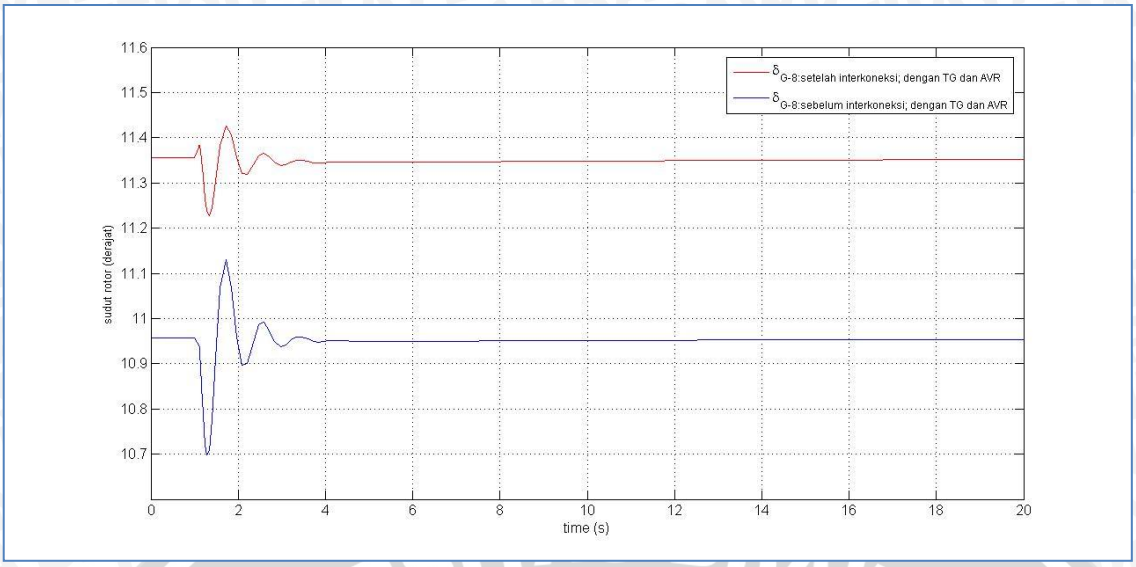
Dari tabel diatas diketahui bahwa waktu pemulihan gangguan yang dibutuhkan sistem saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.



Gambar 4.66 Perbandingan grafik sudut rotor = f (t) pada generator G-02 sebelum dan setelah interkoneksi

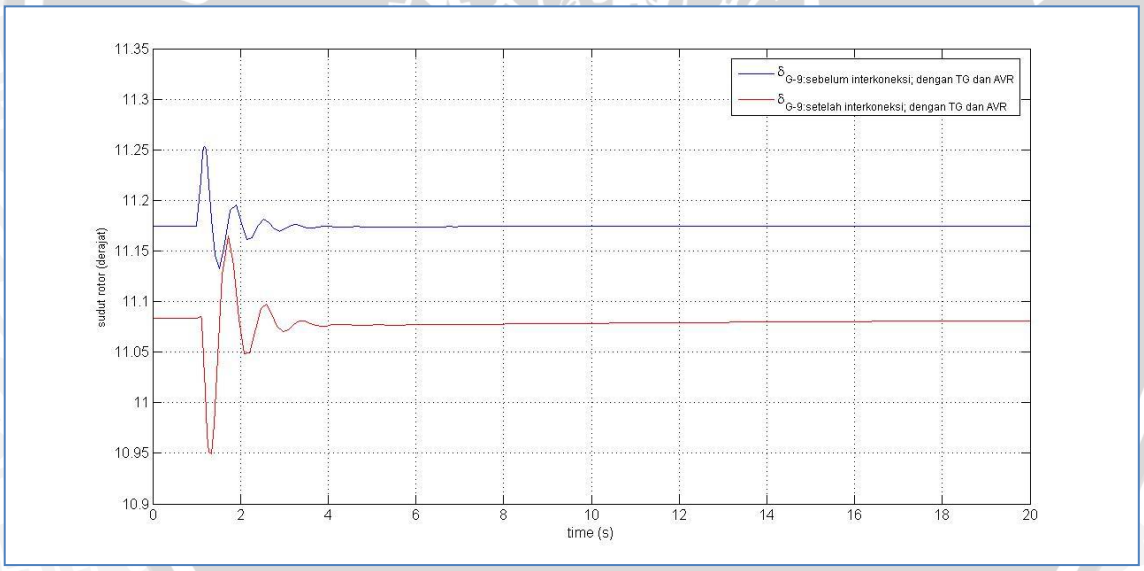
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas (gambar 4.66) diketahui bahwa waktu pemulihan gangguan yang dibutuhkan sistem saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.



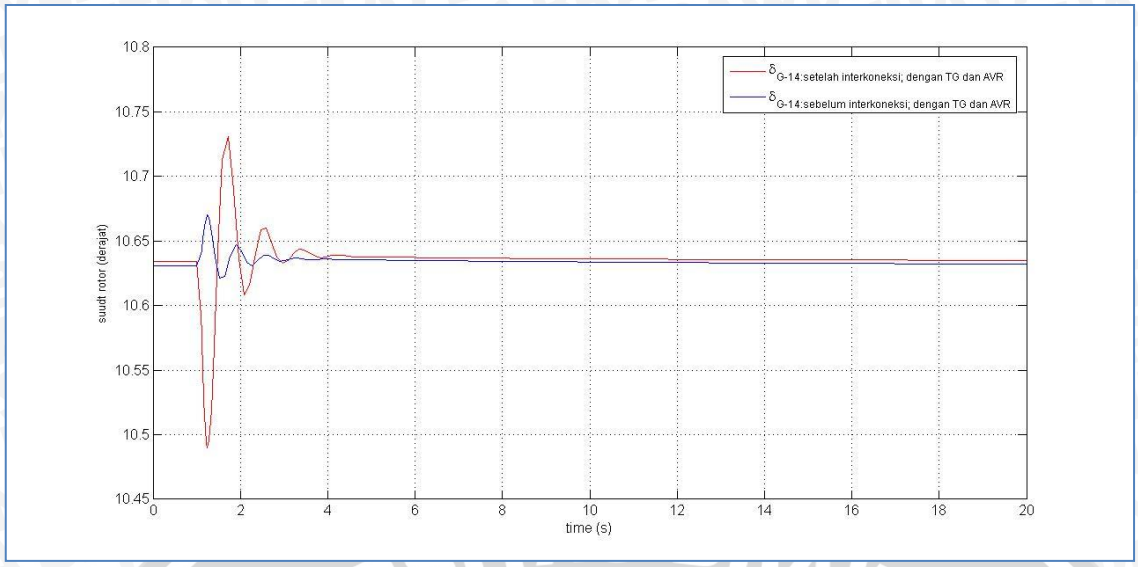
Gambar 4.67 Perbandingan grafik sudut rotor = f (t) pada generator G-08 sebelum dan setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas (gambar 4.67) diketahui bahwa waktu pemulihan gangguan yang dibutuhkan sistem saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.



Gambar 4.68 Perbandingan grafik sudut rotor = f (t) pada generator G-09 sebelum dan setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas diketahui bahwa waktu pemulihan gangguan yang dibutuhkan sistem saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.



Gambar 4.69 Perbandingan grafik sudut rotor = f (t) pada generator G-14 sebelum dan setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas diketahui bahwa waktu pemulihan gangguan yang dibutuhkan sistem saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.

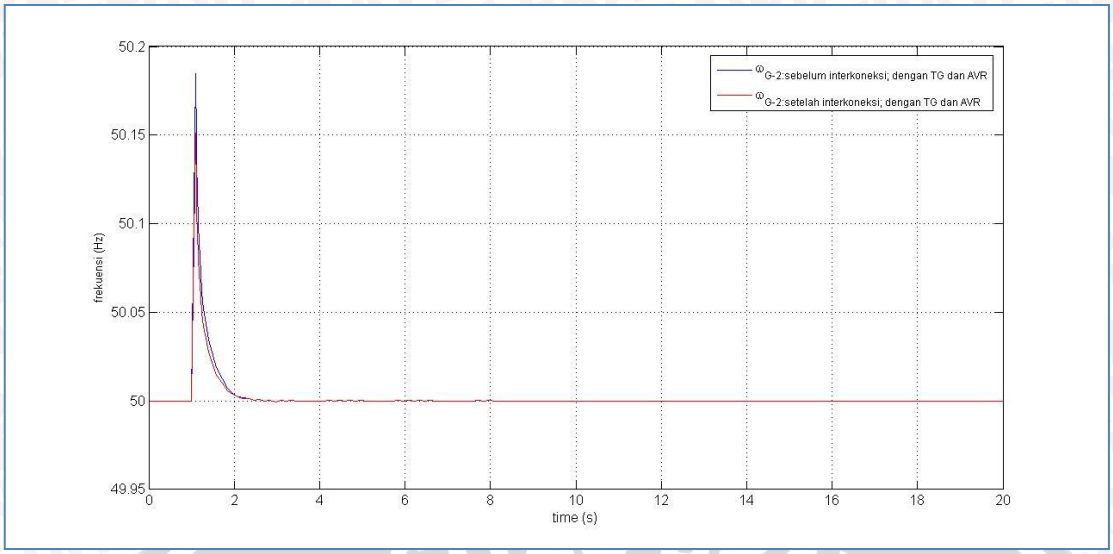
4.11 Perbandingan Stabilitas Frekuensi Generator

Tabel 4.28 Perbandingan stabilitas frekuensi generator

Generator	Sebelum interkoneksi		Setelah interkoneksi	
	f **(Hz)**	$t_{pemulihan}$ **(detik)**	***f*** **(Hz)**	$t_{pemulihan}$ **(detik)**
30-PG-02	50,18	2,3	50,15	1,7
30-PG-03	50,18	2,2	50,15	1,8
30-PG-09	50,22	3,5	50,15	1,8
30-PG-13	50,22	3,5	50,15	1,8

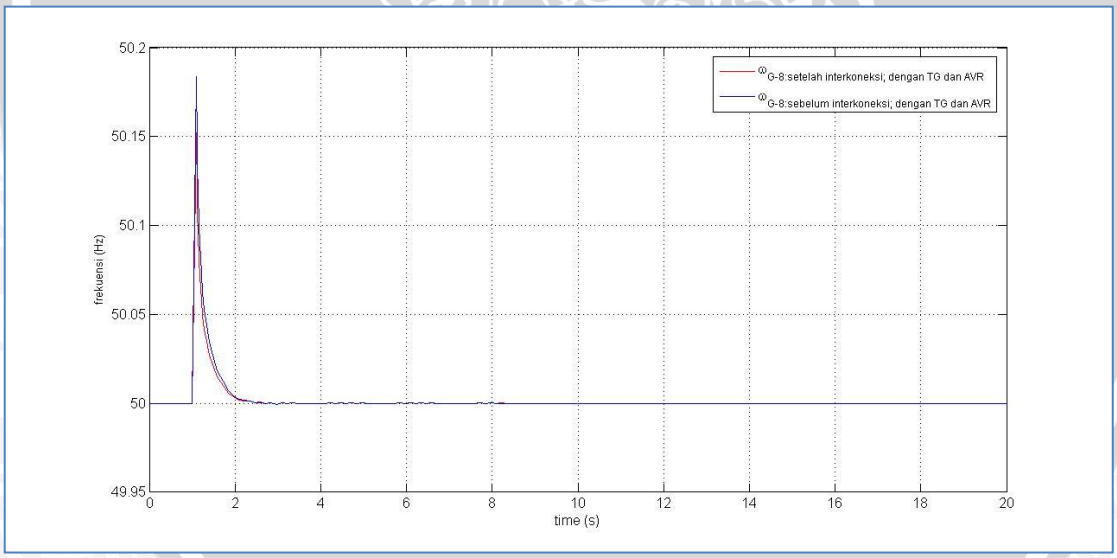
Sumber : Hasil simulasi (*f* = frekuensi)

Grafik perbandingan stabilitas sudut rotor pada generator di Kilang PT Badak NGL ditunjukkan pada Gambar 4.70 – 4.71. Pada grafik tersebut ditunjukkan bagaimana perbedaan perubahan frekuensi generator pada kondisi peralihan dan perbedaan waktu yang diperlukan generator untuk dapat beroperasi pada frekuensi kerjanya setelah terjadi gangguan.



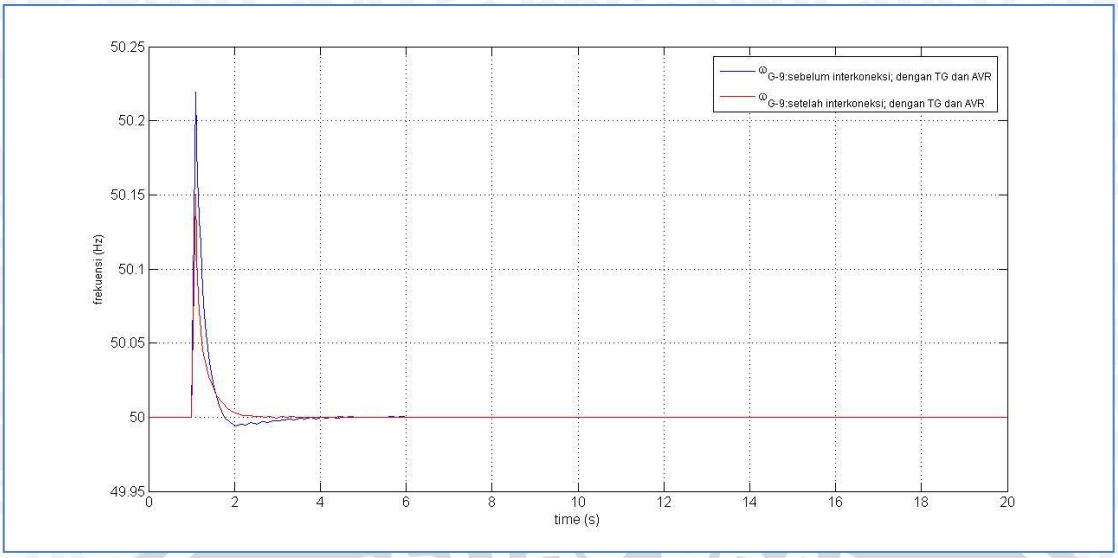
Gambar 4.70 Perbandingan grafik frekuensi = f (t) pada generator G-02 sebelum dan setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas (gambar 4.70) diketahui bahwa waktu pemulihan yang dibutuhkan sistem setelah gangguan saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.



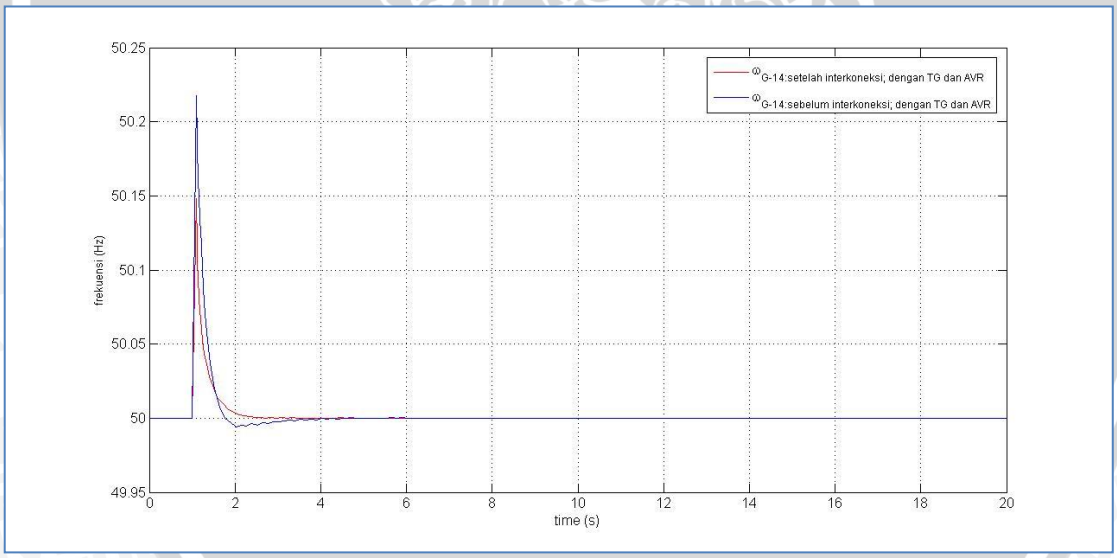
Gambar 4.71 Perbandingan grafik frekuensi = f (t) pada generator G-08 sebelum dan setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas (gambar 4.71) diketahui bahwa waktu pemulihan yang dibutuhkan sistem setelah gangguan saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.



Gambar 4.72 Perbandingan grafik frekuensi = f (t) pada generator G-09 sebelum dan setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas diketahui bahwa waktu pemulihan yang dibutuhkan sistem setelah gangguan saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.



Gambar 4.73 Perbandingan grafik frekuensi = f (t) pada generator G-14 sebelum dan setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Dari perbandingan gambar grafik diatas diketahui bahwa waktu pemulihan yang dibutuhkan sistem setelah gangguan saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.

4.12 Simulasi Pengaruh *Turbin Governor (TG)* dan Kontrol *AVR* pada Stabilitas Sistem Daya Interkoneksi

Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari *Turbine Governor (TG)* dan kontrol *Automatic Voltage Regulator (AVR)* pada stabilitas interkoneksi sistem kelistrikan di PT Badak NGL.

Simulasi ini dilakukan dalam tiga tahap yaitu:

1. Simulasi dengan menggunakan *Automatic Voltage Regulator (AVR)* dan *Turbine Governor (TG).*
2. Simulasi dengan melepas *Automatic Voltage Regulator (AVR)* dan masih menggunakan *Turbine Governor (TG).*
3. Simulasi dengan melepas *Turbine Governor (TG)* dan masih menggunakan *Automatic Voltage Regulator (AVR).*

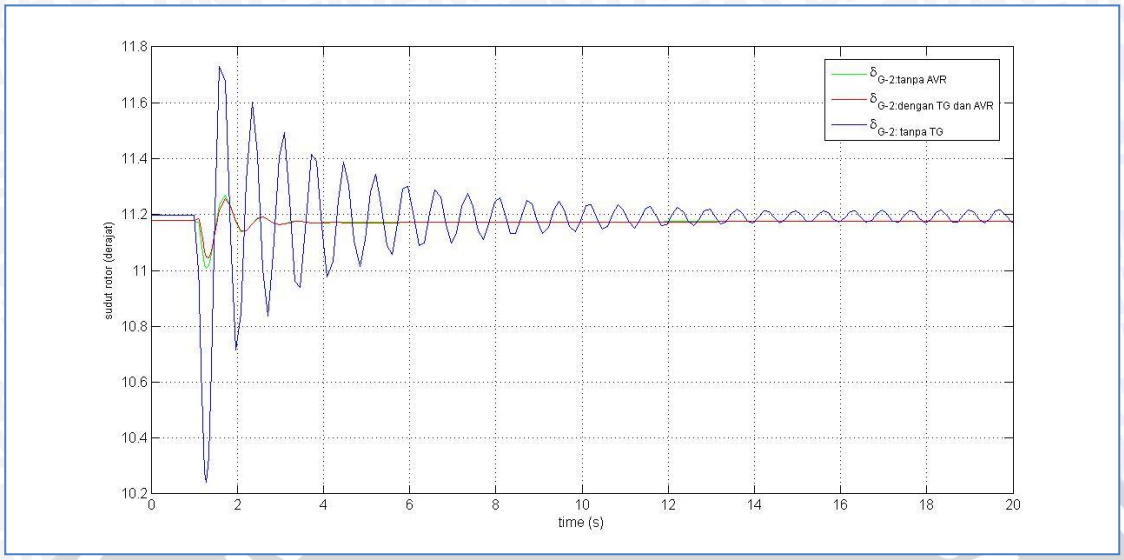
Selain itu, tujuan lain dari simulasi ini ialah untuk menetahui kinerja sistem apabila *Turbine Governor (TG)* gagal bekerja, simulasi ini dibatasi untuk pengaruh *TG* dan *AVR* pada saat gangguan terjadi di bus 53 dengan objek pembahasan pada stabilitas sudut rotor dan frekuensi pada generator G-2, dan G-9.

4.12.1 Simulasi Pengaruh *TG* dan *AVR* terhadap Stabilitas Sudut Rotor pada Generator G-2 dan G-9

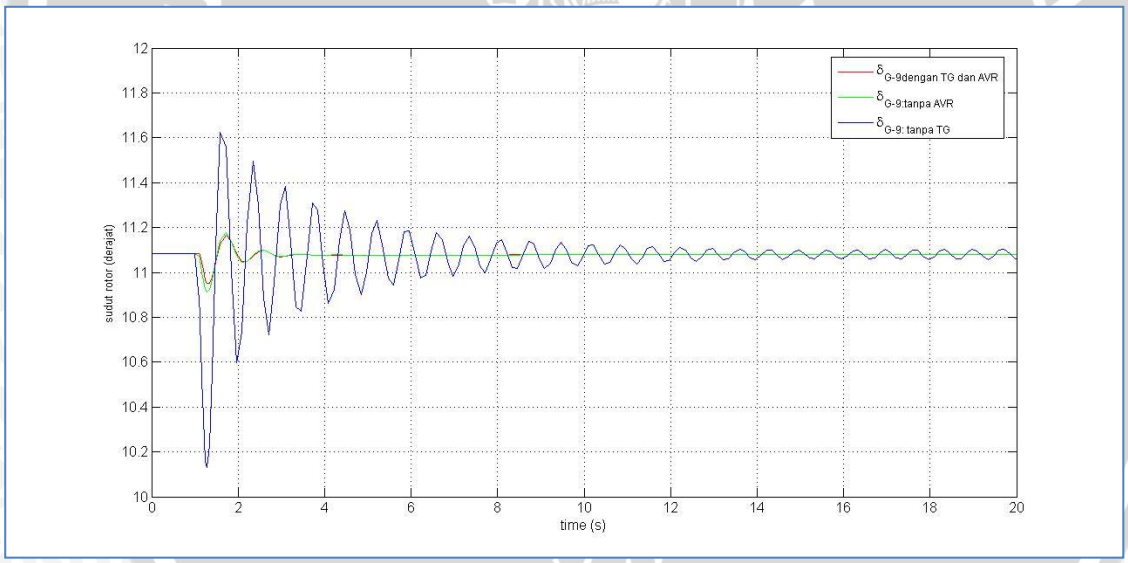
Pada penjelasan sebelumnya, simulasi ini dilakukan sebanyak tiga (3) tahap, hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.74 dan 4.75. Gambar tersebut merupakan grafik sudut rotor (p.u.;derajat) sebagai fungsi waktu dengan referensi sudut rotor generator G-7. Penggunaan satuan p.u. dan referensi sudut rotor dimaksudkan untuk mengetahui osilasi yang terjadi pada sudut rotor generator.

Pada gambar 4.74 diketahui bahwa sudut rotor generator G-2 yang dilengkapi dengan *TG* dan *AVR* maupun salah satunya, mengalami lonjakan ketika terjadi gangguan dengan amplitudo maksimum 0,088 p.u. terhadap referensi sudut rotor generator G-7. Kemudian sudut rotor generator mengalami osilasi peralihan dalam waktu yang cukup singkat hingga berada pada keadaan mantap dan generator mampu berada pada operasi kerja sinkron dengan generator lainnya. Sedangkan pada generator G-2 yang tidak dilengkapi *TG*, lonjakan sudut rotor sebesar 0,0852 p.u. terhadap referensi sudut rotor generator G-7. Namun, generator mengalami osilasi peralihan yang cukup besar dalam waktu lama dan belum dapat kembali pada kondisi sinkron selama periode simulasi berlangsung.

Pada gambar 4.75, hal yang sama terjadi pada generator G-9, bila tidak dilengkapi dengan *AVR* maka generator akan mengalami osilasi yang besar.



Gambar 4.74 Grafik sudut rotor = *f (t)* pada generator G-2
Sumber : Hasil simulasi

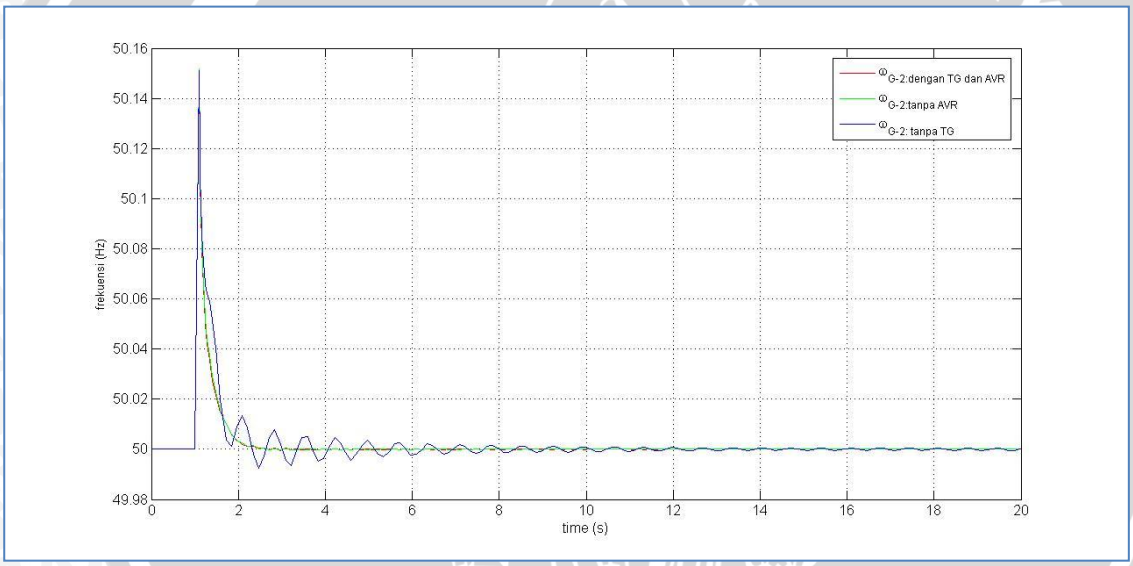


Gambar 4.75 Grafik sudut rotor = *f(t)* pada generator G-9
Sumber : Hasil simulasi

Berdasarkan uraian dari kedua gambar di atas dijelaskan bahwa *AVR* sangat berpengaruh pada pengaturan generator setelah terjadi gangguan, sedangkan *TG* tidak berpengaruh terhadap stabilitas sudut rotor generator.

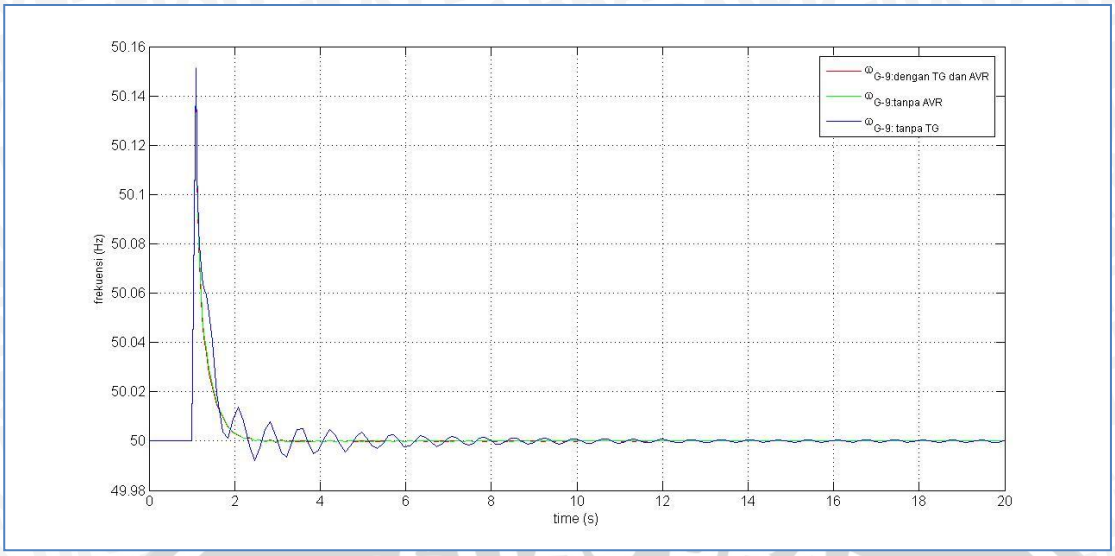
4.12.2 Simulasi Pengaruh *TG* dan *AVR* terhadap Stabilitas Frekuensi Pada Generator G-2 dan G-9

Sama seperti pada simulasi sebelumnya, simulasi frekuensi ini dilakukan sebanyak tiga (3) tahap, hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.76 dan 4.77. Gambar tersebut merupakan grafik karakteristik frekuensi sebagai fungsi waktu dengan referensi frekuensi generator G-7. Pada Gambar 4.76 diketahui bahwa sudut frekuensi G-2 yang dilengkapi dengan *TG* dan *AVR* maupun salah satunya mengalami penurunan ketika terjadi gangguan dengan amplitudo maksimum 0,0199 p.u. Kemudian frekuensi generator mengalami osilasi teredam dalam waktu yang cukup singkat hingga berada pada keadaan mantap (*Steady-State*) yaitu frekuensi 50 Hz. Sedangkan pada generator G-2 yang tidak dilengkapi *TG*, generator tersebut mengalami peningkatan frekuensi sebesar 50,15 Hz, Setelah gangguan, generator mengalami osilasi peralihan yang cukup besar dan membutuhkan waktu beberapa detik untuk kembali ke kondisi awal (*Steady-State*) setelah terjadinya gangguan.



Gambar 4.76 Grafik frekuensi = *f (t)* pada generator G-2
Sumber : Hasil simulasi

Pada gambar 4.77, hal yang sama terjadi pada generator G-9, bila tidak dilengkapi dengan *TG* maka frekuensi generator akan mengalami osilasi peralihan yang besar setelah gangguan dihilangkan dari sistem.



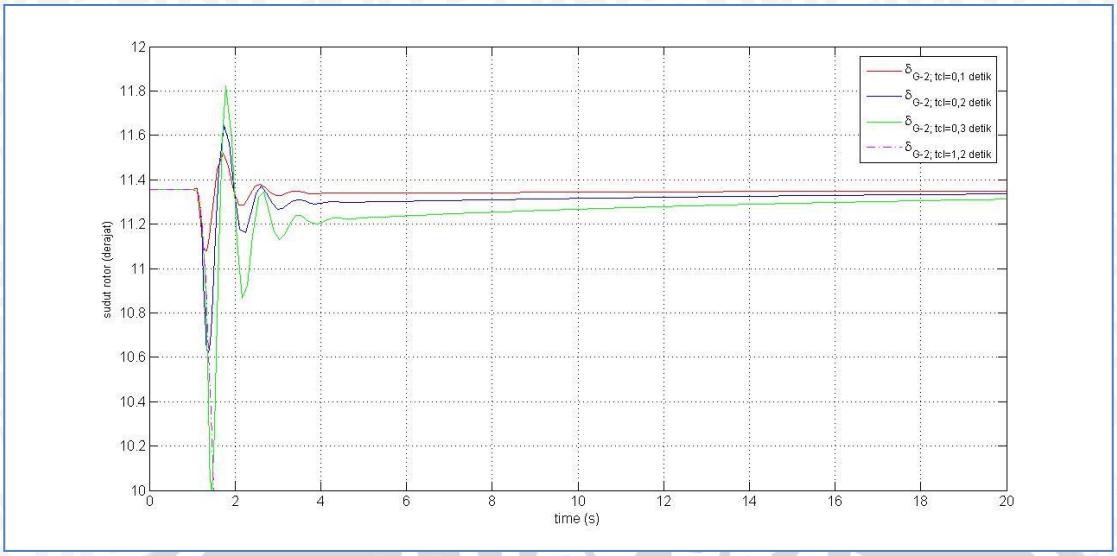
Gambar 4.77 Grafik frekuensi = *f (t)* pada generator G-9
Sumber : Hasil simulasi

Berdasarkan penjelasan dan uraian kedua gambar tersebut, dapat diketahui bahwa *TG* sangat berpengaruh pada pengaturan frekuensi generator setelah terjadi gangguan, sedangkan *AVR* tidak berpengaruh pada frekuensi generator. Hal tersebut ditunjukkan melalui waktu yang diperlukan generator untuk dapat kembali pada frekuensi kerjanya.

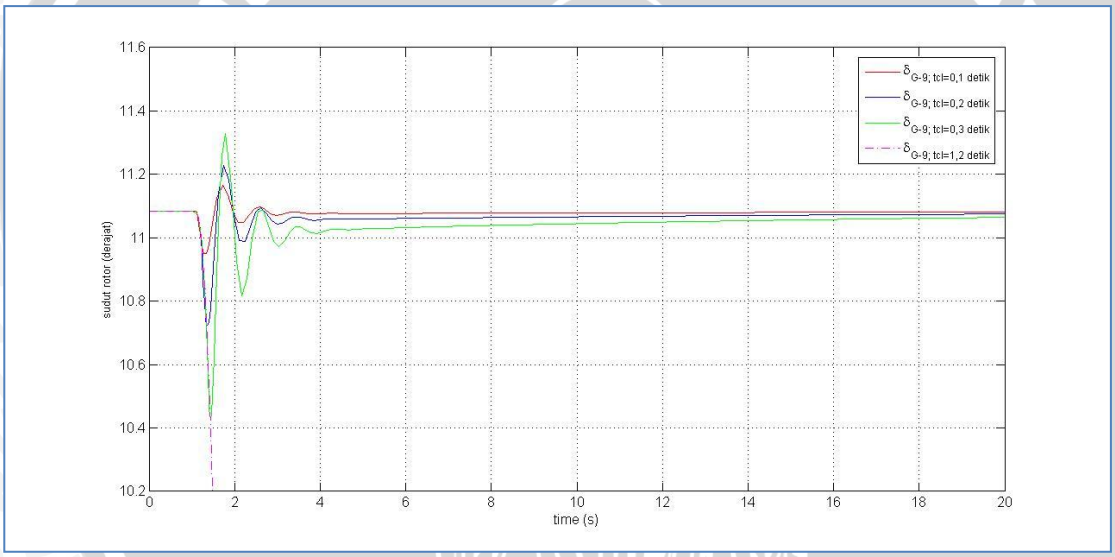
4.13 Waktu Pemutusan Kritis

Untuk dapat mengetahui waktu pemutusan kritis pada sistem daya sebelum dan setelah interkoneksi di Kilang PT Badak LNG, maka dapat dilakukan melalui cara *trial and error* dengan mengubah – ubah nilai waktu gangguan. Dalam hal ini dilakukan simulasi stabilitas dengan durasi gangguan 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; dan waktu gangguan ketika sudut rotor generator mengalami lepas sinkron.

Gambar 4.78 dan 4.79 menunjukkan sudut rotor generator dengan 4 macam waktu gangguan. Dari hasil simulasi dapat diperoleh kondisi sudut rotor generator G-2 dan G-9. Dalam Gambar 4.78 terlihat kondisi sudut rotor generator G-2 pada beberapa jenis waktu gangguan. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa generator G-2 mengalami lepas sinkron pada gangguan yang berlangsung selama 1,2 detik.



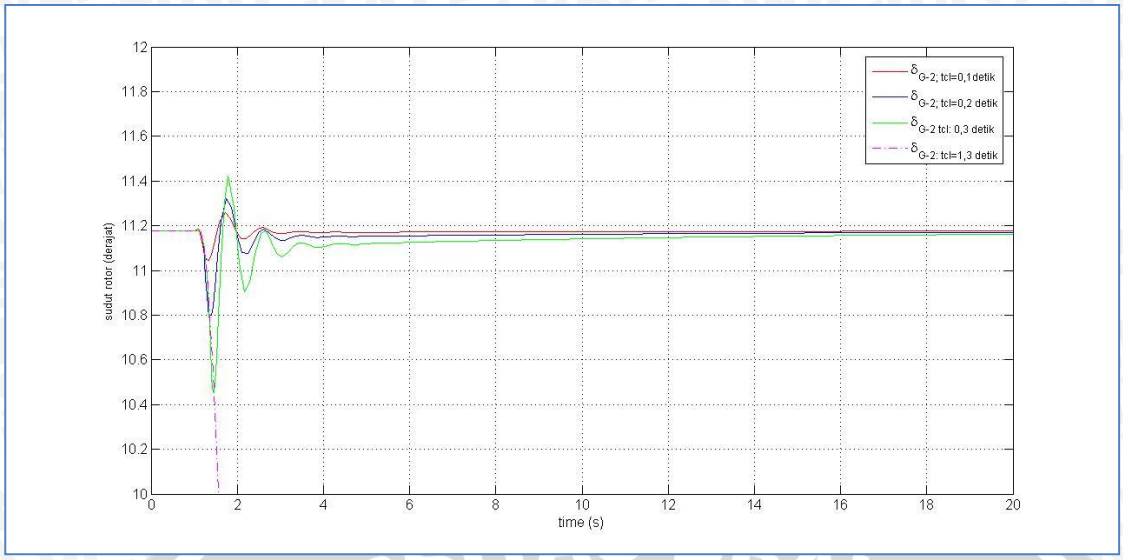
Gambar 4.78 Grafik sudut rotor = f(t) generator G-2 dengan 4 waktu gangguan pada kondisi sebelum interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi



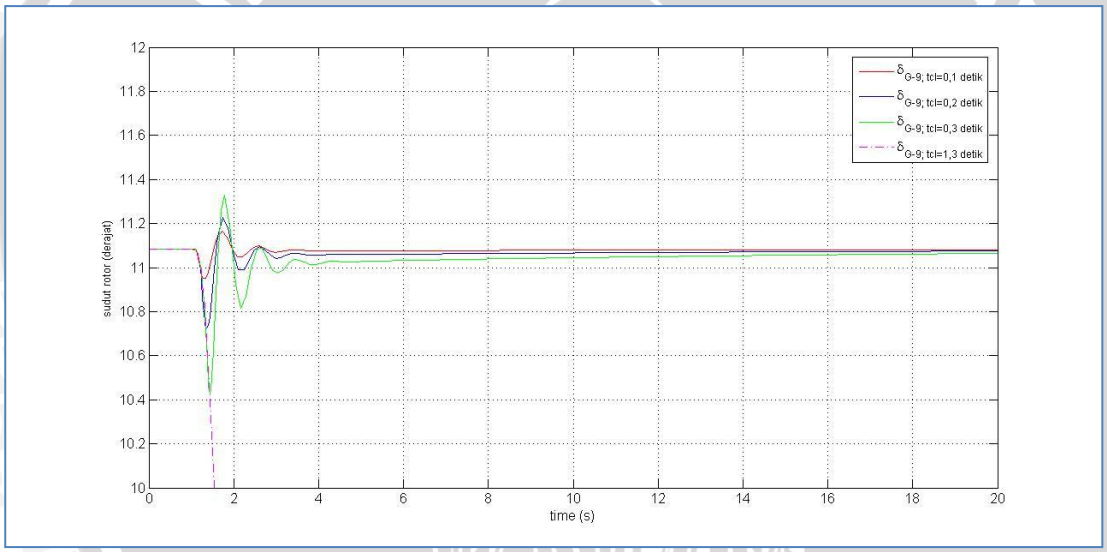
Gambar 4.79 grafik sudut rotor = f(t) generator G-9 dengan 4 waktu gangguan pada kondisi sebelum interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

Gambar 4.79 menunjukkan kondisi sudut rotor generator G-9 pada beberapa jenis waktu gangguan. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa G-9 mengalami lepas sinkron pada gangguan yang berlangsung selama 1,2 detik.

Sedangkan pada kondisi setelah interkoneksi, sudut rotor generator ditunjukkan pada Gambar 4.80 dan 4.81. Dari gambar tersebut diperoleh hasil bahwa pada kondisi interkoneksi G-2 mengalami lepas sinkron pada gangguan yang berlangsung selama 1,3 detik dan G-9 pada 1,3 detik.



Gambar 4.80 Grafik sudut rotor = f(t) generator G-2 dengan 4 waktu gangguan pada kondisi setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi



Gambar 4.81 Grafik sudut rotor = f(t) generator G-9 dengan 4 waktu gangguan pada kondisi setelah interkoneksi
Sumber : Hasil simulasi

4.14 Simulasi Pelepasan Beban

4.14.1 Simulasi Sebelum Interkoneksi

Simulasi ini menampilkan pengaruh perubahan beban terhadap frekuensi pada sistem daya di PT Badak NGL Bontang. Sebelum melakukan simulasi terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu pengaturan nilai dasar pada perangkat yang digunakan, pada simulasi yang akan dibahas ini menggunakan frekuensi 50 Hz, daya dasar 15.625 MVA dengan tegangan dasar 13800 V atau 13,8 kV. Selain itu, saat gangguan, batas frekuensi yang dianjuran tidak lebih tinggi dari 52 Hz dan lebih rendah dari 47.5 Hz (Permen ESDM: 2007). Untuk data dinamik generator dapat dilihat dalam tabel 4.7.

Pada simulasi ini, perubahan beban dilakukan pada bus 46. Analisis dilakukan pada generator G2 dan G8, Pada kondisi awal, beban pada bus 46 memiliki nilai sebesar 0.23872 p.u. (3.73 MW; 100 %), Setelah itu, beban berkurang sebesar 0.05968 p.u. (25% dari beban awal). Dari simulasi yang telah dilakukan diketahui bahwa setelah terjadi pelepasan beban maka frekuensi pada generator G2 meningkat dari 50 Hz menjadi 50.018 Hz dan kembali ke posisi S*teady-State* sebesar 50.0183 selama 7,4 detik, sedangkan pada generator G-8, frekuensi meningkat dari 50 Hz menjadi 50.0183 Hz dan kembali ke posisi S*teady-State* sebesar 50.0183 selama 7,4 detik. Hasil simulasi ditampilkan pada gambar 4.82 dan 4.83.

Berikut ditampilkan data dinamik governor dan eksitasi:

Tabel 4.29 Data Dinamik *Governor*

Type	Model	R	T1	T2	T3	Load LIM	KT	Pmax	Pmin	DT
Gas Turbine	GAST	0,05	0,4	0,1	2	1	2	0,825	0	0
Diesel	TGOV1	0,05	0,25	1	1			0,853	0	0

Tabel 4.30 Data Dinamik Eksiter

Type	Model	Tr	Ka	Ta	Vrmax	Vrmin	Ke	Te	Kf	Tf1	Tf2	Tf3
Brushless	ESAC5A	0	400	0,02	5	-5	1	0,8	0,03	0,5	0,8	0

Data Perhitungan

R = 0,001

H = 6 kW-sec/kVA

$$\frac{\partial P_D}{\partial f} = \frac{0.88250}{0.50} = 1.765$$

$$B = \left(\frac{\partial P_D}{\partial f}\right)\Big| P_r = \frac{1.765}{89.65} = 0.01968 \text{ pu MW/Hz}$$

K_{ps} =1/B = 1/0.01968 = 50.81

$T_{ps} = \frac{2H}{Bf^0} = \frac{2x6}{0.01968x50} = 12.19$ sec

ΔP_D = - 0.0596 p.u.

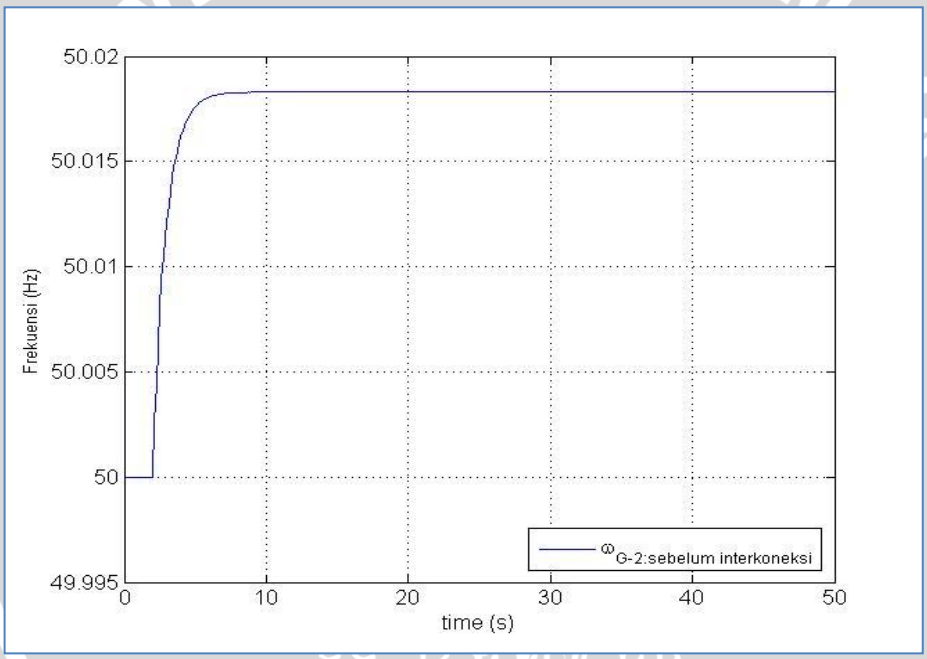
$$\Delta F(s)|_{\Delta P_C(s)=0} = -\frac{K_{ps}}{\left(1+\frac{K_{ps}}{R}\right)+T_{ps}s} x \frac{\Delta P_D}{s}$$

$$= -\frac{K_{ps}/T_{ps}}{s\left[s+\frac{R+K_{ps}}{RT_{ps}}\right]} x\Delta P_D$$

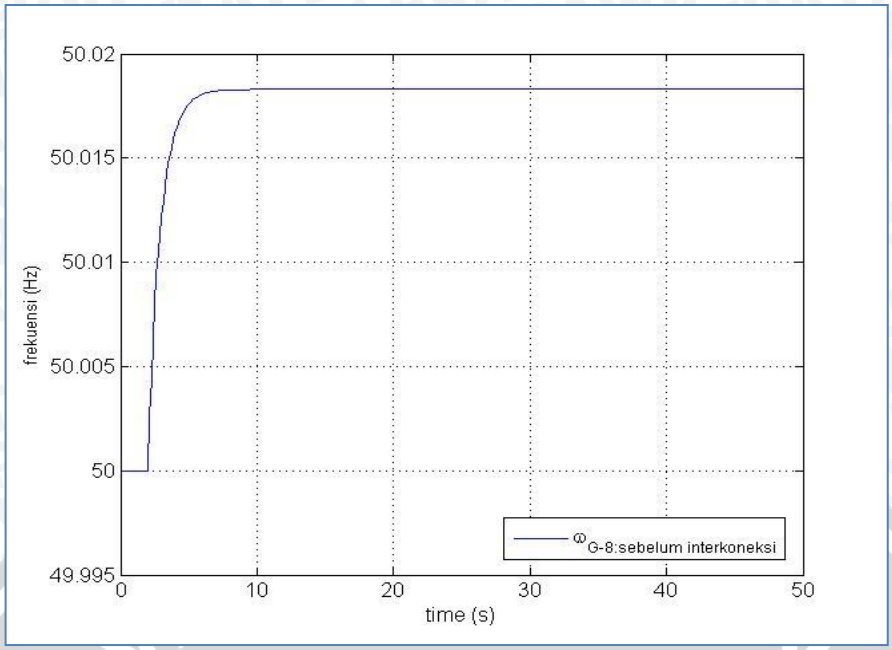
$$\Delta f(t) = -\frac{RK_{ps}}{R+K_{ps}}\left[1 - e^{-\frac{t}{T_{ps}}}\left(\frac{R}{R+K_{ps}}\right)\right]\Delta P_D$$

$$= 0.0000596\left(1 - e^{-t/4168.4}\right)$$

$$\Delta f|_{steady\ state} = 0.0000596\text{Hz}$$



Gambar 4.82 Grafik Frekuensi = *f(t)* pada generator G-2 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

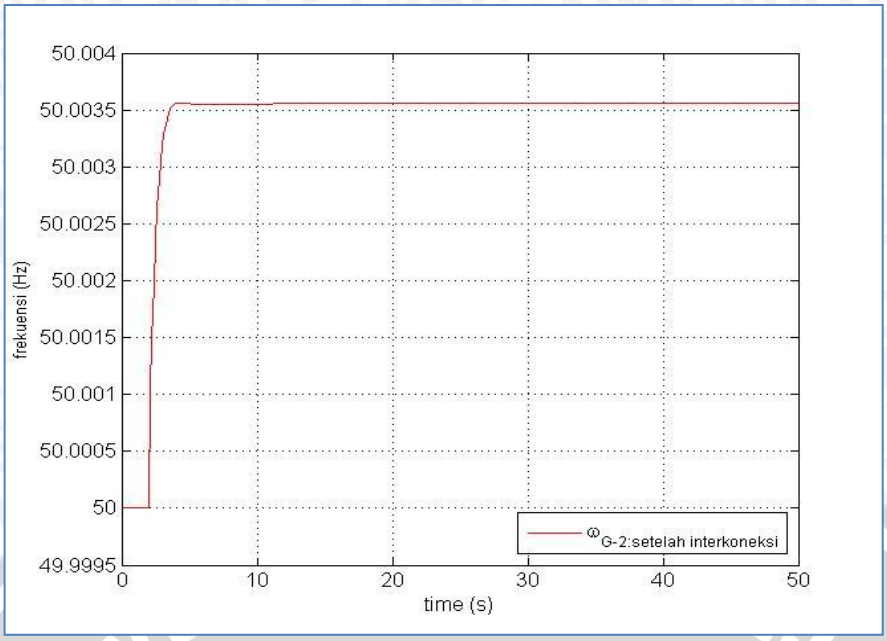


Gambar 4.83 Grafik Frekuensi = *f(t)* pada generator G-8 sebelum interkoneksi
Sumber : hasil simulasi

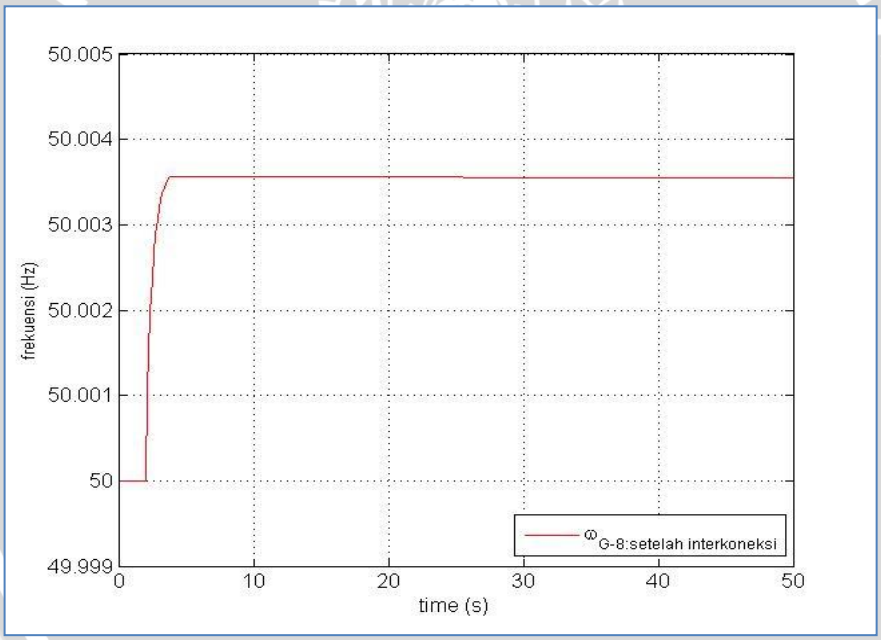
4.14.2 Simulasi Setelah Interkoneksi

Simulasi ini menampilkan pengaruh perubahan beban terhadap frekuensi pada sistem daya di PT Badak NGL Bontang. Sebelum melakukan simulasi terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu pengaturan nilai dasar pada perangkat yang digunakan, pada simulasi yang akan dibahas ini menggunakan frekuensi 50 Hz, daya dasar 15.625 MVA dengan tegangan dasar 13800 V atau 13,8 kV. Selain itu, saat gangguan, batas frekuensi yang dianjuran tidak lebih tinggi dari 52 Hz dan lebih rendah dari 47.5 Hz (Permen ESDM: 2007).

Pada simulasi ini, perubahan beban dilakukan pada bus 46. Analisis dilakukan pada generator G2 dan G8, Pada kondisi awal, beban pada bus 46 memiliki nilai sebesar 0.23872 p.u. (3.73 MW; 100 %), Setelah itu, beban berkurang sebesar 0.05968 p.u. (25% dari beban awal). Dari simulasi yang telah dilakukan diketahui bahwa setelah terjadi pelepasan beban maka frekuensi pada generator G2 meningkat dari 50 Hz menjadi 50.0036 Hz dan kembali ke posisi S*teady-State* sebesar 50.00355 selama 3,2 detik, sedangkan pada generator G-8, frekuensi meningkat dari 50 Hz menjadi 50.0036 Hz dan kembali ke posisi S*teady-State* sebesar 50.00358 selama 3,2 detik. Hasil simulasi ditampilkan pada gambar 4.84 dan 4.85.



Gambar 4.84 Grafik Frekuensi = *f(t)* pada generator G-2 setelah interkoneksi
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.85 Grafik Frekuensi = *f(t)* pada generator G-8
Sumber : hasil simulasi

- **Perbandingan Frekuensi Generator Akibat Pelepasan Beban**

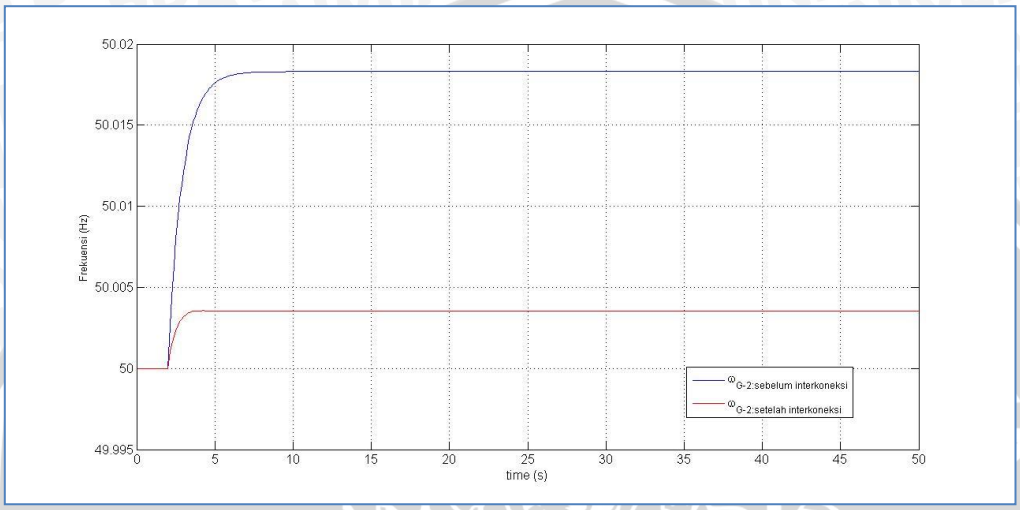
Tabel 4.31 Perbandingan frekuensi generator akibat pelepasan beban

Generator	Sebelum interkoneksi		Setelah interkoneksi	
	f **(Hz)**	$t_{pemulihan}$ **(detik)**	***f*** **(Hz)**	$t_{pemulihan}$ **(detik)**
G-02	50.018	7,4	50.0036	3,2
G-08	50.0183	7,4	50.0036	3,2

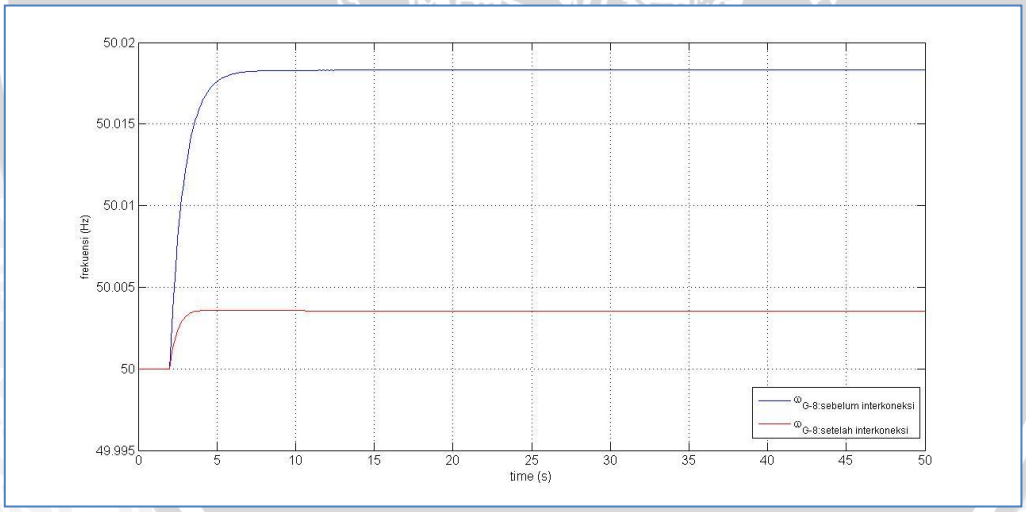
Sumber : Hasil simulasi

Grafik perbandingan stabilitas frekuensi pada generator di Kilang PT Badak NGL ditunjukkan pada Gambar 4.86 – 4.87. Pada grafik tersebut ditunjukkan bagaimana perbedaan perubahan sudut rotor generator pada kondisi peralihan dan perbedaan waktu yang diperlukan generator untuk dapat beroperasi pada kondisi sinkronnya setelah terjadi gangguan.

Dari tabel diatas diketahui bahwa waktu pemulihan gangguan yang dibutuhkan sistem saat interkoneksi lebih cepat dibandingkan sebelum interkoneksi.



Gambar 4.86 Perbandingan Grafik Frekuensi = *f(t)* pada generator G-2
Sumber : hasil simulasi



Gambar 4.87 Perbandingan Grafik Frekuensi = *f(t)* pada generator G-8
Sumber : hasil simulasi

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan simulasi yang telah dibahas diatas, maka pada penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu:

1. Sistem daya di PT Badak NGL saat kondisi sebelum interkoneksi masih dalam kondisi stabil. Hal tersebut dapat dilihat dari kondisi sudut rotor dan frekuensi generator yang dapat kembali pada operasi normalnya setelah mengalami gangguan yang terjadi sesuai dengan waktu gangguan pada analisis stabilitas tersebut.
2. Saat kondisi interkoneksi, waktu pemulihan sudut rotor yang dibutuhkan sebesar 3,9 detik atau lebih cepat 1 detik dibandingkan sebelum interkoneksi yaitu sebesar 4,9 detik. Sedangkan waktu pemulihan frekuensi saat kondisi interkoneksi lebih cepat 0,6 detik dibandingkan sebelum interkoneksi.
3. Sesuai dari analisis diatas diketahui bahwa pembangkit atau generator yang dilengkapi dengan *Turbine Governor* dapat kembali ke kondisi sinkron lebih cepat dibandingkan generator yang tidak dilengkapi dengan *Turbine Governor*. Sedangkan Kontrol *Automatic Voltage Regulator (AVR)* tidak berpengaruh terhadap stabilitas sudut rotor generator.

5.2 Saran

Sesuai analisis diatas, maka perlu dilakukan kajian yang lebih mendalam oleh perusahaan apabila akan menerapkan sistem interkoneksi sistem daya di PT Badak NGL.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA