

**KESTABILAN SUDUT ROTOR PADA SISTEM
KELISTRIKAN SUL-SEL**

ADRIANI
P2700209007



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2012**

KESTABILAN SUDUT ROTOR PADA SISTEM KELISTRIKAN SUL-SEL

Disusun dan Diajukan Oleh :

ADRIANI
P2700209007



Menyetujui,
Komisi Penasehat :

Ketua

Sekretaris

Prof. DR. Ir. H. Nadjamuddin Harun, MS.

Dr. Ir. H. Rhiza S. Sadjad, MSEE

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Elektro
Program Pascasarjana

Prof. DR. Ir. H. Salama Manjang, MT.

ABSTRAK

ADRIANI, Kestabilan Sudut Rotor pada Sistem Kelistrikan SUL-SEL (dibimbing oleh Nadjamuddin Harun dan Rhiza S. Sadjad).

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan karakteristik sistem tenaga yang memungkinkan mesin bergerak serempak dalam sistem pada operasi normal dan dapat kembali dalam keadaan seimbang setelah terjadi gangguan. Hal ini menjadi perhatian dalam sistem interkoneksi karena Generator sinkron dapat mengalami kehilangan sinkronisasi sehingga sistem tidak stabil.

Sistem kelistrikan Sulawesi Selatan terdiri dari sejumlah unit pembangkit dan membentuk sistem interkoneksi untuk melayani pusat-pusat beban. Bertambahnya beban yang terus meningkat dari sistem tenaga listrik saat ini menuntut untuk menghasilkan kualitas daya dan keandalan yang baik sehingga kestabilan sistem tetap terjaga.

Penelitian ini bertujuan untuk (1) mengetahui faktor yang mempengaruhi kestabilan sudut rotor, (2) Menganalisis kestabilan transient sistem kelistrikan menggunakan parameter kestabilan sudut rotor. (3) Untuk menentukan besarnya lama waktu pemutusan kritis gangguan setiap bus atau jaringan yang mengalami gangguan besar pada sistem kelistrikan Sulawesi Selatan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa (1) kestabilan sudut rotor saat terjadi gangguan disekitar saluran bus Tello 150 kV, pembangkit yang berada pada bus Sengkang yang mengalami respon tercepat terhadap gangguan. demikian halnya pada saat gangguan di bus Sungguminasa di saluran Sungguminasa-Tello, maka Generator di bus sengkang mengalami gangguan tercepat dimana waktu pemutusan yang diperoleh adalah 0.1865 detik. Hal ini dipengaruhi oleh (a) Lama waktu gangguan mempengaruhi kestabilan sudut rotor dari semua pembangkit. Semakin lama gangguan maka akan membuat sudut rotor menuju ke kondisi tidak stabil. (b) Letak gangguan mempengaruhi kestabilan sudut rotor dari semua pembangkit. Semakin dekat gangguan terjadi terhadap pembangkit, maka waktu pemutusan kritis yang diperoleh semakin cepat, sehingga kecenderungan sistem tidak stabil semakin besar. (2) Waktu pemutusan kritis tercepat diperoleh bila terjadi hubung singkat 3 fasa pada saluran Tello-Sungguminasa 150 kV di dekat bus Sungguminasa yaitu sebesar 0.1865 detik dengan perolehan sudut pemutusan kritis sebesar . (3) Penentuan waktu pemutusan kritis dilakukan dengan menggunakan metode *step by step* (langkah demi langkah) hingga diperoleh waktu

Kata Kunci : *Power flow*, Stabilitas Transien, sudut rotor, gangguan, waktu pemutusan,

ABSTRACT

ADRIANI, Stability of Rotor Angle in power system of South Sulawesi (Supervised by H. Najamuddin Harun and H. Rhiza S. Sadjad)

Power system stability that is a characteristic of component in power system like Generators to normal operates and then be back to balance condition If the fault occurs. That is to interest in the interconnection system because the synchronous will be loss then unstable.

In the south sulawesi, power system consist is a unit power plant made the interconection system to supply deman. Cause the deman always to increase, so that power quality and reability have to carefully with the result that constant stability.

This research aims to (1) know that effect any factors for rotor angle stability. (2) transient stability analysis with rotor angle parameters. (3) defined to critical clearing time for any faults with great the fault in power sistem of south sulawesi.

The result show that (1) Rotor angle stability if the fault occur in bus of Tello 150 kV, so the power plant in Bus of Sengkang to find the best response to fault. So that the fault occur in bus of Sunggumisa, generator in bus of Sengkang to find response be quickly with clearing time is 0.1865 second. There is be effect to rotor angle stability depend on (a) times fault effect for rotor angle stability to all power plant. If the long fault influential depend to rotor angle with unstable condition. (b) The fault location effect to rotor angle stability for all power plants. If the fault near to power generate so that the result critical time break to power plant to be fast until the system of unstable to be greatest. (2) The result of the fast critical time break for three phase fault like the line of Tello-Sungguminasa near that Sungguminasa bus is 0.1865 second, and the critical rotor angle is 82.2817. (3) The critical clearing time break doing step by step until to getting the condition nearest unstable time.

Key words: power flow, transient stability, rotor angle, fault, clearing time.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan kekuatan tanpa henti, sehingga penulisan tesis ini dapat diselesaikan.

Tesis ini membahas tentang Analisis kestabilan sudut rotor. Ide ini muncul karena ketertarikan penulis terhadap stabilitas Tenaga listrik sistem interkoneksi Sulsebar yang cukup rumit karena pembangkit besar berada di wilayah utara sedangkan beban yang besar berada di wilayah selatan. Kondisi ini memungkinkan tidak stabilnya system karena jalur transmisi yang cukup jauh. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk perbaikan stabilitas system tenaga listrik adalah dengan mengendalikan pembangkit sehingga tetap berada pada variable referensi yang diharapkan

Dalam proses penyusunan tesis ini berbagai hambatan yang dihadapi penulis. Namun atas bantuan, bimbingan dan kerjasama dari berbagai pihak sehingga tesis ini selesai. Oleh Karena itu, perkenankan penulis dengan segala kerendahan hati menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada Bapak Prof. DR.Ir. H. Nadjamuddin Harun, MS Sebagai ketua komisi penasehat dan Bapak DR.Ir.H. Rhiza S Sadjad, MSEE Selaku anggota komisi penasehat yang telah memberikan bimbingan, petunjuk, dan arahan serta mengkritisi sejak penyusunan rencana penelitian sampai dengan penyelesaian tesis ini.

Secara khusus penghargaan dan terima kasih kepada kedua orang tuaku, mertua, suamiku dan anakku tersayang yang telah memberi dukungn, motifasi, dan doa yang tiada terputus.

Dengan segala kerendahan hati, tesis yang belum sempurna ini dapat diajukan kepada tim penguji yang terhormat, dan kiranya tesis ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

Makassar, Februari 2012

ADRIANI

DAFTAR ISI

	Halaman
PRAKATA	iv
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	3
D. Kegunaan Penelitian	4
E. Ruang Lingkup Masalah.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Stabilitas Sistem Tenaga Listrik	5
B. Dinamika Rotor Dan Persamaan Ayunan.....	10
C. Pemodelan Mesin Sinkron Untuk Studi Kestabilan	19
D. Kriteria Sama Luas	24
E. Penyelesaian Numerik Persamaan Differensial Nonlinear.....	31
F. Sistem Multimesin	34
G. Stabilitas Transien Multimesin.....	46
H. Diagram Alir Program	47

BAB III METODE PENELITIAN

A. Jenis Penelitian	49
B. Lokasi Dan Waktu Penelitian	49
C. Perangkat Penelitian	49
D. Langkah-langkah Penelitian	49
E. Diagram Alur Penelitian	52

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan	53
B. Data Sistem Tenaga Listrik Sulselbar	54
C. Hasil Komputasi Kestabilan Transien	98
D. Hasil Analisa dan pembahasan	100

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

A. Keimpulan	110
B. Saran	111

DAFTAR PUSTAKA	100
----------------------	-----

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
1. Nilai momen inersia (H) dari beberapa jenis mesin listrik (Nagath I. G dan Kothari D. P, 1987:366)	17
4.1 Penomoran bus sistem interkoneksi Sulsebar	55
4.2 Data saluran transmisi system	56
4.3 Data sistem tenaga listrik Sulsebar	57
4.4 Data Generator	59
4.5 Data Sistem	61
4.6 Data Penghantar	63
4.7 Perhitungan untuk iterasi pertama $k=0$	73
4.8 Lanjutan table 4.7 Perhitungan untuk iterasi pertama $k=0$	73
4.9 Perhitungan untuk iterasi kedua $k=1$	74
4.10 Lanjutan Tabel 4.9 Perhitungan untuk iterasi kedua $k=1$	74
4.11 Perhitungan untuk iterasi tiga $k=2$	74
4.13 Data reaktansi transien dan momen inersia dari Generator	78
4.14 Tabel impedansi pada saluran	78
4.15 Data hasil perhitungan aliran daya	78
4.16 Hasil Simulasi untuk sistem 3 bus	79
4.17 Perbandingan nilai arus hasil analitik dengan simulasi	80
4.18 Hasil perbandingan secara analitik dan simulasi untuk tegangan peralihan dan sudut rotor	93
4.19 Perbandingan Daya mekanik hasil simulasi dan analitik	94

4.20	Nilai konstanta	96
4.21	Hasil perhitungan aliran daya metode Newton – Raphson pada sistem interkoneksi Sul-Sel Bar Tingkat ketelitian = iterasi ke – 4	99

DAFTAR GAMBAR

Nomor		Halaman
1	Klasifikasi Stabilitas Sistem tenaga (Grigsby L.L, 2001:105)	7
2.	(a) contoh analisis ayunan pertama untuk sistem stabil, (b) contoh analisis ayunan pertama untuk sistem tidak stabil.	9
3	Representasi daya mekanik dan daya listrik pada sebuah generator	
4	Sebuah generator dihubungkan ke <i>infinite bus</i>	20
5	Rangkaian ekivalen satu-mesin terhubung ke <i>infinite bus</i>	21
6	Kurva sudut daya	22
7	Kriteria sama luas pada perubahan beban mendadak	26
8	Sistem satu mesin terhubung ke <i>infinite bus</i> , gangguan tiga fasa pada titik <i>F</i>	27
9.	Kriteria sama luas untuk gangguan tiga fasa pada ujung pengirim	28
10	Kriteria sama luas untuk mencari sudut pemutus kritis akibat gangguan tiga fasa pada ujung pengirim	30
11	Sistem satu mesin terhubung ke <i>infinite bus</i> , gangguan tiga fasa pada titik <i>F</i>	31
12.	Tipikal Bus dalam Studi Aliran Daya	36
13	Flowchart Aliran daya menggunakan Metode Newton Raphson	41
14	Representasi sistem tenaga untuk analisis stabilitas transien multimesin (Glover, S. Sarma dan Overbye, 2008:719).	43

4.1	Sistem interkoneksi pembangkitan dengan 5 pembangkitan utama	54
4.2	Single line 3 bus	61
4.3	Single line sistem 3 bus	77
4.4	Model sistem berdasarkan	78
4.5	Hasil simulasi berdasarkan contoh	97
4.6.	Gambar kurva ayunan Generator dalam kondisi normal	100
4.7.	Respon sudut rotor pada saat terjadi gangguan pada Bus 14 (lama gangguan = 0.1871 detik), Saluran 14-21 di buka	105
4.8	Respon sudut rotor pada saat terjadi gangguan pada bus 14 yang diawali dengan kondisi normal selama 1 detik.(lama gangguan =1.1871 detik), saluran 14-21	105
4.9	Respon sudut rotor pada saat terjadi gangguan pada bus 14 (lama gangguan =0.1872 detik), saluran 14-21	106

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan karakteristik sistem tenaga yang memungkinkan mesin bergerak serempak dalam sistem pada operasi normal dan dapat kembali dalam keadaan seimbang setelah terjadi gangguan. Generator sinkron merupakan komponen yang sangat vital dalam sistem tenaga listrik. Sistem yang terinterkoneksi terdiri dari beberapa generator yang bekerja secara paralel untuk mencatu daya. Dalam sistem interkoneksi terdapat beberapa kondisi yang dapat menyebabkan sebuah generator kehilangan sinkronisasi atau kestabilannya.

Kondisi-kondisi yang mempengaruhi kestabilan generator antara lain disebabkan oleh gangguan tiba-tiba (*sudden outage*) pada saluran transmisi, aplikasi yang tiba-tiba atau perubahan-perubahan beban secara mendadak. Generator yang tidak stabil akan dilepas dari sistem dan pelepasan ini dapat berpengaruh terhadap kestabilan sistem secara keseluruhan. Lepasnya generator yang mencatu sebagian besar daya sistem dapat mengakibatkan pemadaman total (*blackout*).

Pengaruh dari gangguan-gangguan tersebut di atas adalah termasuk dalam studi stabilitas transien (*transient stability*) dalam sistem tenaga listrik dan dikategorikan sebagai gangguan-gangguan besar

(*major disturbances*) atau yang berefek besar. Studi stabilitas transien dibutuhkan untuk menjamin bahwa sistem dapat melawan keadaan transien yang diikuti gangguan besar.

Kestabilan sistem tenaga listrik yang memiliki banyak mesin (*multimachine stability*), sangatlah sulit dan memerlukan ketelitian, serta penggunaan komputer sangat dibutuhkan dalam melakukan analisis. Aplikasi komputer dalam sistem tenaga listrik memudahkan untuk menganalisis dan mendesain serta pengembangan sistem pengoperasian sistem tenaga listrik di masa yang akan datang.

Salah satu program yang digunakan dalam analisis sistem tenaga listrik adalah bahasa pemrograman MATLAB (*Matrix Laboratory*), program dengan bahasa komputasi, visualisasi dan pemrograman. Program ini dapat digunakan untuk mensimulasikan dan menghitung besarnya perubahan sudut rotor (*rotor angle*) generator saat terjadi ayunan, menentukan besar waktu pemutusan kritis (*critical clearing time*) gangguan. Dengan hasil yang diperoleh kita dapat melihat kondisi kestabilan sistem tenaga listrik.

Sistem kelistrikan Sulawesi Selatan terdiri dari sejumlah unit pembangkit dan membentuk sistem interkoneksi yang dikelola oleh PT. PLN (Persero) Wilayah Sultanbatara dan perusahaan swasta untuk melayani pusat-pusat beban. Bertambahnya beban yang terus meningkat dari sistem tenaga listrik sekarang, tidak hanya dituntut ketersediannya

melainkan juga dituntut untuk menghasilkan kualitas daya dan keandalan yang baik sehingga kestabilan sistem tetap terjaga.

Berdasarkan uraian di atas maka penulis akan melakukan analisis stabilitas transien pada sistem tenaga listrik Sultanbatara menggunakan bahasa pemrograman MATLAB.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah, maka rumusan masalah yang akan dibahas dalam study ini adalah :

1. Faktor apa saja yang mempengaruhi kestabilan sudut rotor.
2. Bagaimana menganalisa kestabilan transien sistem kelistrikan menggunakan parameter kestabilan sudut rotor
3. Bagaimana menentukan waktu pemutusan kritis (*Critical Clearing time*) pada setiap bus atau pada jaringan yang mengalami gangguan.

C. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui faktor yang mempengaruhi kestabilan sudut rotor.
2. Menganalisis kestabilan transient sistem kelistrikan menggunakan parameter kestabilan sudut rotor.
3. Untuk menentukan besarnya lama waktu pemutusan kritis gangguan setiap bus atau jaringan yang mengalami gangguan besar pada sistem kelistrikan Sulawesi Selatan.

D. Kegunaan Penelitian

Penelitian ini berguna untuk:

1. Memberikan telaah studi kestabilan transien jika terjadi gangguan pada sistem yang mempengaruhi ketidakstabilan sistem tenaga listrik.
2. Sebagai bahan masukan ilmiah bagi PT. PLN (Persero) Wilayah Sulawesi Selatan, Sulawesi Barat dan Sulawesi Tenggara (Sultanbatara) dalam perencanaan sistem proteksi dan peningkatan keandalan sistem kelistrikan Sulawesi Selatan.

E. Ruang Lingkup Masalah

Dalam melakukan study ini dilakukan pembatasan masalah hanya pada kestabilan transient bagaimana menentukan waktu pemutusan kritis (*Critical Clearing time*) pada setiap bus atau pada jaringan yang mengalami gangguan *dengan* Bahasa Pemrograman MATLAB versi 7.0

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari unit-unit pembangkit yang terhubung dengan saluran untuk melayani beban. Sistem tenaga listrik yang memiliki banyak mesin biasanya menyalurkan daya ke beban melalui saluran interkoneksi. Tujuan utama dari sistem saluran interkoneksi adalah untuk menjaga kontinuitas dan ketersediaan tenaga listrik terhadap kebutuhan beban yang terus meningkat. Semakin berkembang sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan lemahnya performansi sistem ketika mengalami gangguan. Salah satu efek gangguan adalah osilasi elektromekanik yang jika tidak diredam dengan baik maka sistem akan terganggu dan dapat keluar dari area kestabilannya sehingga mengakibatkan pengaruh yang lebih buruk seperti pemadaman total (*black out*).

Keadaan operasi yang stabil dari sistem tenaga listrik terdapat keseimbangan antara daya *input* mekanis pada *prime mover* dengan daya *output* listrik (beban listrik). Dalam keadaan seperti 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 akan terjadi perbedaan yang besar antara daya *input* mekanis dan daya *output* listrik dari generator.

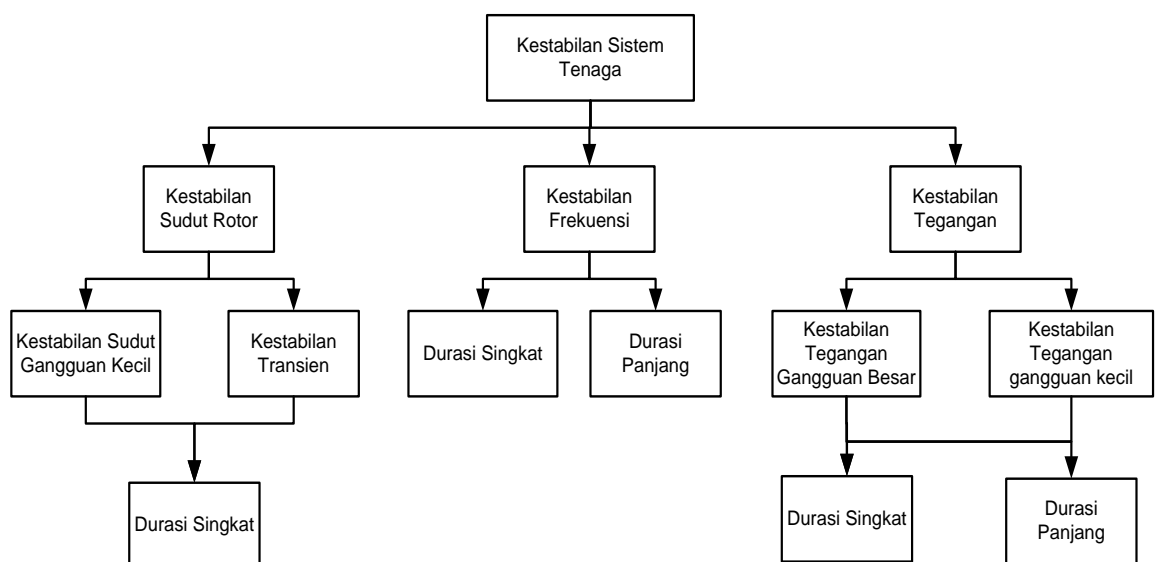
Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai sifat yang memungkinkan mesin bergerak sinkron dalam sistem untuk memberikan reaksinya terhadap gangguan dalam keadaan normal serta balik kembali ke keadaan semula bila keadaan menjadi normal (Stevenson, 1983:408)

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.

Hilangnya sinkronisasi merupakan ketidakseimbangan antara daya pembangkit dengan beban dan menimbulkan suatu keadaan transien yang menyebabkan rotor dari mesin sinkron berayun karena adanya torsi yang mengakibatkan percepatan atau perlambatan pada rotor tersebut. Ini terjadi bila torsi tersebut cukup besar maka salah satu atau lebih dari mesin sinkron tersebut akan kehilangan sinkronisasinya, misalnya terjadi ketidakseimbangan yang disebabkan adanya daya pembangkit yang berlebihan maka sebagian besar dari energi yang berlebihan akan diubah menjadi energi kinetik yang mengakibatkan percepatan sudut rotor bertambah besar, walaupun kecepatan rotor bertambah besar, tidak berarti bahwa sinkronisasi dari mesin tersebut akan hilang. Faktor yang

menentukan adalah perbedaan sudut rotor atau daya tersebut diukur terhadap referensi putaran sinkronisasi.

Secara umum permasalahan stabilitas sistem tenaga listrik terkait dengan kestabilan sudut rotor (*rotor angle stability*), kestabilan frekuensi (*frekuensi stability*) dan kestabilan tegangan (*voltage stability*) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.1. Dimana kestabilan yang membahas masalah frekuensi dengan tegangannya telah dibahas oleh Sanatang dengan judul tesisnya “Perbaikan stabilitas frekuensi dan tegangan pada beban dinamik sistem kelistrikan Sulselbar menggunakan metode linier quadratic regulator”.



Gambar 1 Klasifikasi Stabilitas Sistem tenaga (Grigsby L.L, 2001:105)

Kestabilan sudut rotor diklasifikasikan menjadi stabilitas sinyal kecil (*small signal stability*) dan stabilitas transien (*transient stability*). *Small signal stability* adalah kestabilan sistem untuk gangguan-gangguan kecil dalam bentuk osilasi elektromekanik yang tak teredam, sedangkan *transient stability* dikarenakan kurang sinkronnya torsi dan diawali dengan gangguan-gangguan besar.

Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Studi tentang kestabilan sistem tenaga menurut IEEE/CIGRE Joint Task Force dapat diklasifikasikan seperti pada gambar 1.

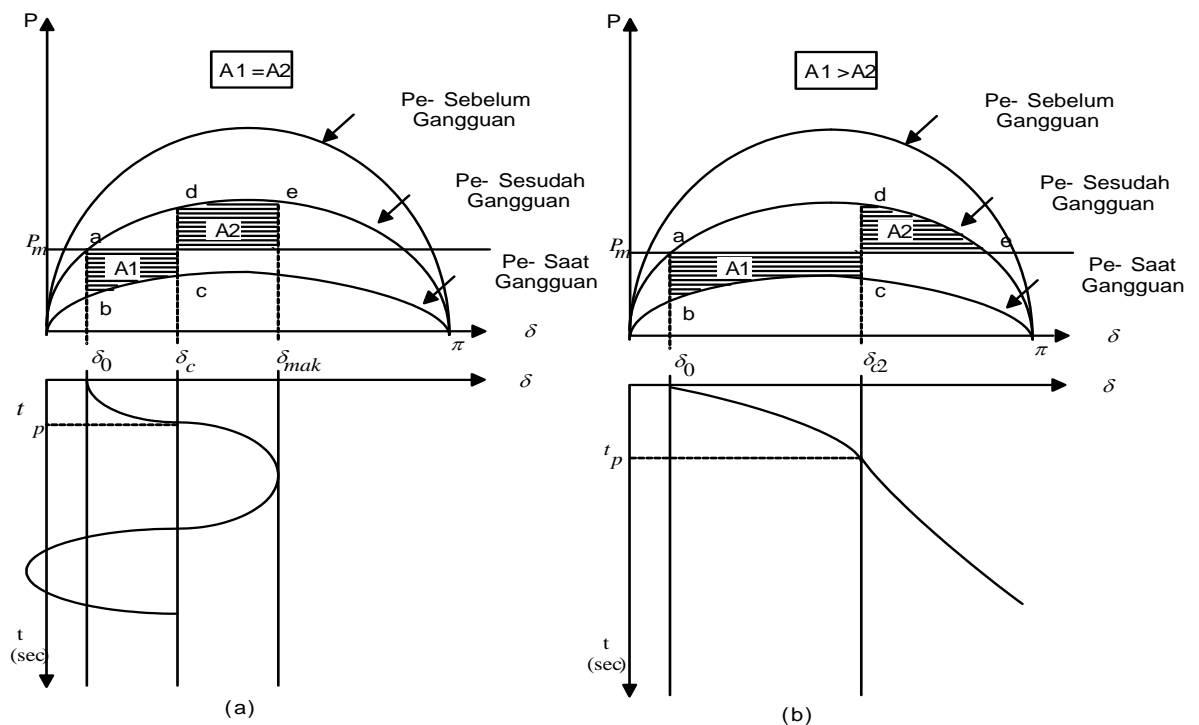
Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat digolongkan menjadi :

- a. Gangguan tunggal dari saluran ke tanah
- b. Gangguan antar saluran
- c. Gangguan ganda dari saluran ke tanah
- d. Gangguan 3 fasa.

Gangguan tunggal dari saluran ke tanah adalah yang paling sering terjadi, sedangkan gangguan 3 fasa adalah yang paling jarang. Untuk keandalan yang sempurna, suatu sistem harus dirancang untuk kestabilan peralihan terhadap gangguan tiga fasa pada lokasi yang menimbulkan pengaruh terburuk, dan ini sudah merupakan praktek yang dijalankan secara universal (Stevenson, 1983:437).

Stabilitas transien adalah kemampuan sistem daya untuk kembali dalam kondisi sinkron setelah terjadi gangguan yang besar (Saadat Hadi, 1999:486). Jadi, studi stabilitas transien dihubungkan dengan efek disturbansi-disturbansi besar. Selain melihat kondisi kestabilan sistem, studi kestabilan transien juga bertujuan untuk menentukan berapa besar waktu pemutusan kritis atau batas maksimum gangguan dihilangkan. Menurut Stevenson (1984) studi kestabilan transien lebih lanjut dapat dibagi ke kedalam kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dan ayunan majemuk (*multiswing*). Kestabilan ayunan pertama generator dimodelkan sederhana yaitu tanpa memasukkan sistem-sistem pengaturannya.

Periode waktu yang diselidiki adalah detik pertama setelah timbulnya gangguan pada sistem seperti yang terlihat pada Gambar 2. Jika generator-generator pada sistem tetap berada dalam keadaan serempak sebelum berakhirnya detik pertama maka sistem dikatakan dalam keadaan stabil. Namun umumnya lama studi kestabilan digunakan 2 sampai dengan 3 detik agar bentuk kurva ayunan sudut rotor jelas terlihat (Kundur Praba, 1994 :827). Untuk kestabilan ayunan majemuk meliputi periode yang lebih lama karena itu, pengaruh dari sistem-sistem pengaturan generator sudah dipertimbangkan, seperti pada gambar 2.



Gambar 2. (a) contoh analisis ayunan pertama untuk sistem stabil, (b) contoh analisis ayunan pertama untuk sistem tidak stabil. (Kundur Praba, 1994 : 834)

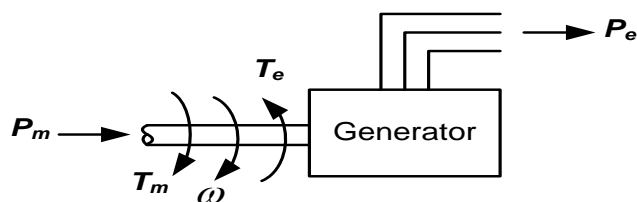
Semua studi-studi kestabilan dibuat dalam tiga asumsi yang mendasar untuk memudahkan dalam perhitungan yaitu :

1. Dalam gulungan-gulungan stator dan sistem daya, hanya diperhitungkan arus dan tegangan. Karena itu arus-arus pergeseran dc (*dc offset currents*) dan komponen-komponen harmonisasi semuanya diabaikan.
2. Komponen-komponen simetris digunakan dalam representasi gangguan-gangguan tidak seimbang.
3. Tegangan yang dibangkitkan dianggap tidak dipengaruhi oleh perubahan-perubahan kecepatan mesin.

B. Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan

Penggerak mula (*primover*) sebuah mesin sinkron akan memberikan besarnya momen putar mekanis T_m pada poros mesin dan momen putar listrik T_e pada mesin sinkron. Pada Gambar 3 arah momen putar mekanis dan momen putar listrik akan saling berlawanan. Jika sebagai akibat dari gangguan, torsi mekanis lebih besar daripada torsi elektromagnetis atau sebaliknya maka rotor akan mengalami momen percepatan bersih yang besarnya diberikan oleh :

$$T_a = T_m - T_e \quad (\text{N-m}) \quad (1)$$



Gambar 3 Representasi daya mekanik dan daya listrik pada sebuah generator (Nagath I. G dan Kothari D. P., 1987:367).

Berdasarkan prinsip dasar dinamika, momen putar percepatan suatu mesin sinkron (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen-momen kelembanan (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Untuk generator sinkron, persamaan ini dapat ditulis dalam bentuk:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (\text{N-m}) \quad (2)$$

dengan :

J = Momen kelembanan total dari massa rotor dalam $kg-m^2$

θ_m = Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam (*stationary*), dalam radian mekanis

t = Waktu, dalam detik

T_a = Momen putar percepatan bersih, dalam Nm

T_m = Momen putar mekanis atau poros (penggerak) yang diberikan oleh penggerak mula dikurangi dengan momen putar perlambatan (*retarding*) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran, dalam Nm

T_e = Momen putar listrik atau elektromagnetis bersih, dalam Nm

Generator sinkron yang bekerja dalam keadaan *steady-state* maka generator berputar pada keadaan kecepatan sinkron ω_{sm} sehingga T_m sama dengan T_e sedangkan momen putar T_a sama dengan nol. Pada persamaan (2) θ_m diukur terhadap sumbu yang diam dan untuk

mengukurnya terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron adalah dengan persamaan

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (3)$$

dengan :

ω_{sm} = Kecepatan sinkron mesin dalam radian mekanis per detik.

δ_m = Pergeseran sudut rotor dalam radius mekanis dari sumbu pedoman yang berputar dengan kecepatan sinkron.

Penurunan persamaan (3) terhadap waktu memberikan persamaan kecepatan sudut dari rotor ω_m dalam bentuk :

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (4)$$

dan percepatan rotor adalah :

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (\text{rad/der}^2) \quad (5)$$

dengan :

$\frac{d\theta_m}{dt}$ = Kecepatan sudut rotor dalam radian mekanis per detik.

$\frac{d\delta_m}{dt}$ = Penyimpangan rotor dari keadaan rotor keadaan sinkron dan unit ukurannya adalah radian mekanis per detik.

Dengan mensubstitusikan persamaan (5) ke dalam persamaan (2) diperoleh,

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \text{N-m} \quad (6)$$

Kalikan persamaan (6) dengan kecepatan sudut dari rotor ω_m , akan menghasilkan :

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (7)$$

Dari prinsip dinamika dasar, daya adalah sama dengan kecepatan sudut dikali momen putar maka persamaan diatas dapat ditulis dalam bentuk persamaan daya sebagai berikut :

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad W \quad (8)$$

dengan :

P_m = Masukan daya poros ke mesin dikurangi dengan rugi-rugi perputaran dalam Watt.

P_e = daya listrik pada celah udaranya dalam Watt.

P_a = Daya percepatan yang memperjelas ketidakseimbangan antara kedua daya dalam Watt.

Koefisien $J\omega_m$ adalah momentum sudut (*angular momentum*) rotor pada kecepatan sinkron ω_{sm} . Momen ini dinyatakan dengan M dan disebut konstanta kelembanan (*inertia constant*) dari mesin tersebut. M yang dinyatakan dalam *joule-detik per-radian* dan persamaan (8) dapat dituliskan dengan,

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad W \quad (9)$$

Generator sinkron yang berputar pada kecepatan sinkron tentunya akan menyimpan energi kinetik pada rotor. Hubungan energi kinetik dengan massa berputar adalah :

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m \quad (10)$$

atau,

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \quad (11)$$

Apabila ω_m tidak mengalami perubahan sebelum kehilangan stabilitas maka M dianalisa pada kecepatan sinkron, dengan :

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad (12)$$

Jika p adalah jumlah kutub dari generator sinkron maka daya listrik δ dalam hubungannya dengan sudut mekanik δ_m adalah :

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \quad (13)$$

Sedangkan hubungan persamaan (9) dengan sudut daya listrik adalah :

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (14)$$

Besarnya nilai M pada persamaan (12) disubstitusikan ke persamaan (14) dan dibagi dengan besarnya daya dasar dari rating mesin S_B dalam MVA, persamaan (14) akan menjadi :

$$\frac{2W_k}{\omega_{sm} \cdot S_B} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_a}{S_B} = \frac{P_m}{S_b} - \frac{P_e}{S_B} \quad (15)$$

Data-data dinamis mesin yang diperlukan dalam studi kestabilan, suatu konstanta yang berhubungan dengan kelembanan akan diberikan, konstanta tersebut dinamakan kontanta H dan didefinisikan :

$$H = \frac{\text{Daya kinetis yang disimpan dalam mega joule pada kecepatan serempak}}{\text{Rating dalam MVA}} \quad (16)$$

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_B} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_B} = \frac{W_k}{S_b} \quad MJ/MVA$$

Subtitusi persamaan (16) ke persamaan (15), diperoleh,

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (17)$$

dengan P_m dan P_e = berturut-turut daya mekanik dan daya listrik dalam satuan per unit. Kecepatan sinkron pada persamaan (18) jika dituliskan dalam satuan-satuan listrik listrik maka diperoleh,

$$\frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (18)$$

Penggunaan subkrib m pada ω , ω_s dan δ menunjukkan bahwa yang digunakan adalah satuan-satuan mekanis, jika tidak maka yang dimaksudkan adalah satuan-satuan listrik.

Sistem dengan frekuensi sebesar f Hz dan δ dinyatakan dalam radian listrik, persamaan (18) menjadi,

$$\frac{H}{\pi \cdot f} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{per unit} \quad (19)$$

bila δ dinyatakan dalam derajat listrik,

$$\frac{H}{180 \cdot f} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{per unit} \quad (20)$$

Persamaan (20) di atas disebut dengan persamaan ayunan (*swing equation*) mesin, merupakan persamaan dasar yang mengatur dinamika (gerak) putaran mesin sinkron dalam studi kestabilan.

Penggunaan konstanta kelembanan M jarang digunakan dalam praktek, sedangkan yang lebih sering digunakan adalah bentuk-bentuk persamaan ayunan δ yang menggunakan konstanta H . Menurut Stevenson (1984:415) hal tersebut dikarenakan nilai M banyak sekali berubah-ubah menurut besar dan jenis mesin, sedangkan nilai H sedikit sekali berubahnya. Adapun nilai-nilai konstanta H dari beberapa jenis mesin diperlihatkan dalam Tabel 1

Tabel 1 Nilai momen inersia (H) dari beberapa jenis mesin listrik (Nagath I. G dan Kothari D. P, 1987:366)

Jenis Mesin	H (MJ/MVA)
1. Turbine generator :	
a. Full condensing steam turbine generator	4-9
b. Non-Condensing steam turbine generator	3 – 4
2. Waterwheel Generator :	
a. Slow-speed <200 rpm	2 – 3
b. High-speed >200 rpm	2 – 4
3. Synchronous condenser	2 – 5
a. Large	1,25
b. Small	1,00
4. Diesel generator	
a. Low-speed	1-3
b. With flywheel	4-5
4. Synchronous motor whit load varying from 1,0 to 5,00 and higher for heavy flywheels	2,00

Studi kestabilan untuk sistem interkoneksi dengan mesin-mesin yang banyak jumlahnya, perlu untuk membatasi persamaan ayunannya jika gangguan-gangguan pada sistem tersebut, mempengaruhi mesin-mesin di dalam suatu stasiun pembangkit sehingga rotor-rotornya berayun bersama-sama. Mesin-mesin di dalam stasiun itu dapat digabungkan menjadi satu ekivalen saja seakan-akan rotor-rotornya digandeng secara mekanis, dan hanya ada satu persamaan ayunan yang dituliskan. Sebagai tinjauan, suatu stasiun pembangkit dengan dua buah generator yang dihubungkan pada rel yang sama yang secara elektrik terletak jauh dari gangguan-gangguan jala-jala. Persamaan-persamaan ayunan dengan dasar bersama diperoleh,

$$\frac{2H_1}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = P_{m1} - P_{e1} \quad \text{per unit} \quad (21)$$

$$\frac{2H_2}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = P_{m2} - P_{e2} \quad \text{per unit} \quad (22)$$

dengan :

H_1, H_2 = konstanta kelembanan generator 1 dan 2

δ_1, δ_2 = sudut mekanik generator 1 dan 2

P_{m1}, P_{m2} = daya mekanis generator 1 dan 2

P_{e1}, P_{e2} = daya listrik generator 1 dan 2

Dalam menambahkan persamaan-persamaan tersebut, dan dengan menyatakan δ_1 dan δ_2 dengan δ karena rotor-rotor itu berayun bersama-sama maka persamaan tunggalnya kita peroleh :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad \text{per unit} \quad (23)$$

dengan :

$$H = (H_1 + H_2)$$

$$P_m = (P_{m1} + P_{m2})$$

$$P_e = (P_{e1} + P_{e2})$$

Persamaan tunggal tersebut, yang sama dengan persamaan (18) dapat diselesaikan untuk menunjukkan dinamika stasiun tersebut.

Menurut Stevenson (1983:418) mesin-mesin yang berayun bersama-sama dinamakan mesin-mesin yang saling koheren/ saling melekat. Apabila ω_s dan δ keduanya dinyatakan dalam derajat listrik atau radian, persamaan-persamaan ayunan untuk untuk mesin-mesin yang saling melekat dapat digabungkan bersama meskipun kecepatan-kecepatan putaran nominalnya berbeda-beda. Hal ini menyangkut banyaknya persamaan-persamaan ayunan dari banyaknya mesin dapat diselesaikan dan dikurangi. Untuk setiap mesin yang tidak saling koheren dalam suatu sistem, dapat dituliskan persamaan-persamaan ayunan yang mirip dengan persamaan (21) dan (22). Dengan membagi masing-masing persamaan dengan koefisien sisi sebelah kirinya dan mengurangkan persamaan-persamaan resultannya maka diperoleh :

$$\frac{d^2 \delta_1}{dt^2} - \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2} \left(\frac{P_{m1} - P_{e1}}{H_1} - \frac{P_{m2} - P_{e2}}{H_2} \right) \quad (24)$$

Dengan mengalikan masing-masing sisi dengan $H_1 H_2 / (H_1 + H_2)$ dan mengaturnya kembali dan diperoleh :

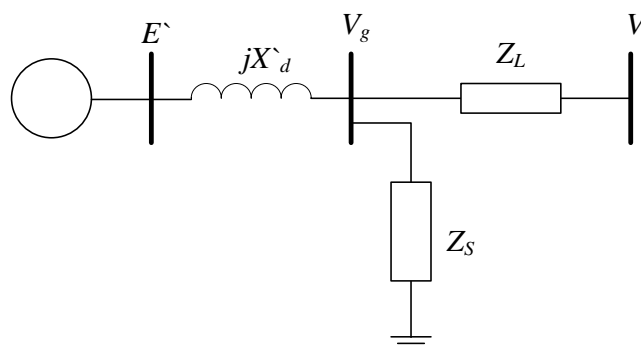
$$\frac{2}{\omega_s} \left(\frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} \right) \frac{d^2 (\delta_1 - \delta_2)}{dt^2} = \frac{P_{m1} H_2 - P_{m2} H_1}{H_1 + H_2} - \frac{P_{e1} H_2 - P_{e2} H_1}{H_1 + H_2} \quad (25)$$

Persamaan di atas dapat juga dituliskan dalam bentuk persamaan ayunan dasar sebagai berikut :

$$\frac{2}{\omega_s} H_{12} \frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = P_{m12} - P_{e12} \quad (26)$$

C. Pemodelan Mesin Sinkron Untuk Studi Kestabilan

Gambar 4 memperlihatkan sebuah model sederhana dari mesin sinkron, disebut dengan model klasik. Untuk studi-studi kestabilan transien setiap mesin sinkron direpresentasikan oleh tegangan-dalam transiennya (*transient internal voltage*) E' dan terhubung seri dengan reaktansi transien poros langsung X'_d .



Gambar 4 Sebuah generator dihubungkan ke *infinite bus* (Cekdin Cekmas, 2007 :232)

dengan :

E' = tegangan dalam transien generator

X_d' = reaktansi transient poros langsung

V_g = Tegangan terminal generator

Z_L = impedansi saluran

Z_S = impedansi paralel (*shunt*)

V = tegangan pada sistem/ *infinite bus*

Representasi titik tegangan terminal generator V_g dapat dieliminasi dengan mentransformasikan impedansi dari hubungan Y ke hubungan Δ , sehingga admitansi yang dihasilkan adalah :

$$y_{10} = \frac{Z_L}{jX'_d Z_S + jX'_d Z_L + Z_L Z_S}$$
$$y_{20} = \frac{jX'_d}{jX'_d Z_S + jX'_d Z_L + Z_L Z_S}$$

(27)

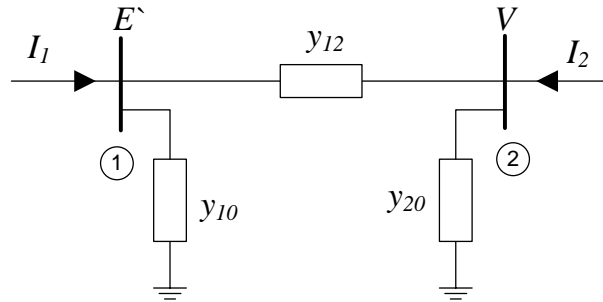
Rangkaian ekivalen dengan tegangan dinyatakan oleh titik 1, dan *infinite bus* oleh titik 2 yang ditunjukkan pada Gambar 5. Penuliskan persamaan *node* (titik simpul) diperoleh,

$$I_1 = (y_{10} + y_{12})E' - y_{12}V \quad (28)$$

$$I_2 = -y_{12}E' + (y_{20} + y_{21})V$$

Persamaan (28) dapat ditulis dalam bentuk matriks admitansi sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E' \\ V \end{bmatrix} \quad (29)$$



Gambar 5 Rangkaian ekivalen satu-mesin terhubung ke *infinite bus* (Cekdin Cekmas, 2007:233)

Elemen diagonal dari matriks admitansi bus adalah $y_{11} = y_{10} + y_{12}$, dan $y_{22} = y_{20} + y_{12}$, elemen bukan diagonal adalah $y_{12} = y_{21} = -y_{12}$, dengan menyatakan tegangan dan admitansi dalam bentuk polar, maka daya nyata pada titik 1 diberikan oleh :

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

$$P_e = \Re [|E'| \angle \delta (|Y_{11}| \angle -\theta_{11} |E'| \angle -\delta + |Y_{12}| \angle -\theta_{12} |V| \angle 0)] \quad (30)$$

atau

$$P_e = |E'|^2 |Y_{11}| \cos \theta_{11} + |E'| |V| |Y_{12}| \cos(\delta - \theta_{12}) \quad (31)$$

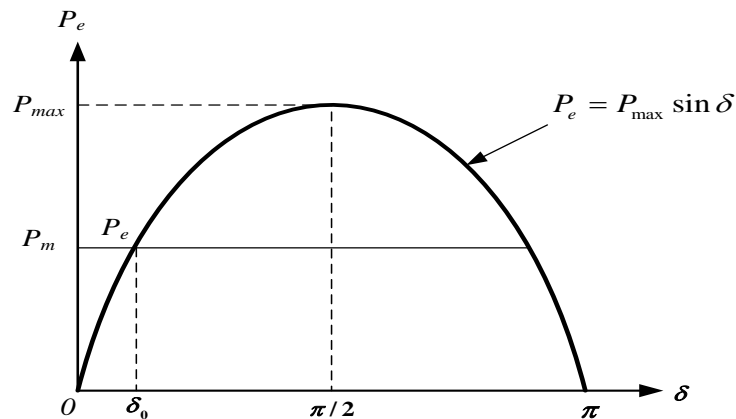
jika harga $\theta_{11} = \theta_{12} = 90^\circ$, dan $Y_{12} = B_{12} = \frac{1}{X_{12}}$, sehingga persamaan (31),

menjadi :

$$P_e = |E'| |V| |B_{12}| \cos(\delta - 90^\circ) \quad (32)$$

atau

$$P_e = \frac{|E'| |V|}{X_{12}} \sin \delta \quad (33)$$



Gambar 6 Kurva sudut daya (Saadat Hadi, 1999:466)

Persamaan (33) merupakan bentuk persamaan aliran daya (*power flow equation*) yang paling sederhana dan merupakan dasar untuk mempelajari dari semua masalah stabilitas. Hubungan ini menunjukkan besar kecilnya daya tergantung pada besar reaktansi X_{12} dan sudut δ antara kedua tegangan. Kurva P_e terhadap δ dikenal sebagai kurva sudut daya (*power angle curve*). Gambar 6 melukiskan grafik persamaan (33). Daya maksimum terjadi pada $\delta = 90^\circ$, yang dinyatakan dengan :

$$P_{\max} = \frac{|E'| |V|}{X_{12}} \quad (34)$$

sehingga persamaan daya listrik dalam bentuk P_{\max} adalah

$$P_e = P_{\max} \sin \delta \quad (35)$$

Peningkatan sudut δ lebih jauh dari 90° karena upaya memperoleh lebih dari P_{\max} maka kenaikan δ menyebabkan output daya listrik lebih kecil dan mesin akan bertambah cepat tersebut menjadi tidak stabil dan kehilangan sinkronisasi.

Ketika generator mengalami hubung singkat tiba-tiba maka arus selama periode transient dibatasi oleh reaktansi transient X'_d . Pada masalah transien, efek saliensi (kutub menonjol) diabaikan, mesin ditunjukkan oleh tegangan E' selain reaktansi X'_d . Jika V_g adalah tegangan terminal generator dan I_a adalah arus generator sebelum gangguan, E' dapat dihitung dengan :

$$E' = V_g + jX'_d I_a \quad (36)$$

Karena medan yang berputar mempunyai reaktansi yang kecil medan fluks akan tetap melanjutkan selama gangguan yang sama dan tegangan E' diasumsikan konstan.

Batas kestabilan terjadi pada $\delta = 90^\circ$ dan disebut batas kestabilan keadaan-tunak (*steady-state stability limit*). Jika memungkinkan rotor berosilasi lebih dari 90° beberapa kali akibat adanya suatu perubahan besar tiba-tiba dalam kondisi-kondisi yang telah ada, dinamakan batas kestabilan transien (*transient stability limit*). Jika osilasi atau ayunan-ayunan ini lenyap maka mesin menjadi stabil.

D. Kriteria Sama Luas (*Equal-Area Criterion*)

Studi stabilitas transien meliputi penentuan tercapai atau tidaknya kesinkronan setelah mesin mengalami gangguan. Suatu metode yang dapat digunakan untuk menentukan stabilitas transien dengan cepat adalah metode kriteria sama luas. Metode ini hanya dapat dipakai untuk suatu sistem satu mesin yang terhubung ke infinite bus atau sistem dua

mesin. Persamaan (19) dapat digunakan untuk menurunkan metode kriteria luas sama sebagai berikut :

$$\frac{H}{\pi \cdot f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e$$

P_a adalah daya percepatan. Dari persamaan di atas di diperoleh,

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e) \quad (37)$$

Kedua sisi kiri dan kanan dari persamaan di atas dikalikan dengan

$2 \frac{d\delta}{dt}$, diperoleh,

$$2 \frac{d\delta}{dt} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{2\pi f_0}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (38)$$

dapat ditulis dalam bentuk yang lain,

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2\pi f_0}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (39)$$

atau,

$$d \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2\pi f_0}{H} (P_m - P_e) d\delta \quad (40)$$

Integrasi kedua sisi kiri dan kanan menghasilkan

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 = \frac{2\pi f_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta \quad (41)$$

atau,

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right) = \sqrt{\frac{2\pi f_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta} \quad (42)$$

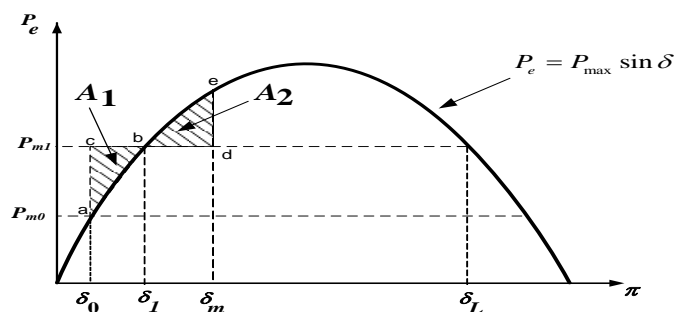
Jika pada persamaan (42) kecepatannya menjadi nol sesaat setelah gangguan, maka diperoleh kriteria luas sama sebagai berikut :

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (43)$$

Mesin bekerja pada titik setimbang δ_0 . Pada titik ini daya input mekanik $P_{m0} = P_{e0}$ seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Penambahan daya input tiba-tiba yang dinyatakan oleh garis horizontal P_{m1} . Dengan $P_{m1} > P_{e0}$, daya percepatan pada rotor adalah positif dan sudut daya δ bertambah. Kelebihan energi yang tersimpan pada rotor selama percepatan awal adalah :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_{m1} - P_{e1}) d\delta = \text{luas abc} = \text{luas } A_1 \quad (44)$$

Penambahan δ , daya listrik bertambah, dan pada saat $\delta = \delta_1$ maka daya input yang baru adalah P_{m1} . Walaupun daya percepatan adalah nol pada titik ini, rotor berputar di atas kecepatan sinkron. Oleh karena itu sudut daya δ dan daya listrik P_e bertambah secara kontinyu.



Gambar 7 Kriteria sama luas pada perubahan beban mendadak (Saadat Hadi, 1999:488).

Sekarang $P_m < P_e$ yang menyebabkan generator diperlambat kearah kecepatan sinkron hingga $\delta = \delta_m$, maka kelebihan energi yang tersimpan pada rotor selama perlambatan adalah :

$$\int_{\delta_1}^{\delta_{\max}} (P_{m1} - P_e) d\delta = \text{luas bde} = \text{luas } A_2 \quad (45)$$

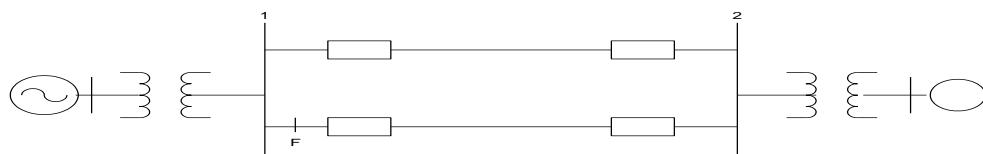
dari persamaan (44) dan (45) didapatkan suatu hubungan :

$$|\text{luas } A_1| = |\text{luas } A_2| \quad (46)$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_{m1} - P_{e1}) d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_{\max}} (P_{m1} - P_e) d\delta$$

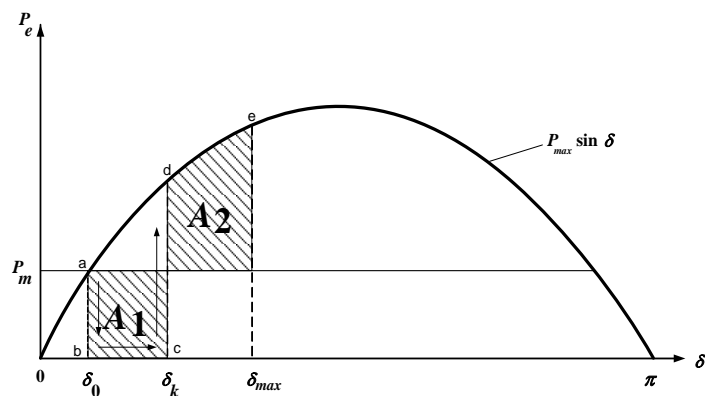
Persamaan (45) dikenal sebagai persamaan kriteria luas sama. persamaantersebut dapat kita gunakan untuk menentukan sudut dan waktu pemutusan gangguan yang berturut-turut disebut dengan sudut pemutusan kritis (*critical clearing angle*) dan waktu pemutusan kritis (*critical clearing time*).

Perhatikan Gambar 8, di mana sebuah generator dihubungkan ke *infinite bus* melalui dua kawat paralel. Gangguan tiga fasa sesaat terjadi pada salah satu saluran dekat bus 1. Anggap bahwa daya masukan mekanis P_m adalah konstan dan mesin beroperasi dalam keadaan stabil. Daya yang dialirkan ke sistem dengan sudut δ_0 seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Sistem satu mesin terhubung ke *infinite bus*, gangguan tiga fasa pada titik F (Saadat Hadi, 1999:492)

Bila gangguan berada pada ujung sisi kirim, yaitu pada titik F , 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 9.



Gambar 9 Kriteria sama luas untuk gangguan tiga fasa pada ujung pengirim(Saadat Hadi, 1999:488)

Gambar 9 sudut rotor maju dari δ_0 ke sudut pemutus kritis δ_k yang berarti berubah dari titik b ke titik c . bila gangguan dihilangkan pada sudut δ_k , keluaran daya listrik mendadak naik ke titik 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 negative. Akibatnya kecepatan rotor menurun sementara P_e berubah dari titik d ke titik e . pada titik e kecepatan rotor kembali sinkron meskipun sudut rotor sudah maju sampai δ_{max} . Sudut δ_{max} ditentukan dari kriteria luas sama yaitu $A_1 = A_2$.

Sudut pemutus kritis δ_k ini dapat diketahui dengan menggunakan kriteria luas- sama seperti ditunjukkan pada Gambar 10 sebagai berikut:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_k} P_m d\delta = \int_{\delta_k}^{\delta_{mak}} (P_{mak} \sin \delta - P_m) d\delta \quad (47)$$

dengan mengintegrasikan kedua sisi kiri dan kanan didapatkan:

$$P_m (\delta_k - \delta_0) = P_{mak} (\cos \delta_k - \cos \delta_{mak}) - P_m (\delta_{mak} - \delta_k) \quad (48)$$

dengan memindahkan suku-sukunya maka dihasilkan besarnya sudut pemutusan kritis

$$\begin{aligned} \cos \delta_k &= \frac{P_m}{P_{max}} (\delta_{mak} - \delta_0) + \cos \delta_{mak} \\ \delta_k &= \cos^{-1} \left[\frac{P_m}{P_{max}} (\delta_{mak} - \delta_0) + \cos \delta_{mak} \right] \end{aligned} \quad (49)$$

kurva sudut daya pada gambar 6, besarnya δ_{max}

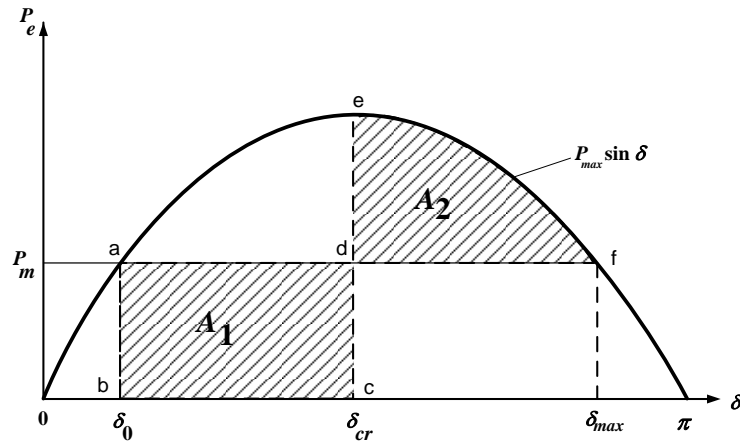
$$\delta_{max} = \pi - \delta_0 \quad \text{rad listrik} \quad (50)$$

dan,

$$P_m = P_{max} \sin \delta_0 \quad (51)$$

Substitusi persamaan (50) dan (51) ke dalam persamaan (49), diperoleh penyelesaian untuk harga δ_k adalah

$$\delta_k = \cos^{-1} \left[(\pi - 2\delta_0) \sin \delta_0 - \cos \delta_0 \right] \quad (52)$$



Gambar 10 Kriteria sama luas untuk mencari sudut pemutus kritis akibat gangguan tiga fasa pada ujung pengirim (Cekdin Cekmas, 2007 : 237)

Menentukan waktu pemutus kritis t_k , diperlukan penyelesaian persamaan ayunan nonlinear. Dalam hal ini, dimana daya listrik selama gangguan adalah nol, penyelesaian analitik untuk waktu pemutus kritis dapat ditentukan dari persamaan ayunan yang diberikan oleh persamaan (19) dapat ditentukan waktu pemutus kritis, dimana selama gangguan terjadi $P_e = 0$, sehingga waktu pemutus kritis dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\frac{H}{\pi \cdot f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m$$

atau

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi \cdot f}{H} P_m \tag{53}$$

Integrasi kedua sisi kiri dan kanan menghasilkan :

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi \cdot f}{H} P_m \int_0^t dt = \frac{\pi \cdot f}{H} P_m t \tag{54}$$

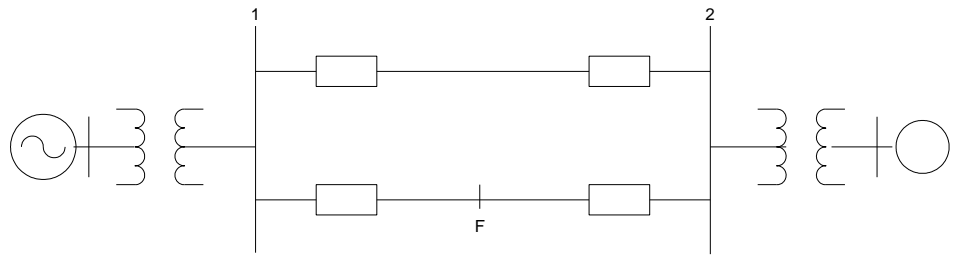
dengan mengintegrasikan sekali lagi didapatkan :

$$\delta = \frac{\pi \cdot f_0}{H} P_m t + \delta_0 \quad (55)$$

dan hubunganya dengan waktu pemutus kritis adalah:

$$t_k = \sqrt{\frac{2H(\delta_k - \delta_0)}{\pi \cdot f_0 P_m}} \quad (56)$$

Sekarang bagaimana jika lokasi titik gangguan F yang terpisah (jauh) dari sisi kirim, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.



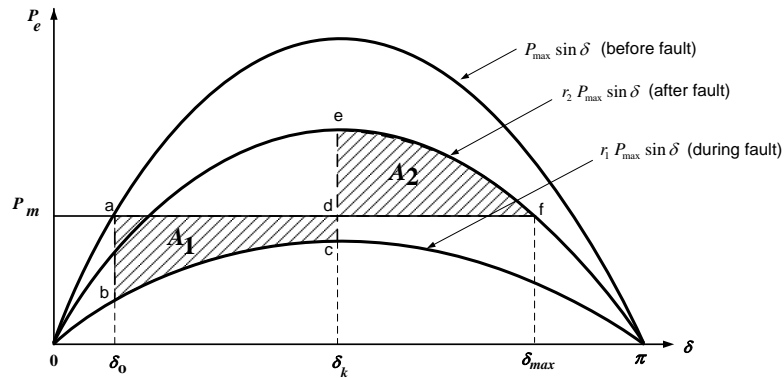
Gambar 11 Sistem satu mesin terhubung ke *infinite bus*, gangguan tiga fasa pada titik F (Saadat Hadi, 1999: 495)

Daya yang ditransfer sebelum gangguan adalah $P_{\max} \sin \delta$, selama gangguan daya yang ditransfer adalah $r_1 P_{\max} \sin \delta$, sedangkan setelah gangguan daya yang ditransfer menjadi $r_2 P_{\max} \sin \delta$. Dengan menggunakan kriteria luas sama dari Gambar 12 ditentukan sudut pemutus kritis sebagai berikut:

$$P_m (\delta_k - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_k} r_1 P_{\max} \sin \delta d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{\max}} r_2 P_{\max} \sin \delta d\delta - P_m (\delta_{\max} - \delta_k) \quad (57)$$

Mengintegrasikan kedua sisi kiri dan kanan persamaan di atas didapatkan sudut pemutus kritis δ_k sebagai berikut :

$$\cos \delta_k = \frac{(P_m / P_{mak})(\delta_{mak} - \delta_0) + r_2 \cos \delta_{mak} - r_1 \cos \delta_0}{r_2 - r_1} \quad (58)$$



Gambar 12 Kriteria sama luas untuk sudut pemutus kritis akibat gangguan tiga fasa yang jauh dari ujung kirim. (Saadat Hadi, 1999 : 495)

E. Penyelesaian Numerik Persamaan Differensial Nonlinear

1. Metode Runge-Kutta Orde 4

Kondisi peralihan dari sistem tenaga listrik pada saat gangguan dilukiskan secara matematis melalui persamaan diferensial. Salah satu metode numerik yang dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial tersebut adalah Metode Runge-Kutta Orde 4.

Metode Runge-Kutta dikembangkan untuk menghindari penghitungan turunan-turunan yang berorde lebih tinggi. Sebagai ganti dari turunan-turunan ini maka digunakan nilai-nilai tambahan dari fungsi $f(x,y)$ yang diberikan, dengan cara yang pada pokoknya merupakan duplikat dari ketelitian sebuah polinomial Taylor.

Menentukan harga $x(t)$, tentukan terlebih dahulu empat konstanta berikut :

$$k_1 = f(t_i, x_i) \Delta t \quad (59)$$

$$k_2 = f\left(t_i + \frac{1}{2}\Delta t, x_i + \frac{1}{2}k_1\right)\Delta t \quad (60)$$

$$k_3 = f\left(t_i + \frac{1}{2}\Delta t, x_i + \frac{1}{2}k_2\right)\Delta t \quad (61)$$

$$k_4 = f(t_i + \Delta t, x_i + k_3)\Delta t \quad (62)$$

Sehingga algoritma perhitungan untuk harga x berturut-turut dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$x_{i+1} = x_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (63)$$

2. Penyelesaian Numerik Persamaan Ayunan

Untuk menentukan penyelesaian persamaan ayunan pada Gambar 11 dimana daya input P_m diasumsikan konstan, pada operasi *steady state* dimana $P_e = P_m$ dan sudut daya mula-mula diberikan oleh :

$$\delta_0 = \sin^{-1}\left(\frac{P_m}{P_{1mak}}\right)$$

dengan

$$P_{1mak} = \frac{|E' \| V|}{X_1}$$

dan X_1 adalah reaktansi transfer sebelum gangguan. Rotor berputar pada kecepatan sinkron dan kemudian kecepatan putar berubah menjadi nol, sehingga :

$$\omega_0 = 0$$

Gangguan tiga fasa terjadi salah satu pertengahan saluran sehingga persamaan sudut daya menjadi

$$P_{2mak} = \frac{|E'| |V|}{X_2}$$

dengan X_2 adalah reaktansi transfer selama gangguan. Dengan demikian persamaan ayunan yang diberikan oleh persamaan (19) adalah:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} (P_m - P_{2mak} \sin \delta) = \frac{\pi f_0}{H} P_a$$

Persamaan ayunan diatas ditransformasikan kedalam bentuk pernyataan variabel sebagai berikut:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega \quad (64)$$

$$\frac{d\omega}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} P_a$$

Sekarang akan diterapkan kedalam metode Runge-Kutta Orde 4. Untuk menentukan harga δ dan ω dengan penyelesaian metode Runge-Kutta orde 4, terlebih dahulu tentukan harga-harga $k_1, k_2, k_3, k_4, l_1, l_2, l_3$ dan l_4 , yaitu sebagai berikut :

$$k_1 = f(\delta_i, \omega_i) \Delta t = \omega_i \Delta t \quad (65) \quad l_1 = g(\delta_i, \omega_i) \Delta t = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \Delta t \quad (66)$$

$$k_2 = f\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_1, \omega_i + \frac{1}{2} l_1\right) \Delta t = \left(\omega_i + \frac{1}{2} l_1\right) \Delta t \quad (67)$$

$$l_2 = g\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_1, \omega_i + \frac{1}{2} l_1\right) \Delta t = \frac{\pi f}{H} \left(P_m - P_e \sin\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_1\right)\right) \Delta t \quad (68)$$

$$k_3 = f\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_2, \omega_i + \frac{1}{2} l_2\right) \Delta t = \left(\omega_i + \frac{1}{2} l_2\right) \Delta t \quad (69)$$

$$l_3 = g\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_2, \omega_i + \frac{1}{2} l_2\right) \Delta t = \frac{\pi f}{H} \left(P_m - P_e \sin\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_2\right)\right) \Delta t \quad (70)$$

$$k_4 = f(\delta_i + k_3, \omega_i + l_3) \Delta t = (\omega_i + l_3) \Delta t \quad (71)$$

$$l_4 = g(\delta_i + k_3, \omega_i + l_3)\Delta_t = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e \sin(\delta_i + k_3))\Delta_t \quad (72)$$

Selanjutnya harga δ dan ω dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan seperti berikut :

$$\delta_{i+1} = \delta_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (73)$$

$$\omega_{i+1} = \omega_i + \frac{1}{6}(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) \quad (74)$$

F. Sistem Multimesin (*Multimachine System*)

Sistem multimesin merupakan sistem tenaga listrik yang terdiri dari banyak mesin-mesin (generator sinkron) dan saling interkoneksi satu sama lain. Untuk mengurangi kerumitan/kompleksitas dari analisis stabilitas transien maka dibuat penyederhanaan dengan asumsi-asumsi sebagai berikut :

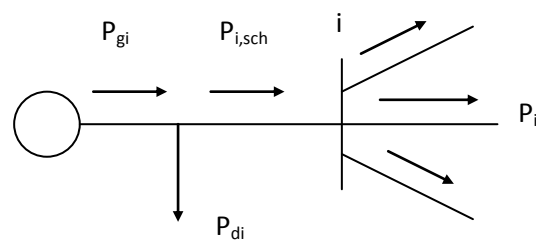
1. Setiap mesin sinkron direpresentasikan sebagai sumber tegangan konstan yang terhubung seri dengan reaktansi transien . Representasi ini mengabaikan efek saliensi dan mengasumsikan fluks bocor konstan.
2. Aksi governor diabaikan dan masukan daya mekanis diasumsikan selalu konstan selama keseluruhan periode simulasi.
3. Semua beban diubah menjadi admitansi ke ground dan diasumsikan konstan.
4. Redaman atau daya asinkron diabaikan

5. Sudut rotor mekanis dari setiap mesin bersamaan sudut fasa listrik tegangan dalam-dalam transien.

Langkah-langkah dalam analisis stabilitas transien adalah

- a. Menyelesaikan aliran daya sehingga diperoleh besar tegangan bus serta sudut fasa. Penyelesaian aliran daya dapat dilakukan dengan menggunakan metode Newton Raphson (NR).

Ada beberapa metode penyelesaian aliran daya, salah satunya adalah metode *Newton-Raphson*, yaitu metode yang digunakan dalam penelitian ini dan akan dibahas disini.



Gambar 13. Tipikal Bus dalam Studi Aliran Daya

Dari gambar 13 ditunjukkan bahwa :

- P_i menunjukkan daya aktif yang masuk jaringan
- P_{gi} menunjukkan daya aktif yang dibangkitkan pada bus i
- P_{di} menunjukkan kebutuhan daya aktif pada beban
- $P_{i, sch}$ menunjukkan daya aktif netto yang diinjeksikan ke bus i
- $P_{i, calc}$ menunjukkan harga P_i yang dihitung melalui persamaan aliran daya
- *Mismatch* ΔP_i menunjukkan selisih antara $P_{i, sch}$ terhadap $P_{i, calc}$

$$\Delta P_i = P_{i, sch} - P_{i, calc} = (P_{gi} - P_{di}) - P_{i, calc}$$

Secara umum persamaan arus yang memasuki suatu bus i pada sistem tenaga adalah sebagai berikut :

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (75)$$

dimana Y_{ij} adalah admitansi bus antara bus i dan j , dan pada persamaan di atas j termasuk bus i . Dalam bentuk polar, dapat ditulis menjadi

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \alpha_{ij} + \theta_j \quad (76)$$

Daya kompleks pada bus i adalah

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (77)$$

Dengan memasukkan (76) ke dalam (77), diperoleh

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\theta_i \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \alpha_{ij} + \theta_j \quad (78)$$

Kemudian dipisahkan bagian-bagian riil dan imajiner,

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\alpha_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad (79)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\alpha_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad (80)$$

Persamaan (79) dan (80) merupakan satu set persamaan aljabar nonlinear yang berhubungan dengan variabel-variabel bebas, magnitude tegangan dalam per unit (pu), sudut fase dalam radian. Terdapat dua persamaan untuk setiap bus beban, diberikan oleh (79) dan (80), dan satu persamaan untuk setiap bus pembangkit, diberikan oleh (80). Pengembangan (79) dan (80) ke dalam deret Taylor dan mengabaikan

semua suku-suku yang berorde tinggi, menghasilkan satu set persamaan-persamaan linear berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \hline \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \theta_n} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \theta_n^{(k)} \\ \hline \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (81)$$

Pada persamaan (81) di atas, bus 1 dianggap sebagai bus tadah. Matriks bujur sangkar pada persamaan di atas yang elemen-elemennya merupakan turunan parsial dari (79) dan (80) adalah matriks Jacobian. Matriks ini memberikan hubungan linear antara perubahan kecil sudut tegangan $\Delta \theta_i^{(k)}$ dan magnitudo tegangan $\Delta |V_i^{(k)}|$ dengan perubahan kecil pada daya riil dan reaktif, $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$.

Persamaan (II.7) secara ringkas dapat ditulis

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (82)$$

Pada bus PV, magnitudo tegangan telah diketahui. Oleh karena itu, jika ada m bus pada sistem adalah bus PV, m persamaan menyangkut ΔQ dan ΔV dan berhubungan dengan kolom-kolom matriks jacobian dihilangkan. Karena itu, ada $n - 1$ kendala daya riil dan $n - 1 - m$ kendala

daya reaktif, dan matriks Jacobian berorde $(2n - 2 - m) \times (2n - 2 - m)$. \mathbf{J}_1 berorde $(n - 1) \times (n - 1)$, \mathbf{J}_2 berorde $(n - 1) \times (n - 1 - m)$, \mathbf{J}_3 adalah $(n - 1 - m) \times (n - 1)$, dan orde \mathbf{J}_4 adalah $(n - 1 - m) \times (n - 1 - m)$.

Elemen-elemen diagonal dan non-diagonal dari \mathbf{J}_1 adalah

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\alpha_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad (83)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\alpha_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad j \neq i \quad (84)$$

Elemen-elemen diagonal dan non-diagonal dari \mathbf{J}_2 adalah

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\alpha_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad (85)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\alpha_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad j \neq i \quad (86)$$

Elemen-elemen diagonal dan non-diagonal dari \mathbf{J}_3 adalah

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\alpha_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad (87)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\alpha_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad j \neq i \quad (88)$$

Dan elemen-elemen diagonal dan non-diagonal dari \mathbf{J}_4 adalah

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\alpha_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad (89)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\alpha_{ij} - \theta_i + \theta_j) \quad j \neq i \quad (90)$$

Variabel $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ adalah perbedaan antara nilai daya yang terjadwal dan nilai terhitung, dan disebut dengan selisih daya, yang diberikan oleh

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (91)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (92)$$

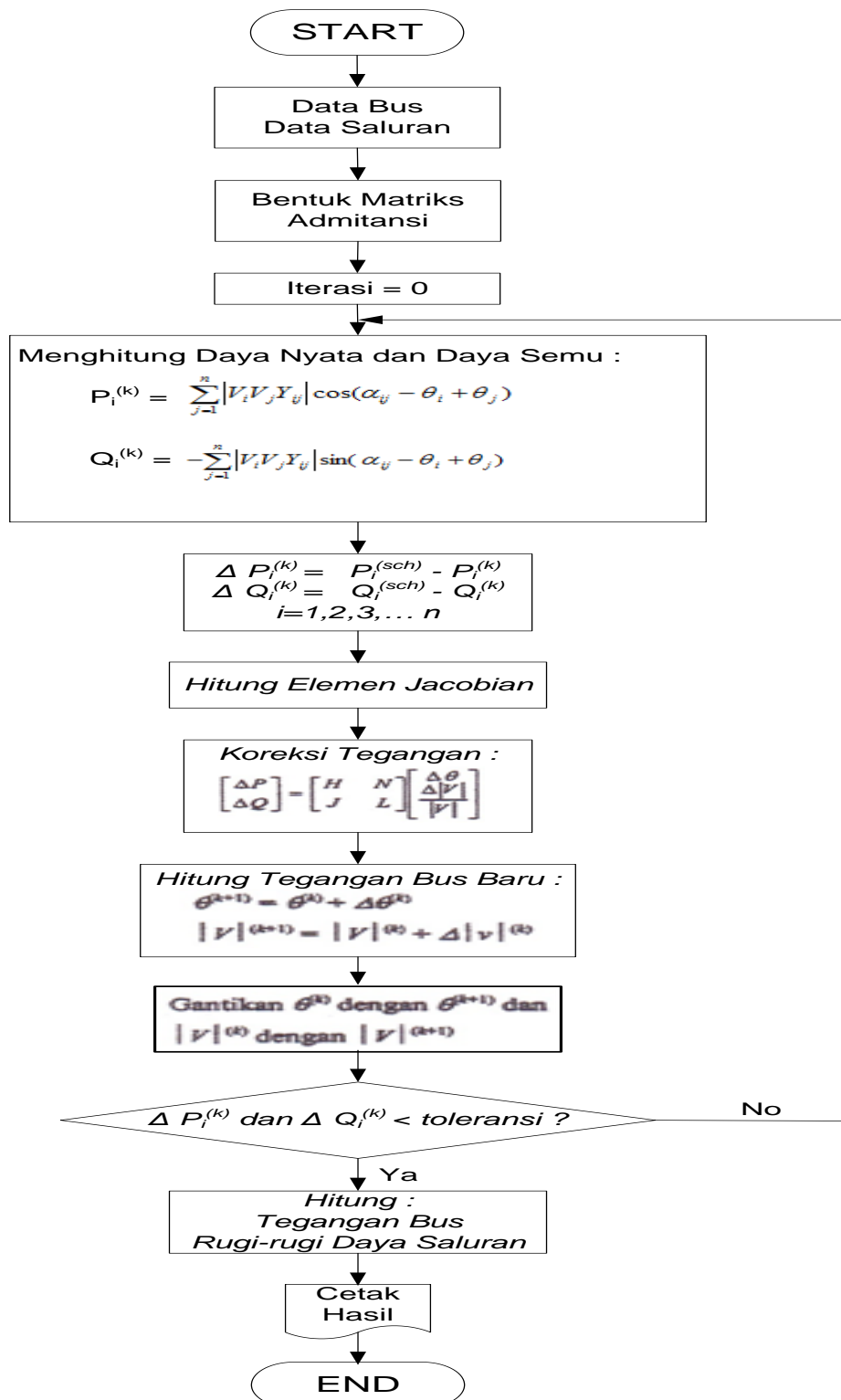
Nilai estimasi baru untuk tegangan bus adalah

$$\theta_i^{(k+1)} = \theta_i^{(k)} - \Delta \theta_i^{(k)} \quad (93)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (94)$$

Langkah-langkah solusi aliran daya dengan metode Newton-Raphson adalah sebagai berikut :

1. Untuk bus PQ, dimana P_i^{sch} dan Q_i^{sch} ditentukan, nilai awal magnitude dan sudut fase tegangan diset sama dengan nilai bus tadah, atau 1,0 dan 0,0, yaitu $|V_i^{(0)}| = 1,0$ dan $\theta_i^{(0)} = 0,0$. Untuk bus PV, dimana $|V_i|$ dan P_i^{sch} ditentukan, sudut fasenya diset sama dengan sudut fase tegangan bus tadah, atau 0, yaitu $\theta_i^{(0)} = 0$.
2. Untuk bus PQ, $P_i^{(k)}$ dan $Q_i^{(k)}$ dihitung dengan (79) dan (80), kemudian $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ diperoleh dengan (91) dan (92).
3. Untuk bus PV, $P_i^{(k)}$ dan $\Delta P_i^{(k)}$ berturut-turut dihitung dengan (79) dan (91).
4. Elemen-elemen matriks Jacobian (J_1 , J_2 , J_3 , dan J_4) dihitung dari (83) – (90).



Gambar 14 Flowcart Aliran Daya Menggunakan Metode Newton Raphson

5. Menyelesaikan persamaan linear simultan secara langsung dengan cara faktorisasi triangular dan eliminasi Gauss.
6. Nilai magnitude dan sudut fase tegangan baru dihitung dari (94) dan (93).
7. Proses berulang sampai selisih daya $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ lebih kecil dari tingkat akurasi yang ditentukan, yaitu

$$|\Delta P_i^{(k)}| \leq \varepsilon \quad |\Delta Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon \quad (95)$$

Langkah-langkah penyelesaian aliran daya dengan Metode Newton Raphson dapat gambar dalam bentuk flow pada gambar 14.

Besar daya baik generator maupun beban, nilai tegangan dan sudut fasa merupakan nilai awal dalam perhitungan stabilitas transien. Selanjutnya dilakukan perhitungan stabilitas transien berikut ini.

- b. Menghitung Arus mesin sebelum gangguan dihitung dengan persamaan,

$$I = \frac{S_i}{V_i} = \frac{P_i - Q_i}{V_i} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (96)$$

dengan :

m = jumlah generator

V_i = tegangan terminal generator ke- i

P_i dan Q_i = daya nyata dan daya reaktif generator ke - i .

Sesuai hasil aliran daya

- c. Tegangan-dalam transien dari masing-masing generator kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan (36)

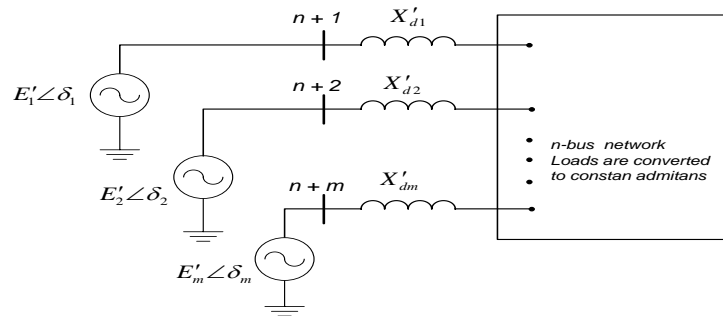
$$E' = V_g + jX'_d I_a$$

d. Semua beban dirubah dalam bentuk persamaan admitansi dengan menggunakan persamaan :

$$y_L = \frac{S_L^*}{|V_L|^2} = \frac{P_L - jQ_L}{|V_L|^2} \quad (97)$$

dengan $P_L + jQ_L$ adalah beban dan V_L adalah besar tegangan bus.

Tegangan sebelum reaktansi transien pada sistem jaringan m bus ditambahkan ke jaringan sistem daya n bus. Persamaan jaringan dan semua beban yang dirubah kedalam bentuk persamaan admitansi dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13 Representasi sistem tenaga untuk analisis stabilitas transien multimesin (Glover, S. Sarma dan Overbye, 2008:719)

Titik $n+1, n+2, \dots, n+m$ adalah bus internal mesin (*internal machine buses*), yang berarti bus sebelum reaktansi transient, persamaan titik tegangan dengan titik 0 sebagai awal dalam jaringan ini adalah :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_{n+1} \\ \vdots \\ I_{n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} & | & Y_{1(n+1)} & \cdots & Y_{1(n+m)} \\ Y_{21} & \cdots & Y_{2n} & | & Y_{2(n+1)} & \cdots & Y_{2(n+m)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nm} & | & Y_{n(n+1)} & \cdots & Y_{n(n+m)} \\ \hline Y_{(n+1)1} & \cdots & Y_{(n+1)n} & | & Y_{(n+1)(n+1)} & \cdots & Y_{(n+1)(n+m)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{(n+m)1} & \cdots & Y_{(n+m)n} & | & Y_{(n+m)(n+1)} & \cdots & Y_{(n+m)(n+m)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \\ E'_{n+1} \\ \vdots \\ E'_{n+m} \end{bmatrix} \quad (98)$$

atau

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus} \quad (99)$$

dengan,

I_{bus} = vektor yang dimasukkan dalam arus bus

V_{bus} = vektor dari bus tegangan yang diukur dari titik referensi

Elemen diagonal dari matriks admitansi bus adalah jumlah admitansi yang terhubung dengan bus tersebut dan elemen diagonalnya bertanda negatif. Untuk menghilangkan bus beban, matriks admitansi bus dalam persamaan (98) dipartisi di mana n bus diganti untuk mewakili baris n yang di atas. Karena tidak ada arus yang masuk dan keluar bus beban, arus pada n adalah nol. Arus generator dinyatakan dengan vektor I_m , dan tegangan generator dan beban diwakili dengan vektor E'_m dan V_m maka persamaan (98) dalam bentuk submatriks berbentuk

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nm} \\ Y'_{nm} & Y_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_n \\ E'_m \end{bmatrix} \quad (100)$$

Vektor tegangan V_n dihilangkan dengan substitusi, menjadi :

$$0 = Y_{nn} V_n + Y_{nm} E'_m \quad (101)$$

$$I_m = Y'_{nm} V_n + Y_{mm} E'_m \quad (102)$$

dari persamaan (100), diperoleh

$$V_n = -Y_{nn}^{-1} Y_{nm} E'_m \quad (103)$$

dengan mensubstitusi persamaan (103) kedalam persamaan (102), diperoleh

$$\begin{aligned}
I_m &= (Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_{nn}^{-1} Y_{nm}) E_m' \\
&= Y_{bus}^{red} E_m'
\end{aligned} \tag{104}$$

sehingga dari persamaan (104) diperoleh matriks admitansi reduksi bus adalah

$$Y_{bus}^{red} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_{nn}^{-1} Y_{nm} \tag{105}$$

Matriks admitansi reduksi bus pada persamaan (105) di atas adalah berdimensi ($m \times m$), dimana m adalah jumlah generator. Daya listrik keluaran dari setiap mesin dapat dinyatakan dalam bentuk tegangan-dalam mesin dengan persamaan

$$S_{ei}^* = E_i'^* I_i \tag{106}$$

atau :

$$P_{ei} = \Re(E_i'^* I_i) \tag{107}$$

dimana :

$$I_i = \sum_{j=i}^m E_j' Y_{ij} \tag{108}$$

Tegangan dan admitansi dalam bentuk polar, yaitu $E_i' = |E_i'| \angle \delta_i$ dan $Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \delta_{ij}$ dan substitusi nilai I_i dari persamaan (108) ke dalam persamaan (107), menghasilkan :

$$P_{ei} = I_i = \sum_{j=i}^m |E_i'| \cdot |E_j'| \cdot |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{109}$$

Sebelum gangguan, terdapat kesamaan antara masukan daya mekanik dan keluaran daya listrik, dan didapatkan :

$$P_{mi} = I_i = \sum_{j=i}^m |E'_i| \cdot |E'_j| \cdot |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (110)$$

G. Stabilitas Transien Multimesin (*Multimachine Transient Stability*)

Studi stabilitas transien didasarkan pada aplikasi gangguan tiga fasa. Gangguan tiga fasa permanen pada bus k dalam jaringan menghasilkan $V_k = 0$. Hal ini ditunjukkan oleh perpindahan baris dan kolom ke- k dari matriks admitansi bus sebelum gangguan. Matriks admitansi bus baru merupakan pengurangan akibat penghilangan semua titik (*node*) kecuali titik netral generator. Tegangan eksitasi generator selama gangguan dan titik gangguan diasumsikan konstan. Daya listrik dari generator ke- i dalam bentuk matriks admitansi baru yang direduksi diperoleh dari persamaan (110). Persamaan ayunan dengan redaman diabaikan, sebagaimana diberikan oleh persamaan (19). Untuk itu persamaan ayunan mesin i menjadi :

$$\frac{H_i}{\pi \cdot f} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - \sum_{j=i}^m |E'_i| \cdot |E'_j| \cdot |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (111)$$

Y_{ij} adalah elemen-elemen matriks admitansi bus gangguan yang direduksi, dan H_i adalah kontanta kelembanan mesin i yang dinyatakan dalam MVA pada dasar S_{mach} . Jika H_{Gi} adalah kontanta kelembanan dan mesin i dinyatakan dalam MVA pada rating S_{Gi} , maka H_i diberikan dalam

$$H_{Gi} = \frac{S_{Gi}}{S_{mach}} H_i \quad (112)$$

Daya listrik generator ke- i oleh P_e^f dan perubahan persamaan (111)

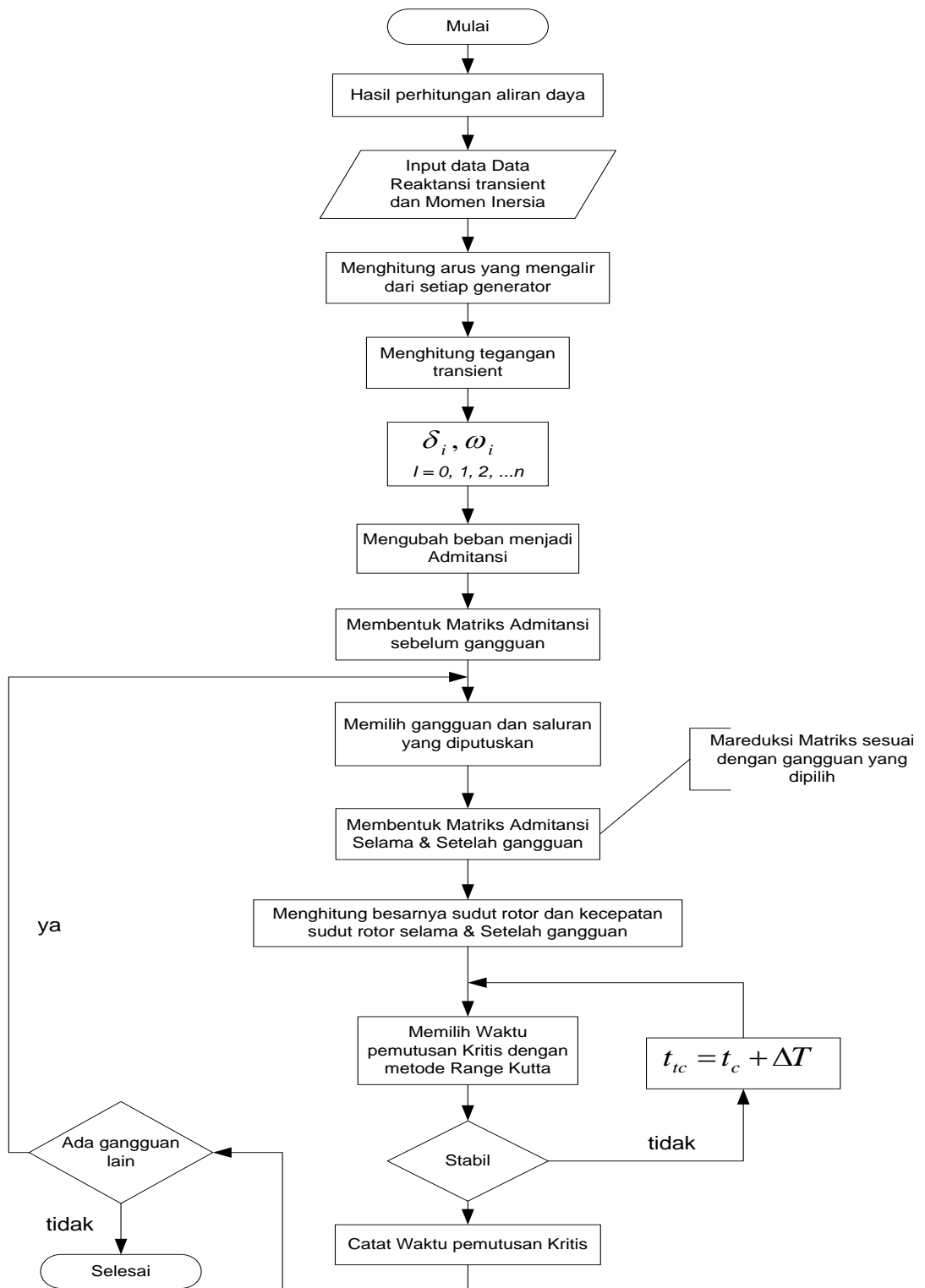
kedalam model variabel keadaan dinyatakan dengan :

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i \quad i = 1, \dots, m \quad (113)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\pi f}{H_i} (P_m - P_e^f) \quad (114)$$

H. Diagram alir program

Berikut ini diagram alur (*Flow Chart*) yang digunakan menentukan sudut pemutusan kritis (*Critical Clearing Angle*) dan pemutusan waktu kritis (*Critical Clearing Time*) pada setiap bus beban, menggunakan perangkat lunak komputer MATLAB



Gambar 14 Flowchart Program

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif dengan tujuan untuk menentukan besarnya besar waktu pemutusan kritis gangguan setiap bus atau jaringan yang mengalami gangguan besar pada sistem kelistrikan Sulawesi Selatan dan melihat kondisi kestabilan sistem kelistrikan Sulawesi Selatan dalam keadaan keadaan stabil jika terjadi gangguan besar

B. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada: PT. PLN (Persero) wilayah SULSELBAR pada area pengatur dan pembagi beban. Penelitian ini dilaksanakan selama 6 (enam) bulan dari bulan Februari sampai dengan Juli 2011. Untuk pengambilan data dimulai tanggal 1 sampai dengan 30 Juni 2011 pada bagian teknik Area Penyaluran dan Pengatur Beban (AP2B) Sistem Sulawesi Selatan, PT. PLN (Persero) Wilayah Sultanbatara.

C. Perangkat Penelitian

Penelitian ini menggunakan alat bantu berupa seperangkat komputer (Laptop atau PC) lengkap dengan software pendukung seperti

Bahasa Pemrograman MATLAB yang digunakan adalah MATLAB versi 7.0 dan software pendukung lainnya.

Penyelesaian penelitian ini menggunakan data seperti single line sistem kelistrikan Sulsebar, data-data komponen sistem seperti data beban, data generator, data saluran atau penghantar. Data-data tersebut kemudian direkapitulasi untuk kebutuhan simulasi aliran daya. Selanjutnya, hasil aliran daya dan data reaktansi transien serta momen inersia dari masing-masing generator kemudian digunakan dalam simulasi kestabilan transien untuk mendapatkan nilai sudut rotor dalam *radian* kemudian dikonversi dalam *degree* dengan mengalikan pada masing-masing generator

D. Teknik Analisis

Teknik analisis yang digunakan dalam analisis ini adalah menggunakan Metode Kualitatif dengan langkah-langkah sebagai berikut::

1. Menghitung menghitung aliran daya menggunakan metode Newton Raphson sehingga diperoleh daya aktif dan reaktif dari generator, data tegangan dan sudut tegangan.
2. Hasil aliran daya tersebut menjadi data awal dalam menganalisis kestabilan transien sudut rotor. Metode penyelesaian yang digunakan untuk mendapatkan perubahan sudut rotor dan kecepatan sudut rotor digunakan metode metode Range Kutta orde

E. Prosedur Penelitian

Dalam menyelesaikan analisis kestabilan transient pada sistem tenaga listrik Sulselbar ini digunakan perangkat lunak Matlab versi 7.8 untuk memudahkan perhitungan.

Adapun langkah – langkah yang digunakan sebagai berikut :

1. Mempersiapkan data sistem dan generator. Semua data dibuat dalam per unit (pu) dengan dasar 100 MVA (Lampiran 2)
2. Untuk keperluan aliran beban, semua data impedansi diubah ke dalam admitansi, dan beban tiap bus diubah ke dalam admitansi pengganti menggunakan program lfybus (Lampiran 3)
3. Menghitung aliran daya menggunakan Metode Newton Raphson dengan program lfnewton (lampiran 4)
4. Hasil aliran daya menggunakan program busout (lampiran 5)
5. Menghitung tegangan internal semua generator dari hasil Hasil Aliran daya seperti tegangan dan sudut tegangan pada bus generator maupun slack bus digunakan perhitungan stabilitas transien, demikian halnya dengan daya baik pada beban maupun generator menggunakan program trstab (lampiran 6)
6. Menghitung matriks admitansi setiap kondisi jaringan menggunakan program trstab (lampiran 6)
7. Mengeliminasi semua simpul selain simpul internal generator sehingga diperoleh matriks admitansi yang direduksi untuk setiap

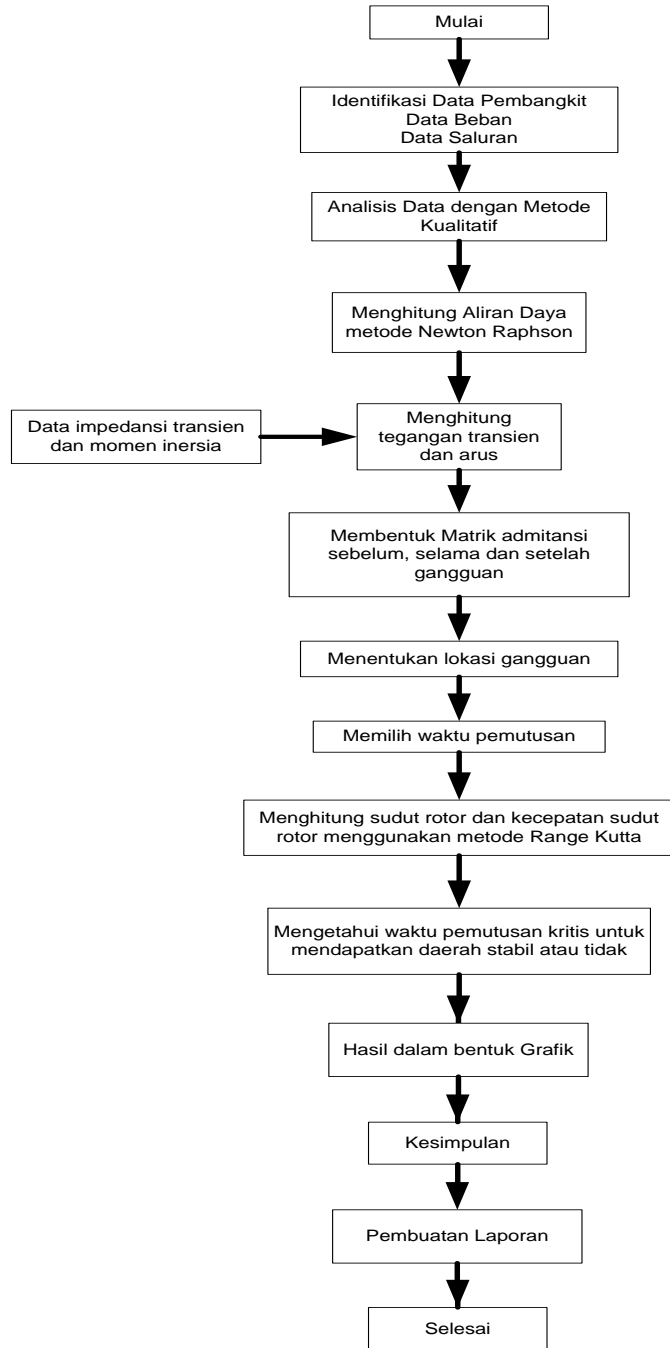
kondisi jaringan sebelum, selama, dan setelah gangguan menggunakan program trstab (lampiran 6)

8. Memilih lokasi gangguan yang terkena gangguan hubung singkat dan data saluran transmisi yang mau diputuskan menggunakan program trstab (lampiran 6)
9. Memilih waktu pemutusan kritis menggunakan program trstab (lampiran 6)
10. Mencetak grafik perbedaan sudut rotor untuk setiap waktu pemutusan kritis menggunakan program trstab (lampiran 6)

Analisis kestabilan transient dengan Matlab ini meliputi perhitungan aliran beban dan grafik perbedaan sudut rotor untuk setiap waktu pemutusan kritis pada saat terjadi gangguan hubung singkat disetiap bus dekat pembangkit yang sedang beroperasi

Sebelum melakukan simulasi untuk sistem Suiselbar, maka dilakukan verifikasi dengan cara analitik selanjutnya dibandingkan dengan hasil simulasi. Hal ini telah diuji untuk sistem 3 bus pada bab IV.

F. Diagram Alur Penelitian



Gambar 3.1 Flowchart Program

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran umum sistem tenaga listrik Sulselbar

Sistem interkoneksi adalah kumpulan dari satu atau beberapa pusat tenaga listrik dan gardu induk atau pusat beban, yang satu sama lainnya dihubungkan oleh jaringan, sehingga dibentuk suatu kesatuan kerja.

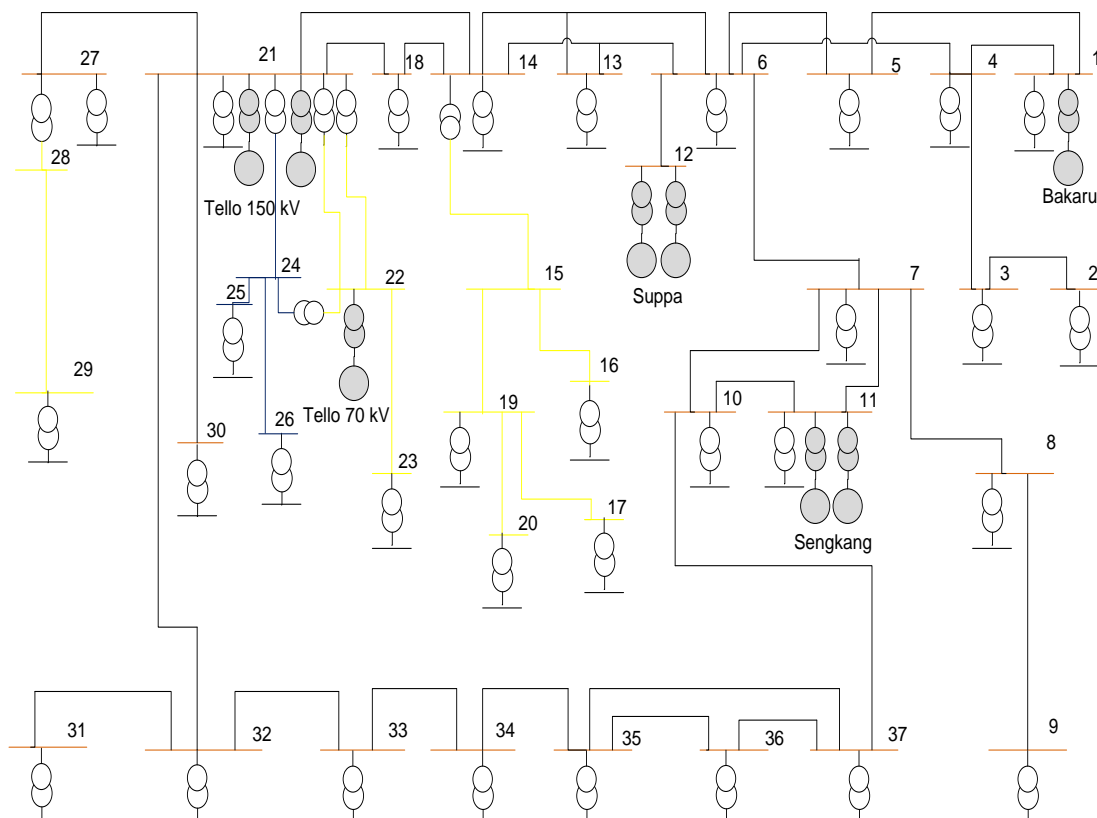
Pada saat ini Sistem Interkoneksi Sulselbar mencakup bus 150 kV, 70kV dan 30 kV, (lampiran 1). Sistem ini disuplai dari pembangkitan dengan kapasitas dan jenis yang berbeda-beda, karena itu dalam penelitian ini, yang diamati hanya pada sistem pembangkitan dengan kapasitas utama seperti gambar 4.1 yaitu : Pembangkit Bakaru 150 kV, Pembangkit Tello 150 kV, Pembangkit Sengkang 150 kV dan Pembangkit Suppa 150 kV serta Pembangkit Tello 70 KV.

Besaran yang dipakai oleh PT. PLN (Persero) Wilayah VIII untuk menentukan nilai besaran per unitnya (pu) adalah sebagai berikut:

- Dasar daya diambil 100 MVA
- Dasar tegangan ditentukan oleh tempat dan transformator daya yang dipakai ditempat tersebut.

Sistem Interkoneksi Sulselbar terdiri dari 37 bus dengan penomoran pada Tabel 4.1

Pada gambar 4.1 dijelaskan bahwa bus-bus yang diberi warna merah merupakan bus 150 kV yaitu bus 1 sampai bus 14, bus 18, 21, 27, 30 sampai dengan bus 37. Sedangkan bus 70 kV yaitu bus 15, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 28 dan bus 29. Untuk bus 30 kV yaitu bus 24, 25, dan 26.



Keterangan
Jalur kuning dan bus kuning : 70 kV
Jalur biru dan bus biru : 30 kV
Jalur hitam dan bus merah : 150 kV

Gambar 4.1 Sistem interkoneksi pembangkitan dengan 5 pembangkitan utama

B. Data sistem tenaga listrik Sulselbar

Untuk analisis kestabilan transien sistem tenaga listrik Sulselbar diperlukan data saluran transmisi, data pembangkit, data admitansi shunt

dan data pembebanan sistem. Data sistem Sulselbar yang digunakan dalam penelitian ini ada data pada tanggal 10 Februari 2011 pukul 19.30 WITA.

Tabel 4.1 Penomoran bus sistem interkoneksi Sulselbar

No bus	Nama Bus	No bus	Nama Bus
1	Bakaru	19	Mandai
2	Mamuju	20	Daya
3	Majene	21	Tello 150 kV
4	Polewali/Polmas	22	Tello 70kV
5	Pinrang	23	Barangloe
6	Parepare	24	Tello (B) 30kV
7	Sidrap	25	Tello (A) 30kV
8	Makale	26	Barawaja
9	Palopo	27	Tallo Lama 150kV
10	Soppeng	28	Tallo Lama 70kV
11	Sengkang	29	Bontoala
12	Suppa	30	Panakkukang
13	Barru	31	Tanjung Bunga
14	Pangkep 150 kV	32	Sungguminasa
15	Pangkep 70 kV	33	Tallasa
16	Tonasa	34	Jeneponto
17	Maros	35	Bulukumba
18	Bosowa	36	Sinjai
		37	Bone

Sumber : PT.PLN Persero Wilayah VIII Sulselbar

Data-data tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.2 yang menggambarkan suatu saluran transmisi akan mempunyai resistansi (R) dan reaktansi (X), yang bersama-sama membentuk impedansi seri dari kawat-kawat penghantar, serta konduktansi dan kapasitansi shunt dari dielektrikum yang terdapat di antara penghantar-penghantar, yang bersama-sama membentuk admintansi shunt ($Y/2$) dari saluran.

Tabel 4.2 Data saluran transmisi sistem

No Bus		Impedansi		Y/2 (pu)
Dari	Ke	R (pu)	X (pu)	
1	4	0.0263	0.0944	0.0074
1	5	0.0308	0.1102	0.0101
2	3	0.0734	0.2638	0.0208
3	4	0.0263	0.0945	0.0074
4	6	0.0366	0.1316	0.0182
5	6	0.0139	0.0497	0.0067
6	7	0.0100	0.0360	0.0028
6	12	0.0039	0.0141	0.0011
6	13	0.0231	0.0829	0.0112
6	14	0.0473	0.1696	0.0228
7	8	0.0314	0.1888	0.0241
7	10	0.0282	0.1014	0.0096
7	17	0.0062	0.0423	0.0080
8	9	0.0196	0.0704	0.0055
10	11	0.0105	0.0634	0.0081
10	37	0.0229	0.0815	0.0080
13	14	0.0242	0.0867	0.0117
14	15	0.0000	0.3949	0.0000
14	18	0.0109	0.0392	0.0049
14	21	0.0238	0.0854	0.0115
15	16	0.0164	0.0301	0.0001
15	17	0.0819	0.1503	0.0005
15	19	0.1816	0.3334	0.0010
17	32	0.0272	0.1862	0.0351
17	19	0.1363	0.2502	0.0008
18	21	0.0168	0.0605	0.0076
19	20	0.0342	0.0628	0.0002
19	22	0.0583	0.1070	0.0003
20	22	0.0241	0.0442	0.0001
21	22	0.0000	0.4159	0.0000
21	25	0.0000	0.5535	0.0000
21	27	0.0036	0.0130	0.0018
21	30	0.0024	0.0085	0.0007
21	32	0.0019	0.0132	0.0025
22	23	0.0607	0.1114	0.0003
22	24	0.0000	0.5535	0.0000
25	26	0.1229	0.1751	0.0000
27	28	0.0000	0.4159	0.0000
28	29	0.0202	0.0371	0.0001
29	31	0.0079	0.0283	0.0022
31	32	0.0035	0.0213	0.0027

32	33	0.0049	0.0332	0.0063
33	34	0.0333	0.1197	0.0094
35	34	0.0243	0.0873	0.0069
35	36	0.0313	0.1125	0.0089
35	37	0.0720	0.2585	0.0204
36	37	0.0406	0.1460	0.0115

Sumber : PT.PLN Persero wilayah V III Sulselbar

Nilai konstanta-konstanta primer pada Tabel 4.2 konstan dalam arti tidak berubah dengan tegangan dan arus, tetapi sampai batas-batas tertentu dipengaruhi oleh frekuensi.

Tabel 4.3 Data sistem tenaga listrik Sulselbar

No Bus	Tipe bus	Tegangan		Beban		Generator			
		V (pu)	Sdt ($^{\circ}$)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)	Qmin (MVAR)	Qmax (MVAR)
1	1	1.05	0	3.9	0.2	126	0	0	-6.4
2	0	1	0	8.8	0.7	0	0	0	0
3	0	1	0	6.6	1.7	0	0	0	0
4	0	1.02	0	5.4	0.4	0	0	0	0
5	0	1.03	0	16.5	4.7	0	0	0	0
6	0	1	0	6.6	-1	0	0	0	0
7	0	1	0	15.9	9.8	0	0	0	0
8	0	1	0	11	1.6	0	0	0	0
9	0	1	0	25.4	5.4	0	0	0	0
10	0	1	0	11	4.8	0	0	0	0
11	2	1.03	0	15.8	7.5	195	0	0	7.3
12	2	1.01	0	50	17	64.8	0	0	17
13	0	1	0	4.3	1.1	0	0	0	0
14	0	1	0	13.2	5	0	0	0	0
15	0	1	0	7.2	0	0	0	0	0
16	0	1	0	17.4	12.2	0	0	0	0
17	0	1	0	6.3	1.5	0	0	0	0
18	0	1	0	18.3	0	0	0	0	0
19	0	1	0	8.4	2.1	0	0	0	0
20	0	1	0	18.6	2.5	0	0	0	0
21	2	1.03	0	21	8	186.8	0	0	49.4
22	2	1.01	0	0	0	21.5	0	0	0
23	0	1	0	2.7	0	0	0	0	0
24	0	1	0	0	0	0	0	0	0
25	0	1	0	0	0	0	0	0	0
26	0	1	0	38.9	11.5	0	0	0	0
27	0	1	0	1.9	3.7	0	0	0	0
28	0	1	0	0	0	0	0	0	0
29	0	1	0	35.4	0	0	0	0	0
30	0	1	0	38.9	11.5	0	0	0	0
31	0	1	0	35.8	13.7	0	0	0	0
32	0	1	0	10.6	3.7	0	0	0	0
33	0	1	0	2.2	5.7	0	0	0	0
34	0	1	0	7.5	4.1	0	0	0	0
35	0	1	0	6.1	0.5	0	0	0	0
36	0	1	0	8.3	2.9	0	0	0	0
37	0	1	0	20.1	5.9	0	0	0	0

Sumber : PT.PLN Persero Wilayah VIII Sulselbar

Keterangan :

1. Swing Bus
2. Pembangkit (Generator)
0. Beban

Berdasarkan Tabel 4.2 dan Tabel 4.3, ada tiga jenis bus pada sistem tenaga listrik dan setiap bus mempunyai empat kuantitas penting dalam perhitungan analisis aliran daya yang berhubungan pada tiap bus yaitu; daya aktif (P) atau daya nyata, nilai maksimum dari daya yang selalu berubah-ubah atau disebut daya reaktif (Q), magnitudo tegangan (V), dan sudut tegangan (δ) atau sudut fasa listrik dari tegangan dalam peralihan.

Jenis-jenis bus yang terdapat dalam sistem tenaga listrik berdasarkan data pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 adalah:

1. *Swing bus* (bus berayun) diberi kode dengan angka 1. Magnituda tegangan (V) dan sudut fase tegangan diketahui. Biasanya bus 1 dianggap sebagai *slack bus* atau *swing bus*, tetapi sebaiknya bus dengan kapasitas pembangkit terbesar dipilih sebagai slack bus oleh karena pada bus ini berfungsi mencatu rugi-rugi dan kekurangan daya pada jaringan karena itu nilai daya aktif (P) dan nilai daya reaktif (Q) dihitung setelah perhitungan selesai. Sudut tegangan dari slack bus merupakan referensi untuk sudut tegangan semua bus yang lainnya.
2. Bus Pembangkit atau *Voltage-controlled buses* (bus pengontrol tegangan) yang juga dikenal sebagai bus (PV) diberi kode dengan angka 2. Daya aktif dan magnituda tegangan diketahui pada bus ini, sedangkan daya reaktif (Q) dihitung setelah perhitungan iterasi dan sudut tegangan () dihitung dalam proses iterasi.
3. *Load buses* (bus beban) dikenal dengan bus (PQ) diberi kode dengan angka 0. Daya aktif dan reaktif diketahui. Biasanya beban dianggap

mempunyai daya konstan. Kuantitas yang dihitung ialah magnituda tegangan dan sudut tegangan.

Data lain yang dibutuhkan dalam menganalisis kestabilan transient adalah data Generator yang termasuk dalam sistem kelistrikan, seperti pada Tabel 4.4 dimana X_d' adalah impedansi operasional Generator dan H adalah konstanta inersia pada Generator (MJ/MVA) yang merupakan salah satu konstanta yang berhubungan dengan kelambanan.

Tabel 4.4 Data Generator

No	Generator	X_d' (pu)	H (MJ/MVA)
1	Bakaru	0.19	2.9
2	Suppa	0.44	5.4
3	Tello 150 kV	0.16	5.1
4	Sengkang	0.09	1.05
5	Tello 70 kV	1.08	7

Sumber : PT.PLN Persero Wilayah VIII Sulselbar

C. Langkah-langkah Penyelesaian Kestabilan Transient

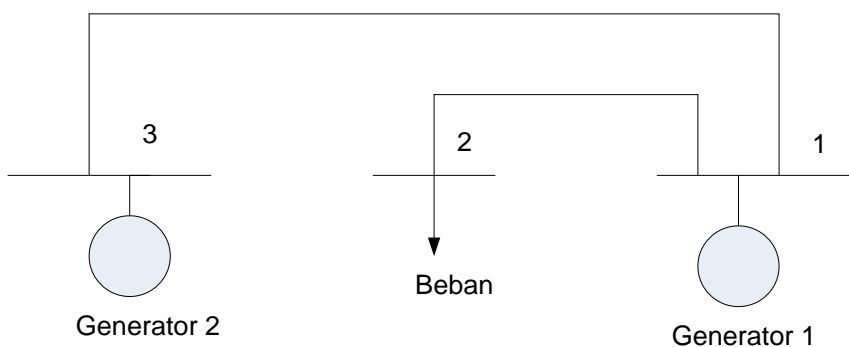
Adapun langkah – langkah yang digunakan sebagai berikut :

1. Menyelesaikan aliran daya untuk mendapatkan magnituda tegangan bus (pada bus beban (bus PQ) sedangkan PV bus, magnituda tegangan dan Swing bus magnituda tegangan tetap, sudut fasa pada bus beban, sudut fasa pada PV bus, daya reaktif bus Generator (Q_3), daya aktif (P_1) dan daya reaktif (Q_1) bus slack sedangkan daya aktif (P_3) pada PV bus tetap, demikian halnya untuk bus beban, daya aktif (P_2) dan daya reaktif (Q_2) tetap

2. Menghitung arus yang mengalir dengan menambahkan reaktansi transien Generator pada simpul yang terhubung bus sehingga diperoleh arus dari bus Generator dan arus yang mengalir dari bus swing, sedangkan arus dari bus beban (tidak ada karena bus ini tidak ada sumber arus.
3. Menghitung nilai tegangan transient (E') pada bus Generator ($E'3$) dan $E'1$ pada bus swing sedangkan tegangan transien pada bus beban sebesar 1.0 pu, sehingga diperoleh nilai awal kecepatan sudut dan sudut rotor
4. Membentuk matrix admitansi sebelum gangguan (Y_{bf}) dengan mengubah semua beban menjadi admitansi konstan (Y_L) dengan cara, dengan i menunjukkan bus beban ke i
5. Membentuk matrix admitansi selama gangguan Y_{df} kemudian dieliminasi atau direduksi berdasarkan lokasi gangguan. Hasilnya digunakan untuk menghitung daya mekanik (P_e) dari masing-masing pembangkit.
6. Membentuk matrix admitansi setelah gangguan Y_{af} kemudian dieliminasi atau direduksi berdasarkan saluran yang dilepas. Hasilnya digunakan untuk menghitung daya mekanik (P_e) dari masing-masing pembangkit.
7. Menghitung besarnya kecepatan sudut rotor dan sudut rotor selama gangguan dan setelah gangguan

8. Memilih waktu pemutusan kritis (t_c) dengan cara memasukkan waktu selangkah demi selangkah.
9. Mencetak grafik sudut rotor terhadap perubahan waktu untuk setiap waktu pemutusan kritis.

Berikut ini contoh perhitungan kestabilan transien untuk sistem 3 bus



Gambar 4.2 Single line 3 bus

Pada gambar terlihat bahwa bus 1 adalah bus Generator 1 sebagai swing bus, bus 2 adalah bus beban dan bus 3 adalah bus Generator 2 sebagai PV bus.

Kondisi Normal

Tabel 4.5 Data Sistem 3 bus

No bus	Tipe bus	Teg.	Sdt	Beban		Pembangkitan		Injeksi MVAR	Ket.
				P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)		
1	1	1.05	0	4	0.2	?	?	0	Swing bus
2	0	1.02	0	7.5	2.7	0	0	0	PQ bus
3	2	1.03	0	12.7	4.4	0.4	?	0	PV bus

Pada Tabel 4.5 dapat dijelaskan bahwa:

1. Pada bus 1 sebagai slack bus dengan tipe bus 1 diketahui magnitude tegangan sebesar 1.05 pu, sudut tegangan sebesar 0^0 , dengan data beban aktif (Pb1) sebesar 4 MW dan data beban reaktif (Qb1) sebesar 0.2 MVAR, sedangkan data daya pembangkit belum diketahui karena nilai ini akan diperoleh setelah perhitungan
2. Pada bus 2 sebagai bus beban (PQ bus) dengan tipe bus 0 diketahui magnitude tegangan sebesar 1.02 pu, sudut tegangan sebesar 0^0 , nilai ini merupakan nilai awal dalam perhitungan, seperti dijelaskan pada tipe bus sebelumnya bahwa magnitude tegangan dan sudut tegangan akan dihitung, sedangkan data beban aktif (Pb2) sebesar 7.5 MW dan data beban reaktif (Qb2) sebesar 2.7 MVAR, sedangkan data daya pembangkit tidak ada karena pada bus ini tidak ada Generator.
3. Pada bus 3 sebagai bus Generator (PV) dengan tipe bus 2 diketahui magnitude tegangan sebesar 1.03 pu, sudut tegangan 0^0 , nilai sudut tegangan sebagai nilai awal karena akan dihitung kemudian dalam iterasi, data beban aktif (Pb3) sebesar 12.7 MW dan data beban reaktif (Qb3) sebesar 4.4 MVAR, sedangkan data daya pembangkit hanya daya aktif (P3) yang diketahui sebesar 0.4 MW, sedangkan daya reaktif (Q3) dihitung setelah perhitungan iterasi selesai, seperti dijelaskan pada tipe bus PV.

Tabel 4.6 Data Penghantar

Bus		R (pu)	X (pu)	1/2B (pu)	Tipe (1 =saluran, >1, < 1 Trafo)	Keterangan
Ke	Dari					
1	2	0.02627	0.09440	0.00743	1	1 Saluran
1	3	0.03076	0.11023	0.01012	1	1 Saluran

Berdasarkan Tabel 4.6 dijelaskan bahwa impedansi saluran (Z) diperoleh berdasarkan hubungan bus dengan bus seperti dari bus 1 ke bus 2 adalah Z_{12} besarnya adalah $R_{12} + jX_{12}$ dan bus 1 ke bus 3 adalah Z_{13} besarnya adalah $R_{13} + jX_{13}$. Sedangkan Admitansi shunt (Y_s) yang terhubung ke tanah adalah admitansi shunt dari bus 1 ke bus 2 (Y_{s12}) dan admitansi shunt dari bus 1 ke bus 3 (Y_{s13})

1. Perhitungan aliran daya

Menghitung admitansi saluran dengan cara mengubah impedansi saluran, menggunakan persamaan:

$$y=1/Z$$

dari Tabel 4.5, nilai impedansi (Z) pada saluran diperoleh :

$$Z_{12} = 0.02627 + j0.0944$$

$$Z_{13} = 0.03076 + j0.11023$$

Maka

$$y_{12} = 1/Z_{12}$$

$$= 1/(0.02627 + j0.0944)$$

$$= 2.7387 - j9.8302$$

$$Y_{13} = 1/Z_{13}$$

$$y_{13} = 1/(0.03076 + j0.11023)$$

$$y_{13} = 2.3513 - j8.4150$$

$y_{23} = 0$, $y_{32} = 0$, karena tidak ada saluran yang terhubung dari bus 2 ke bus 3

Berdasarkan nilai admitansi saluran tersebut maka dibentuk matrix admitansi bus dengan cara:

1. Pada setiap bus atau simpul, dinyatakan sebagai admitansi diagonal (Y_{ii}) yaitu semua impedansi saluran yang terhubung ke bus di jumlahkan, misalnya $Y_{11} = y_{12} + y_{13}$
2. Untuk admitansi bukan diagonal (off diagonal) $Y_{ij} = -y_{ij}$ yaitu admitansi saluran (y_{ij})terhubung antara bus i dengan bus j, misalnya $Y_{12} = -y_{12}$

Dengan demikian maka Matrix admitansi dapat dihitung, sehingga diperoleh:

- a. Admitansi sendiri (Y_{ii}) yaitu admitansi yang terhubung ke bus i, yaitu bus 1 adalah Y_{11} , bus 2 adalah Y_{22} dan bus 3 adalah Y_{33} hasilnya berikut ini:

$$Y_{11} = y_{12} + y_{13} + y_{S12} + y_{S13}$$

$$Y_{11} = (2.7387 - j9.8302) + (2.3513 - j8.4150) + j0.00743 + j0.01012$$

$$Y_{11} = 5.0900 - j18.2250$$

$$Y_{22} = y_{21} + y_{23} + y_{S21}$$

$$= 2.7387 - j9.8302 + j0.00743$$

$$= 2.7387 - j9.8228$$

$$\begin{aligned} Y_{33} &= y_{31} + y_{32} + y_{S31} \\ &= 2.3513 - j8.4150 + j0.01012 \\ &= 2.3513 - j8.4049 \end{aligned}$$

b. Admitansi bersama (Y_{ij}) yaitu admitansi yang terhubung antara bus i dengan bus j . sehingga diperoleh Y_{12} , dan Y_{13} seperti berikut

$$\begin{aligned} Y_{12} &= -y_{12} \\ &= -(2.7387 - j9.8302) = -2.7387 + j9.8302 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{13} &= -y_{13} \\ &= -(2.3513 - j8.4150) = -2.3513 + j8.4150 \end{aligned}$$

$$Y_{21} = Y_{12}$$

$$Y_{23} = 0$$

$$Y_{31} = Y_{13}$$

$$Y_{32} = Y_{23}$$

Jadi Matrix admitansi bus adalah

$$Y = \begin{bmatrix} 5.0900 - 18.2250i & -2.7387 + 9.8302i & -2.3513 + 8.4150i \\ -2.7387 + 9.8302i & 2.7387 - 9.8228i & 0 \\ -2.3513 + 8.4150i & 0 & 2.3513 - 8.4049i \end{bmatrix}$$

Matrix Y tersebut dalam bentuk rectangular, maka dalam bentuk polar dituliskan seperti berikut:

$$Y = \begin{bmatrix} 18.9419 \angle -1.2987 & 10.2046 \angle 1.8425 & 8.7373 \angle 1.8433 \\ 10.2046 \angle 1.8425 & 10.2046 \angle -1.2991 & 0 \\ 8.7373 \angle 1.8433 & 0 & 8.7373 \angle -1.2983 \end{bmatrix}$$

Persamaan Aliran Daya

Berdasarkan data bus pada Tabel 4.5 dan data saluran pada Tabel 4.6 maka nilai daya yang diketahui adalah daya pada bus beban P_{b2} dan

Q_{b2} pada bus 2 disebut sebagai P_2 dan Q_2 dalam perhitungan sedangkan pada bus 3, daya aktif Generator P3 yang digunakan untuk perhitungan, sedangkan daya reaktif dihitung setelah perhitungan iterasi selesai dengan syarat bahwa perbedaan daya diketahui (data) dengan daya hasil perhitungan hasilnya lebih kecil atau sama dengan 0.0001 atau

$$|\Delta P| \leq 0.1$$

Untuk menghitung daya aktif digunakan persamaan (79) pada bab II:

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i), i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Menghitung nilai P_i hanya untuk bus PQ dan bus PV karena yang diketahui adalah daya aktif (P) pada kedua bus tersebut, sedangkan daya reaktif dihitung dengan persamaan (80) pada bab II:

$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i), i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Menghitung Q_i hanya untuk bus PQ karena daya reaktif yang diketahui hanya pada bus PQ, sedangkan daya reaktif pada PV bus dan swing bus dihitung setelah perhitungan iterasi selesai.

Nilai-nilai admitansi (Y_{ij}) yang digunakan berdasarkan matrix admitansi sebelumnya, yaitu nilai admitansi sendiri (Y_{ii}) sampai dengan Y_{jj} dan admitansi bersama (Y_{ij}) maupun sebaliknya Y_{ji} . Magnitude tegangan pada bus ke i (V_i) dan magnitude tegangan pada bus ke j (V_j), digunakan berdasarkan kode pada nilai admitansi, misalnya Y_{22} , maka V_2 dan V_2 yang digunakan demikian juga dengan sudut tegangan yang digunakan.

Dari 2 persamaan di atas yaitu P_i dan Q_i terdapat masing-masing 2 data yang tidak diketahui untuk bus PQ dan bus PV, demikian juga dengan swing bus, maka dilakukan perhitungan iterasi sehingga dibutuhkan nilai awal yaitu nilai magnitude tegangan dan sudut tegangan pada bus PQ, dan untuk bus PV pemberian nilai awal hanya sudut tegangan. Sedangkan nilai Q dihitung setelah perhitungan iterasi selesai. Demikian halnya dengan bus swing, nilai P dan Q yang belum diketahui sehingga nantinya dihitung setelah perhitungan iterasi selesai. Oleh karena itu maka dilakukan iterasi seperti berikut:

Iterasi pertama, $k=0$, menghitung besar daya aktif pada bus 2 ($P_{2 \text{ hitung}}$) dan bus 3 ($P_{3 \text{ hitung}}$):

$$\begin{aligned} P_{2\text{hit}} &= |V_2||V_1||Y_{21}|\cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2|Y_{22}|\cos(\theta_{22}) + |V_2||V_3||Y_{23}|\cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \\ &= (1.02 \times 1.05 \times 10.2046 \times \cos(1.8425 - 0 + 0)) + ((1.02)^2 \times \\ &\quad 10.2046 \times \cos(-1.2991)) + (1.02 \times 1.03 \times 0 \times \cos(0 - 0 + 0)) \\ &= -0.0838 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{3\text{hit}} &= |V_3||V_1||Y_{31}|\cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3||V_2||Y_{32}|\cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) + |V_3|^2|Y_{33}|\cos\theta_{33} \\ &= 1,03 \times 1,05 \times 8.7373 \times \cos(1.8433 - 0 + 0) + (1.03 \times 1.02 \times 0 \times \\ &\quad \cos(0 - 0 + 0) + ((1.03)^2 \times 8.7373 \times \cos(-1.2983)) \\ &= -0.0484 \end{aligned}$$

Menghitung daya reaktif pada bus 2 (bus PQ) yaitu $Q_{2\text{hitung}}$, sedangkan nilai daya reaktif pada bus 3 yaitu $Q_{3\text{hitung}}$, nantinya akan dihitung setelah perhitungan iterasi selesai, seperti dijelaskan pada tipe bus sebelumnya.

$$\begin{aligned}
Q_{2hit} &= -|V_2||V_1||Y_{21}|\sin(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2|^2|Y_{22}|\sin\theta_{22} - |V_2||V_3||Y_{23}|\sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \\
&= - (1.02 \times 1.05 \times 10.2046 \times \sin(1.8425 - 0 + 0)) - ((1.02)^2 \times \\
&\quad 10.2046 \times \sin(-1.2991)) - (1.02 \times 1.03 \times 0 \times \sin(0 - 0 + 0)) \\
&= - 0.3008
\end{aligned}$$

Dari Tabel 4.5 nilai daya dalam MW ataupun MVAR dikonversi dalam bentuk perunit dengan membagi daya dasar sebesar 100 MVA maka diperoleh

$$P = \frac{P \text{ data}}{\text{Daya dasar}} \text{ dalam perunit}$$

$$Q = \frac{Q \text{ data}}{\text{Daya dasar}} \text{ dalam perunit}$$

Untuk daya aktif beban (P_{b2}) dan daya reaktif beban (Q_{b2}) pada bus beban (PQ bus) diperoleh nilai dalam perunit berikut:

$$\begin{aligned}
P_{b2} &= \frac{7.5}{100} \\
&= 0.075 \text{ pu}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{b2} &= \frac{2.7}{100} \\
&= 0.027 \text{ pu}
\end{aligned}$$

Untuk daya aktif pada Generator (P_{g3}) pada bus Generator (PV bus), sedangkan daya reaktif Generator (Q_{g3}) tidak diketahui karena itu nanti dihitung setelah perhitungan iterasi selesai.

$$\begin{aligned}
P_{g3} &= \frac{0.4}{100} \\
&= 0.0004 \text{ pu}
\end{aligned}$$

Selanjutnya menghitung perbedaan daya antara hasil perhitungan dengan data daya maka diperoleh:

$$\Delta P = P_{data} - P_{hitung}$$

$$\begin{aligned}
&= (P_{b2} - P_{2hit}) \\
&= (-0.075 - (-0.0838)) \\
&= 0.0088
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta P3 &= (P_{g3} - P_{3hit}) \\
&= (0.0004 - (-0.0484)) \\
&= 0.0524
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta Q2 &= (Q_{b2} - Q_2) \\
&= (-0.027 - (-0.3008)) \\
&= 0.2738
\end{aligned}$$

belum bisa dihitung karena nilai Q3 data tidak ada, nilai Q3 dapat dihitung setelah proses iterasi selesai demikian pula nilai Q1 dan P1

Oleh karena perbedaan daya diatas belum memenuhi nilai epsilon ($\varepsilon \leq 0.0001$) maka perhitungan iterasi dilakukan dengan menghitung Jacobian.

A. Menghitung Matrix Jacobian

$$\begin{aligned}
J_1 &= \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = |V_2||V_1||Y_{21}|\sin(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2||V_3||Y_{23}|\sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \\
&= (1.02 \times 1.05 \times 10.2046 \times \sin(1.8425 - 0 + 0)) + (1.02 \times 1.03 \times 0 \times \\
&\quad \sin(0 - 0 + 0)) \\
&= 10.5281
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_2 &= \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -|V_2||V_3||Y_{23}|\sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \\
&= -(1.02 \times 1.03 \times 0 \times \sin(0 - 0 + 0))
\end{aligned}$$

$$= 0$$

$$\begin{aligned} J_3 &= \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} = |V_1||Y_{21}|\cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + 2|V_2||Y_{22}|\cos(\theta_{22}) + |V_3||Y_{23}|\cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \\ &= |V_2||V_1||Y_{21}|\cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2|Y_{22}|\cos(\theta_{22}) + |V_2||V_3||Y_{23}|\cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \\ &= (1.05 \times 10.2046 \times \cos(1.8425 - 0 + 0)) + (2 \times (1.02) \times \\ &\quad 10.2046 \times \cos(-1.2991)) + (1.03 \times 0 \times \cos(0 - 0 + 0)) \\ &= 2.7113 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_4 &= \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = -|V_3||V_2||Y_{32}|\sin(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \\ &= - (1.03 \times 1.02 \times 0 \times \sin(0 - 0 + 0)) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_5 &= \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} = |V_3||V_1||Y_{31}|\sin(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3||V_2||Y_{32}|\sin(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \\ &= 1.03 \times 1.05 \times 8.7373 \times \sin(1.8433 - 0 + 0) + 1.03 \times 1.02 \\ &\quad \times 0 \times \sin(0 - 0 + 0) \\ &= 9.1008 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_6 &= \frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} = |V_3||Y_{32}|\cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \\ &= 1.03 \times 0 \times \cos(0 - 0 + 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_7 &= \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = |V_2||V_1||Y_{21}|\cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2||V_3||Y_{23}|\sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \\ &= 1.02 \times 1.05 \times 10.2046 \times \cos(1.8425 - 0 + 0) + (1.02 \times \\ &\quad 1.03 \times 0 \times \cos(0 - 0 + 0)) \end{aligned}$$

$$= -2.9331$$

$$\begin{aligned} J_8 &= \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} = -|V_2||V_3||Y_{23}|\cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \\ &= -(1.02 \times 1.03 \times 0 \times \cos(0 - 0 + 0)) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$J_9$$

$$=$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} &= -|V_1||Y_{21}|\sin(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - 2|V_2||Y_{22}|\sin(\theta_{22}) - |V_3||Y_{23}|\sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \\ &= - (1.05 \times 10.2046 \times \sin(1.8425 - 0 + 0)) - 2(1.02) \times \\ & 10.2046 \times \sin(-1.2991) - 1.03 \times 0 \times \sin(0 - 0 + 0)) \\ &= 9.7319 \end{aligned}$$

dalam bentuk matrix dapat dituliskan:

$$[J] = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & J_3 \\ J_4 & J_5 & J_6 \\ J_7 & J_8 & J_9 \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} 10.5281 & 0 & 2.7113 \\ 0 & 9.1008 & 0 \\ -2.9331 & 0 & 9.7319 \end{bmatrix}$$

B. Menghitung perubahan tegangan (ΔV) dan perubahan sudut tegangan

($\Delta \delta$) yang dihitung dengan persamaan:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

untuk menghitung $\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$, digunakan metode penyelesaian sistem

persamaan linier sehingga diperoleh:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0.0088 \\ 0.524 \\ 0.2738 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10.5281 & 0 \\ 0 & 9.1008 \\ -2.9331 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix}$$

sehingga dihitung sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10.5281 & 0 & 2.9331 \\ 0 & 9.1008 & 0 \\ -2.9331 & 0 & 9.1008 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -2.86 \\ 1.4384 \\ -0.218 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0881 & 0 & -0.0246 \\ 0 & 0.1099 & 0 \\ 0.0266 & 0 & 0.00954 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2.86 \\ 1.4384 \\ -0.218 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0059 \\ 0.0058 \\ 0.0263 \end{bmatrix}$$

Dengan demikian nilai tegangan yang baru dan nilai sudut tegangan baru sebagai berikut:

$$V_i^{k+1} = V_i^k + \Delta V_i^k$$

$$V_2^1 = V_2^0 + \Delta V_2^0$$

$$V_2^1 = 1.02 + 0.0263$$

$$V_2^1 = 1.0463 \text{ pu}$$

$$\delta_i^{k+1} = \delta_i^k + \Delta\delta_i^k$$

$$\delta_2^1 = 0 + (-0.0059)$$

$$\delta_2^1 = -0.0059$$

$$\delta_3^1 = 0 + 0.0058$$

$$\delta_3^1 = 0.0058$$

Dengan cara yang sama untuk iterasi ke dua k =1 dan selanjutnya dituliskan dalam bentuk Tabel 4.9, Tabel 4.10, Tabel 4.11, Tabel 4.12

Tabel 4.7 Perhitungan untuk iterasi pertama k=0

No Bus	V (pu)	δ	P ^{dik} (pu)	Q ^{dik} (pu)	P ^{hit} (pu)	Q ^{hit} (pu)
1	1.05	0.0	-	-	-	-
2	1.02	0.0	-0.075	-0.027	-0.0838	-0.3008
3	1.03	0.0	0.0004	-	-0.0484	-

Tabel 4.8 Lanjutan table 4.7 Perhitungan untuk iterasi pertama k=0

No Bus	ΔP	ΔQ	$\Delta\delta$	δ^{hit}	$\Delta V $	V^{hit}
1	-	-	-	-	-	-
2	0.0088	0.2738	-0.0059	-0.0059	0.0263	1.0463
3	0.524	-	0.0058	0.0058	-	-

Tabel 4.9 Perhitungan untuk iterasi kedua k=1

No Bus	V (pu)	δ	P ^{dik} (pu)	Q ^{dik} (pu)	P ^{hit}	Q ^{hit}
1	1.05	0.0	-	-	-	-
2	1.0463	-0.0059	-0.075	-0.027	-0.0747	-0.0195
3	1.03	0.0058	0.0004	-	0.004	-

Tabel 4.10 Lanjutan Tabel 4.9 Perhitungan untuk iterasi kedua k=1

No Bus	ΔP	ΔQ	$\Delta \delta$	δ^{hit}	$\Delta V $	V^{hit}
1	-	-	-	-	-	-
2	-0.0003	-0.0075	-0.1458×10^{-3}	-0.0058	-0.6843×10^{-3}	1.0457
3	-0.0000	-	-0.0046×10^{-3}	0.0058	-	-

Tabel 4.11 Perhitungan untuk iterasi tiga k=2

No Bus	$ V $ (pu)	δ	P^{dik} (pu)	Q^{dik} (pu)	P^{hit}	Q^{hit}
1	1.05	0.0	-	-	-	-
2	1.046	-0.343	-0.075	-0.027	-0.075	-0.027
3	1.03	-0.470	0.0004	-	0.004	-

Tabel 4.12 Lanjutan Tabel 4.11 Perhitungan untuk iterasi ketiga k=2

No Bus	ΔP	ΔQ	$\Delta \delta$	δ^{hit}	$\Delta V $	V^{hit}
1	-	-	-	-	-	-
2	-0.00284×10^{-5}	-0.4996×10^{-5}	0.0927×10^{-6}	-0.3429	-0.4596×10^{-5}	1.0457
3	-0.000000	-	-0.000000	-0.047	-	-

Dari Tabel 4.12 terlihat bahwa penyelesaian aliran daya untuk sistem 3 bus dapat diselesaikan sampai tiga kali (3x) iterasi dengan melihat perbedaan daya yang ada sebesar 0.0001pu. nilai ini sama penggunaannya dalam simulasi.

Dengan demikian maka perhitungan dilanjutkan untuk menghitung daya aktif dan daya reaktif dari bus penadah (swing bus) dan daya reaktif untuk bus tegangan (PV bus) dengan menggunakan nilai hasil

perhitungan tegangan dan sudut tegangan pada bus yang berhubungan hal tersebut, hasilnya diperoleh sebagai berikut:

Untuk swing bus

$$\begin{aligned}
 P_{1hit} &= |V_1||V_2||Y_{12}|\cos(\theta_{12} - \delta_1 + \delta_2) + |V_1|^2|Y_{11}|\cos(\theta_{11}) + |V_1||V_3||Y_{13}|\cos(\theta_{13} - \delta_1 + \delta_3) \\
 &= (1.05 \times 1.046 \times 10.2046 \times \cos(1.8425 - 0 - 0.343)) + \\
 &\quad ((1.05)^2 \times 18.0419 \times \cos(-1.2987)) + (1.05 \times 1.03 \times \\
 &\quad 8.7373 \times \cos(1.8433 - 0 - 0.470)) \\
 &= 0.23925 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{1hit} &= -|V_1||V_2||Y_{12}|\sin(\theta_{12} - \delta_1 + \delta_2) - |V_1|^2|Y_{11}|\sin\theta_{11} - |V_1||V_3||Y_{13}|\sin(\theta_{13} - \delta_1 + \delta_3) \\
 &= - (1.05 \times 1.046 \times 10.2046 \times \sin(1.8425 - 0 - 0.343)) - \\
 &\quad ((1.05)^2 \times 18.9419 \times \sin(-1.2987)) - (1.05 \times 1.03 \times \\
 &\quad 8.7373 \times \sin(1.8433 - 0 - 0.470)) \\
 &= 0.15823 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

Untuk PV bus:

$$\begin{aligned}
 Q_{3hit} &= - \\
 &|V_3||V_1||Y_{31}|\sin(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) - |V_3|^2|Y_{33}|\sin\theta_{33} - |V_3||V_2||Y_{32}|\sin(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \\
 &= - (1.03 \times 1.05 \times 8.7373 \times \sin(1.8433 + 0.470 + 0)) - \\
 &\quad ((1.03)^2 \times \\
 &\quad 8.7373 \times \sin(-1.2983)) - (1.03 \times 1.046 \times 0 \times \sin(0 - \\
 &\quad 0 + 0)) \\
 &= -0.11896 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan penjelasan pada tipe bus sebelumnya, data daya untuk swing bus belum diketahui Karen berfungsi untuk mensuplai rugi-rugi daya, olehnya itu dihitung setelah prose iterasi selesai. Dengan demikian maka perubahan daya untuk swing bus tidak dihitung yaitu demikian halnya untuk PV bus, dijelaskan bahwa daya reaktif Q3 pada bus ini belum diketahui sehingga nilainya dapat diperoleh setelah perhitungan iterasi selesai, dengan demikian perubahan daya reaktif pada bus ini tidak dihitung yaitu

Perhitungan Transient

Berdasarkan single line diagram suselbar, terdapat dua Generator di Bakaru dengan kapasitas yang sama maka nilai $X'd$ dihitung parallel

$$=0.38262/2$$

$$=0.19143 \text{ pu}$$

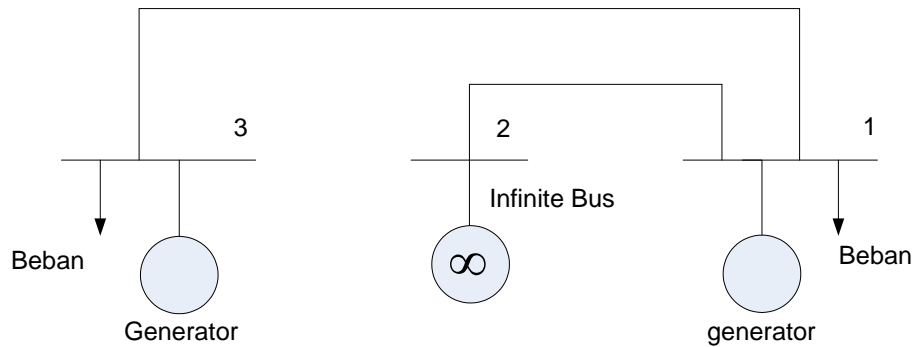
$$=0.19 \text{ pu}$$

Demikian halnya dengan Generator di Pinrang hanya satu yaitu PLTM maka diasumsikan sama dengan PLTA sehingga nilai $X'd = 0.38262 \text{ pu}$ atau 0.38

Data-data untuk perhitungan Transient

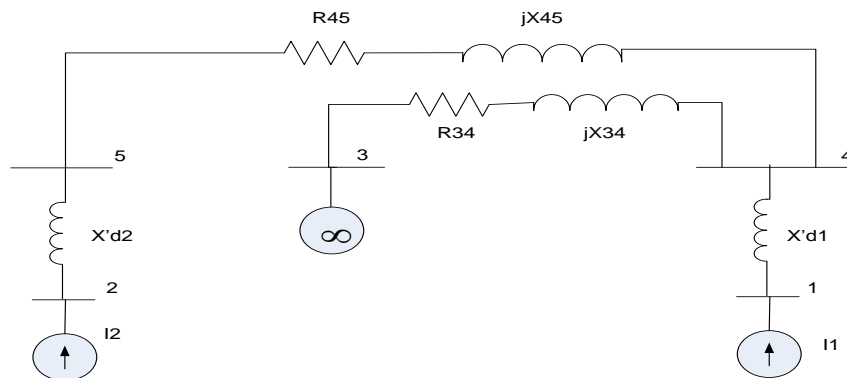
Berdasarkan gambar 4.2 sebelumnya maka dalam perhitungan transient dijelaskan bahwa bus 1 adalah swing bus, bus 2 adalah bus beban (PQ bus) yang dinyatakan sebagai *infined bus* dan bus 3 adalah

bus Generator (PV bus). Dengan demikian maka pada gambar 4.2 dapat digambarkan seperti berikut:



Gambar 4.3 Single line sistem 3 bus

Pada gambar 4.3 terlihat bahwa impedansi saluran terdiri dari komponen resistansi dan reaktansi. Sedangkan Generator memiliki impedansi internal ($R_a + jX'd$), oleh karena nilai Resistansi armature (R_a) sangat kecil maka diabaikan, dengan demikian maka gambar 4.3 dapat digambarkan seperti berikut.



Gambar 4.4 Model sistem berdasarkan Tabel 4.13 dan Tabel 4.6

Tabel 4.13 Data reaktansi transien dan momen inersia dari Generator

No Bus	R_a	$X'd$	H
1	0	0.19	2.9
2	0	0.38	2.9

Tabel 4.14 Tabel impedansi pada saluran

Bus		R (pu)	X (pu)	1/2B (pu)
Ke	Dari			
3	4	0.02627	0.09440	0.00743
4	5	0.03076	0.11023	0.01012

Tabel 4.15 Data hasil perhitungan aliran daya

No Bus	Tegangan	Beban		Pembangkitan	
		P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q (MVAR)
1	1.05∠0	4	0.2	23.925	15.823
2	1.0457∠ - 0.343	7.5	2.7	0.0	0.0
3	1.03∠ - 0.470	12.7	4.4	0.4	-11.896

Pada Tabel 4.15 jumlah bus yang ada hanya 3 karena pada aliran daya tidak memperhitungkan reaktansi transien Generator sehingga bus 1 pada aliran daya sama dengan bus 4 pada perhitungan transient, bus 2 pada aliran daya sama dengan bus 3 pada perhitungan transient dan bus 3 pada aliran daya sama dengan bus 5 pada perhitungan transient.

Tabel 4.16 Hasil Simulasi untuk sistem 3 bus

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method
 Maximum Power Mismatch = 5.6058e-006
 No. of Iterations = 3

No Bus	Tegangan	Beban		Pembangkitan	
		P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q (MVAR)
1	1.05∠0	4	0.2	23.925	15.823
2	1.0457∠ - 0.343	7.5	2.7	0.0	0.0
3	1.03∠ - 0.470	12.7	4.4	0.4	-11.896

Nilai magnitude tegangan dan sudut tegangan dalam Tabel 4.15 yaitu no bus 2 yang tidak digunakan dalam analisis transient karena pada analisis transient, bus beban (PQ bus) yaitu bus 2 dikategorikan sebagai bus tak hingga (*infinite bus*) sehingga magnitude tegangan diasumsikan sama dengan 1.0 pu dengan sudut tegangan 0^0 , selanjutnya nilai daya aktif dan daya reaktif beban diubah nantinya menjadi admitansi konstan (*Cekin Cemas, 2007*).

2. Menghitung arus yang mengalir dari bus Generator

Berdasarkan hasil perhitungan aliran daya sebelumnya maka dilakukan perhitungan arus yang mengalir ke jala-jala pada bus 1 dan bus 2 untuk mendapatkan tegangan dalam peralihan dan kurva ayuna, sedangkan arus dari bus tidak ada karena bus 2 adalah bus beban tidak memiliki sumber arus.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{(P_1 + jQ_1)^*}{V_1^*} \\
 &= \frac{0.23925 - j0.15,823}{1.05 \angle 0} \\
 &= 0.2197 \angle -71.7631 \\
 I_2 &= \frac{(P_2 + jQ_2)^*}{V_2^*} \\
 &= \frac{0.004 + j0.11986}{1.03 \angle 0.470} \\
 &= 0.824 \angle 88.7801
 \end{aligned}$$

Tabel 4.17 Perbandingan nilai arus hasil analitik dengan simulasi

	Hasil Analitik	Hasil simulasi
<i>I1 (pu)</i>	0.2197∠ - 71.7631	0.21968923∠ - 71.76306372
<i>I2 (pu)</i>	0.824∠88.7801	0.823712671∠88.780125643

3. Menghitung nilai Tegangan peralihan

Berdasarkan nilai arus pada urutan ke 2 maka tegangan peralihan (transient) dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 E'1 &= V1 + (X' d1xI1) \\
 &= 1.05\angle 0 + (j0.19x0.2197\angle - 71.7631) \\
 &= 1.07847\angle 1.8042)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E'2 &= V2 + (X' d2xI2) \\
 &= 1.03\angle 1.0457 + (j0.38x0.824\angle 88.7801) \\
 &= 1.03997\angle - 1.8485)
 \end{aligned}$$

Untuk unfinite bus

Kondisi awal:

Tabel 4.18 Hasil perbandingan secara analitik dan simulasi untuk tegangan peralihan dan sudut rotor

Hasil Analitik			Hasil simulasi		
E'1		$d1^0$	E'2		$d2^0$
Pu	volt		Pu	Volt	
1.07847	107.847	1.81042	1.0789	107.89	1.8105

1.03997	103.997	-1.8485	1.0369	103.69	-1.849
---------	---------	---------	--------	--------	--------

Pada Tabel 4.18 menunjukkan perbandingan hasil analitik dengan hasil simulasi terdapat perbedaan, hal ini disebabkan oleh adanya pembulatan pada perhitungan analitik, sehingga nilainya tidak sama dalam simulasi.

4. Membentuk Matix admitansi bus sebelum gangguan

Matrik admitansi setelah perhitungan load flow dihitung kembali dengan memperhitungkan reaktansi transien dari Generator dan semua beban diubah menjadi admitansi konstan.

Berdasarkan data pada Tabel 4.13, Tabel 4.14 dan Tabel 4.15 serta disesuaikan dengan 4.4 di atas maka admitansi sebelum gangguan dihitung dengan memasukkan nilai reaktansi transien Generator berikut ini:

$$Z_{14} = X'_{d1} = j0.19 \text{ pu}$$

$$Z_{25} = X'_{d3} = j0.39 \text{ pu}$$

$$y_{34} = 1/z_{34}$$

$$y_{35} = y_{53} = y_{15} = y_{51} = 0$$

$$y_{13} = y_{31} = y_{23} = y_{32} = 0$$

$$y_{12} = y_{21} = y_{24} = y_{42} = 0$$

Mengubah data daya beban ($P_i - jQ_i$) menjadi admitansi konstan (Y_{beban})

$$\begin{aligned}
 &= \frac{0.04 - j0.002}{1.05^2} \\
 &= 0.0363 \angle -2.8624 \\
 Y_{beban5} &= \frac{P_5 - jQ_5}{V_5^2} \\
 &= \frac{0.127 - j0.044}{1.03^2}
 \end{aligned}$$

$$= 0.1267 \angle -19.109$$

Dengan cara yang sama saat menghitung matrik admitansi pada perhitungan aliran daya, maka matrix admitansi sebelum gangguan adalah

$$Y_{11} = \frac{1}{X'd1}$$

$$Y_{11} = \frac{1}{j0.19}$$

$$= 5.26316 \angle -90$$

$$Y_{14} = -\frac{1}{X'd1}$$

$$Y_{12} = Y_{13} = Y_{15} = 0$$

$$Y_{14} = -\frac{1}{j0.19}$$

$$= 5.26316 \angle 90$$

$$Y_{21} = Y_{12}$$

$$Y_{22} = \frac{1}{X'd3}$$

$$= \frac{1}{0.38} = 2.6316 \angle -90$$

$$Y_{23} = Y_{24} = 0$$

$$Y_{23} = 0$$

$$Y_{23} = -\frac{1}{X'd3}$$

$$= -\frac{1}{0.38} = 2.6316 \angle 90$$

$$Y_{31} = Y_{32} = Y_{35} = 0$$

$$Y_{33} = \frac{1}{Z_{34}} + \frac{Y_{s45}}{2}$$

$$Y_{33} = 2.7387 - j9.8302 + 0.00743$$

$$= 2.7387 -$$

$$= 8.7284\angle -74.39$$

$$Y_{34} = -\frac{1}{Z_{34}} = -2.3513 + j8.4150$$

$$= 8.7381\angle 105.592$$

$$Y_{41} = Y_{14}$$

$$Y_{42} = 0$$

$$Y_{43} = -\frac{1}{Z_{34}} = -2.3513 + j8.4150$$

$$= 8.7381\angle 105.592$$

$$Y_{44} = \frac{1}{Z_{45}} + \frac{1}{Z_{43}} + Y_{beban4} + Y_{s45} + Y_{s43}$$

$$Y_{44} = 2.7387 - j9.8302 + 2.3513 - j8.415 + 0.0363\angle -2.8624 + j0.00743 + j0.01012$$

$$Y_{44} = 24.04738\angle -77.705$$

$$Y_{45} = -\frac{1}{Z_{45}} = -2.7387 + j9.8302$$

$$= 10.2054\angle 105.551$$

$$Y_{51} = Y_{53} = 0$$

$$Y_{52} = Y_{25}$$

$$Y_{54} = Y_{45}$$

$$Y_{55} = \frac{1}{Z_{45}} + \frac{1}{Z_{35}} + \frac{(P_{l5} - jQ_{l5})}{|V_5|^2} + \frac{Y_{s45}}{2}$$

$$Y_{55} = 2.3513 - j8.415 + 0 + 0.1267\angle -19.109 + j0.01012$$

$$Y_{55} = 12.73084\angle -78.1584$$

$$Y_{bf} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 5.26316\angle -90 & 0 & 0 & 5.26316\angle 90 & 0 \\ 0 & 5.26316\angle -90 & 0 & 0 & 2.6316\angle 90 \\ 0 & 0 & 8.7284\angle -74.39 & 8.77381\angle 105.592 & 0 \\ 5.26316\angle 90 & 0 & 8.77381\angle 105.592 & 24.04738\angle -77.705 & 10.2054\angle 105.551 \\ 0 & 2.6316\angle 90 & 0 & 10.2054\angle 105.551 & 12.73084\angle -78.1584 \end{bmatrix}$$

Matrix admitansi sebelum gangguan di atas kemudian di reduksi sampai mendapatkan ukuran matrix sama dengan jumlah Generator sebagai berikut:

$$Y_{bus}^{red} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_{nn}^{-1} Y_{nm}$$

Dengan

m = baris ke i

n = kolom ke i

$i = 1, 2, 3, 4, \dots, n_{bus}$

t = transpose matriks

-1 dinyatakan sebagai kebalikan atau invers suatu matrik

Proses Reduksi I

Reduksi I adalah mengubah ukuran 5x5 dari matrix Y_{af} di atas menjadi ukuran 4x4 dengan menggunakan persamaan 84 pada bab II sebelumnya berikut:

$$Y_{bus}^{red} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_{nn}^{-1} Y_{nm}$$

Menentukan Y_{mm} , Y_{nm} dan Y_{nn}

Matrix Y_{mm} diperoleh dengan memenggal matrix awal yaitu kolom paling kanan dan baris paling bawah. Hasil pemenggalan tersebut dijadikan matrix Y_{nm} dan Y'_{nm} . Sedangkan matrix Y_{nn} merupakan nilai diagonal dari matrik paling bawah yang akan direduksi. Berikut ini cara pemenggalan atau reduksi matrik berdasarkan matrix Y_{bf} sebelumnya

$$Y_1 = Y_{mm} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}$$

$$Y_2 = Y_{nm} = \begin{bmatrix} Y_{15} \\ Y_{25} \\ Y_{35} \\ Y_{45} \end{bmatrix}$$

Matrix Y_{nm} diperoleh dengan

$$Y_3 = Y_{nm}^t = [Y_{51} \ Y_{52} \ Y_{53} \ Y_{54}]$$

$$Y_4 = Y_{nn} = Y_{55}$$

$$Y_{r1} = Y_1 - Y_2 * 1/Y_4 * Y_3$$

$$Y_1 = \begin{bmatrix} 5.26316 \angle -90 & 0 & 0 & 5.26316 \angle 90 \\ 0 & 5.26316 \angle -90 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8.7284 \angle -74.39 & 8.77381 \angle 105.592 \\ 5.26316 \angle 90 & 0 & 8.77381 \angle 105.592 & 24.04738 \angle -77.705 \end{bmatrix}$$

$$Y_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.6316 \angle 90 \\ 0 \\ 10.2054 \angle 105.551 \end{bmatrix}$$

$$Y_3 = [0 \ 2.6316 \angle 90 \ 0 \ 10.2054 \angle 105.551]$$

$$Y_4 = [12.73084 \angle -78.1584]$$

Dengan menggunakan $Y_{r1} = Y_1 - Y_2 \times (1/Y_4) \times Y_3$ maka diperoleh hasil reduksi untuk Matrix admitansi bus sebelum gangguan pada proses reduksi I adalah

$$Y_{r1} = \begin{bmatrix} 5.26316\angle -90 & 0 & 0 & 5.26316\angle 90 \\ 0 & 2.10215\angle -86.96 & 0 & 2.1095\angle 93.71 \\ 0 & 0 & 8.7284\angle -74.39 & 8.7381\angle 105.592 \\ 5.26316\angle 90 & 2.1095\angle 93.71 & 8.7381\angle 105.592 & 15.9576\angle -81.27 \end{bmatrix}$$

Proses Reduksi II

Reduksi II adalah mengubah ukuran 4x4 dari matrix Y_{af} yaitu matrik Y_{r1} di atas menjadi ukuran 3x3 dengan cara yang sama pada proses reduksi

I maka diperoleh dengan cara:

Menentukan Y_{mm} , Y_{nm} dan Y_{nn} dari matrik Y_{r1} di atas

$$Y1 = Y_{mm} = \begin{bmatrix} Y11 & Y12 & Y13 \\ Y21 & Y22 & Y23 \\ Y31 & Y32 & Y33 \end{bmatrix}$$

$$Y2 = Y_{nm} = \begin{bmatrix} Y14 \\ Y24 \\ Y34 \end{bmatrix}$$

$$Y3 = Y_{nm}^t = [Y41 \ Y42 \ Y43]$$

$$Y4 = Y_{nn} = Y44$$

$$Y_{r2} = Y1 - Y2 * 1/Y4 * Y3$$

$$Y1 = \begin{bmatrix} 5.26316\angle -90 & 0 & 0 \\ 0 & 2.10215\angle -86.96 & 0 \\ 0 & 0 & 8.7284\angle -74.39 \end{bmatrix}$$

$$Y2 = \begin{bmatrix} 5.26316\angle 90 \\ 2.1095\angle 93.71 \\ 8.7381\angle 105.592 \end{bmatrix}$$

$$Y3 = [5.26316\angle 90 \ 2.1095\angle 93.71 \ 8.7381\angle 105.592]$$

$$Y4 = [15.9576\angle -81.27]$$

Dengan menggunakan $Y_{r2} = Y1 - Y2 \times (1/Y4) \times Y3$ maka diperoleh hasil reduksi untuk Matrix admitansi bus sebelum gangguan pada proses reduksi II adalah

$$Y_{r2} = \begin{bmatrix} 3.5572\angle -1.497 & 0.6958\angle 1.483 & 2.8820\angle 1.691 \\ 0.6958\angle 1.483 & 1.8242\angle -86.96 & 1.1552\angle 1.756 \\ 2.8820\angle 1.691 & 1.1552\angle 1.756 & 4.0183\angle -74.39 \end{bmatrix}$$

Proses Reduksi III

Reduksi II adalah mengubah ukuran 3x3 dari matrix Y_{af} yaitu matrik Y_{r2} di atas menjadi ukuran 2x2 dengan cara yang sama pada proses reduksi

I maka diperoleh dengan cara:

Menentukan Y_{mm} , Y_{nm} dan Y_{nn} dari matrik Y_{r2} di atas

$$Y_1 = Y_{mm} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

$$Y_2 = Y_{nm} = \begin{bmatrix} Y_{13} \\ Y_{23} \end{bmatrix}$$

$$Y_3 = Y_{nm}^t = [Y_{31} \ Y_{32}]$$

$$Y_4 = Y_{nn} = Y_{33}$$

$$Y_{r2} = Y_1 - Y_2 * 1/Y_4 * Y_3$$

$$Y_1 = \begin{bmatrix} 3.5572\angle -1.497 & 0.6958\angle 1.483 \\ 0.6958\angle 1.483 & 1.8242\angle -86.96 \end{bmatrix}$$

$$Y_2 = \begin{bmatrix} 2.8820\angle 1.691 \\ 1.1552\angle 1.756 \end{bmatrix}$$

$$Y_3 = [2.8820\angle 1.691 \quad 1.1552\angle 1.756]$$

$$Y_4 = [4.0183\angle -74.39]$$

Dengan menggunakan $Y_{r3} = Y_1 - Y_2 \times (1/Y_4) \times Y_3$ maka diperoleh hasil reduksi untuk Matrix admitansi bus sebelum gangguan pada proses reduksi III (Y_{r3}) adalah

$$Y_{r3} = \begin{bmatrix} 1.5287\angle -83.99 & 1.4943\angle 90.44 \\ 1.4943\angle 90.44 & 1.5106\angle -86.81 \end{bmatrix}$$

Jadi admitansi bus sebelum gangguan setelah direduksi adalah

$$Y_{bf}^{red} = \begin{bmatrix} 1.5287\angle -83.99 & 1.4943\angle 90.44 \\ 1.4943\angle 90.44 & 1.5106\angle -86.81 \end{bmatrix}$$

Hasil simulasi untuk matrix sebelum gangguan adalah

$$Y_{bf} = \begin{bmatrix} 1.52877654\angle -83.994346 & 1.4943321\angle 90.43919834 \\ 1.4943321\angle 90.43919834 & 1.5106234\angle -86.808120 \end{bmatrix}$$

Pada matrix impedansi sebelum gangguan dengan analitik memiliki perbedaan yang cukup kecil jika dibandingkan dengan hasil simulasi, hal ini terjadi karena pada analitik terdapat pembulatan.

5. Membentuk Matrix admitansi bus selama gangguan

Membentuk Matrix admitansi bus selama gangguan, dimisalkan gangguan pada bus 3, maka saluran 3-4 terhubung ke tanah, berarti baris 3 dan kolom 3 pada matrik admitansi sebelum gangguan yang belum direduksi menjadi nol sehingga diperoleh matrix admitansi selama gangguan sebelum direduksi adalah:

$$Y_{df} = \begin{bmatrix} 5.26316\angle -90 & 0 & 0 & 5.26316\angle 90 & 0 \\ 0 & 5.26316\angle -90 & 0 & 0 & 2.6316\angle 90 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5.26316\angle 90 & 0 & 0 & 24.04738\angle -77.705 & 10.2054\angle 105.551 \\ 0 & 2.6316\angle 90 & 0 & 10.2054\angle 105.551 & 12.73084\angle -78.1584 \end{bmatrix}$$

Dengan mereduksi matrix admitansi (Y_{df}) selama gangguan maka dilakukan dengan cara yang sama pada proses reduksi sebelum gangguan maka diperoleh hasil reduksi berikut:

$$Y_{df}^{red} = \begin{bmatrix} 3.5572\angle -85.75 & 0.696\angle 84.98 \\ 0.696\angle 84.98 & 1.8242\angle -86.29 \end{bmatrix}$$

Hasil simulasi untuk matrix selama gangguan adalah

$$Y_{df}^{red} = \begin{bmatrix} 3.557151\angle -85.751697 & 0.695774\angle 84.978165 \\ 0.695774\angle 84.978165 & 1.8242022\angle -86.290775 \end{bmatrix}$$

Pada matrix impedansi selama gangguan dengan analitik memiliki perbedaan yang cukup kecil jika dibandingkan dengan hasil simulasi, hal ini terjadi karena pada analitik terdapat pembulatan.

Dengan menggunakan nilai admitansi selama gangguan maka persamaan sudut daya perunit selama gangguan dapat dihitung sebagai berikut:

$$E'1 = 1.07847 \angle 1.8042)$$

$$E'2 = 1.03997 \angle -1.8485)$$

Tabel 4.18a Perbandingan Daya mekanik hasil simulasi dan analitik

	Hasil Analitik	Hasil simulasi
E'_1	$1.07847 \angle 1.8042$	$1.0789 \angle 1.9152$
E'_2	$1.03997 \angle -1.8485$	$1.0369 \angle -1.8485$

karena pada bus beban yang dinyatakan sebagai bus 3 sebelumnya mengalami gangguan maka bus yang ada sisa bus 1 dan bus 2, dengan demikian tegangan peralihan pada bus 2 adalah $E'2$ demikian juga dengan admitansinya.

$$Pe2 = 0$$

$$\begin{aligned} Pe1 &= |E'1|^2 |Y11| \cos(\theta11) + |E'1| |E'2| |Y12| \cos(\theta12 - \delta1 + \delta2) \\ &= |1.07847|^2 |3.557151| \cos(-85.751697) + |1.07847| |1.03997| \\ &\quad \times 0.695774 \cos(84.978165 - 1.8042 - 1.8485) \\ &= -8.9834 \end{aligned}$$

6. Membentuk Matrix admitansi setelah gangguan

Apabila gangguan di bus 3 di putuskan, maka saluran 3-4 dihilangkan. Dengan demikian maka matrix admitansi sebelum gangguan berubah

khususnya elemen-elemen yang berhubungan dengan saluran 3-4, dengan demikian maka matrix admitansi sebelum gangguan yang baru akibat saluran 3-4 diputuskan adalah:

$$Y_{11} = \frac{1}{X'd_1}$$

$$Y_{11} = \frac{1}{j0.19}$$

$$= 5.26316 \angle -90$$

$$Y_{14} = -\frac{1}{X'd_1}$$

$$Y_{12} = Y_{13} = Y_{15} = 0$$

$$Y_{14} = -\frac{1}{j0.19}$$

$$= 5.26316 \angle 90$$

$$Y_{21} = Y_{12}$$

$$Y_{22} = \frac{1}{X'd_3}$$

$$= \frac{1}{0.38} = 2.6316 \angle -90$$

$$Y_{23} = Y_{24} = 0$$

$$Y_{23} = 0$$

$$Y_{23} = -\frac{1}{X'd_3}$$

$$= -\frac{1}{0.38} = 2.6316 \angle 90$$

$$Y_{31} = Y_{32} = Y_{35} = 0$$

$$Y_{33} = 0$$

$$Y_{34} = 0$$

$$Y_{41} = Y_{14}$$

$$Y_{42} = 0$$

$$Y_{43} = 0$$

$$Y_{44} = \frac{1}{Z_{45}} + Y_{beban4} + Y_{s45}$$

$$Y_{44} = 2.7387 - j9.8302 + 0.0363\angle - 2.8624 + j0.00743$$

$$Y_{44} = 2.772319730056901 - j15.089366818814192$$

$$= 15.3419\angle - 79.5893$$

$$Y_{45} = -\frac{1}{Z_{45}} = -2.7387 + j9.8302$$

$$= 10.2054\angle 105.551$$

$$Y_{51} = Y_{53} = 0$$

$$Y_{52} = Y_{25}$$

$$Y_{54} = Y_{45}$$

$$Y_{55} = \frac{1}{Z_{45}} + \frac{1}{Z_{35}} + \frac{(P_{l5} - jQ_{l5})}{|V_5|^2} + \frac{Y_{s45}}{2}$$

$$= 2.3513 - j8.415 + 0 + 0.1267\angle - 19.109 + j0.01012$$

$$Y_{55} = 12.73084\angle - 78.1584$$

$$Y_{af} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} \end{bmatrix}$$

$$Y_{af} = \begin{bmatrix} 5.26316\angle - 90 & 0 & 0 & 5.26316\angle 90 & 0 \\ 0 & 5.26316\angle - 90 & 0 & 0 & 2.6316\angle 90 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5.26316\angle 90 & 0 & 0 & 15.3419\angle - 79.5893 & 10.2054\angle 105.551 \\ 0 & 2.6316\angle 90 & 0 & 10.2054\angle 105.551 & 12.73084\angle - 78.1584 \end{bmatrix}$$

Dengan mereduksi matrix admitansi (Yaf) setelah gangguan maka dilakukan dengan cara yang sama pada proses reduksi sebelum gangguan di atas maka diperoleh hasil reduksi berikut:

$$Y_{af}^{red} = \begin{bmatrix} 1.5035\angle -88.566 & 1.5072\angle 93.136 \\ 0.15072\angle 93.136 & 1.4999\angle -88.486 \end{bmatrix}$$

Hasil simulasi untuk matrix admitansi setelah gangguan adalah

$$Y_{af}^{red} = \begin{bmatrix} 1.50351954\angle -88.56591 & 1.507184\angle 93.1360855 \\ 1.507184\angle 93.1360855 & 1.4999123\angle -88.486299 \end{bmatrix}$$

Dengan menggunakan nilai matrix admitansi bus setelah gangguan maka nilai sudut daya perunit diperoleh dengan cara:

$$\begin{aligned} P_{e1} &= |E'1|^2|Y11| \cos(\theta11) + |E'1||E'2||Y12|\cos(\theta12 - \delta1 + \delta2) \\ &= |1.0847|^2|0.1558| \cos(-10.588) + |1.0847||1.03997||0|\cos(93.136 \\ &\quad - 1.8042 - 1.8485) \end{aligned}$$

3

$$\begin{aligned} P_{e2} &= |E'2|^2|Y22| \cos(\theta22) + |E'2||E'1||Y21|\cos(\theta21 - \delta2 + \delta1) \\ &= |1.03997|^2|0.0721| \cos(-88.486) + |1.03997||0| \\ &\quad \times 1.5072(93.136 + 1.8465 + 1.8042) \end{aligned}$$

Perbandingan Hasil simulasi setelah gangguan dengan analitik untuk nilai daya mekanik dapat dilihat pada Tabel 4.19

Tabel 4.19 Perbandingan Daya mekanik hasil simulasi dan analitik

	Hasil Analitik	Hasil simulasi
P_{m1}	0.283	0.2831
P_{m2}	-0.032	-0.0321

7. Menghitung nilai sudut rotor dan kecepatan sudut rotor

Dengan menggunakan metode Runge Kutta, maka nilai-nilai $k_1, k_2, k_3, k_4, l_1, l_2, l_3$ dan l_4 untuk setiap mesin selama gangguan dengan menggunakan persamaan:

$$K1(\text{mesin1}) = \omega 1 \Delta t$$

Untuk nilai awal kecepatan sudut rotor = 0 dan perubahan waktu (= 0.01 , maka :

$$K1(mesin1) = 0 \times 0.01$$

$$= 0$$

$$K1(mesin2) = \omega 2 \Delta t$$

Untuk nilai awal kecepatan sudut rotor = 0 dan perubahan waktu (= 0.01 , maka :

$$K1(mesin2) = 0 \times 0.01$$

$$= 0$$

$$l1(mesin1) = \frac{\pi f}{H1} (P1 - Pe1) \Delta t$$

Dengan H1=2.9, P1=0.23925 pu dan Pe1 = , = 0.01 , maka :

$$l1(mesin1) = \frac{\pi \times 50}{2.9} (0.23925 - 7.9653) \times 0.01$$

$$0.129590697$$

$$l1(mesin2) = \frac{\pi f}{H2} (P2 - Pe2) \Delta t$$

Dengan H2=2.9, P1= 0.23925 pu dan Pe2 = , = 0.01 , maka :

$$l1(mesin2) = \frac{\pi \times 50}{2.9} (0.0004 - (-6.2326)) \times 0.01$$

$$0.052959882$$

$$K2(mesin1) = (\omega 1 + \frac{l1(mesin1)}{2}) \Delta t$$

$$K2(mesin2) = (\omega 2 + \frac{l1(mesin2)}{2}) \Delta t$$

Dengan nilai l: maka

$$K2(mesin1) = (0 + \frac{0.1}{2}) \times 0.000648$$

$$K2(\text{mesin2}) = (0 + 0.000264799)$$

Dengan langkah yang sama untuk menghitung maka
 hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Berdasarkan nilai $k_1, k_2, k_3, k_4, l_1, l_2, l_3$ dan l_4 maka nilai
 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$\partial_2 = \partial_1 + \frac{(k_1 + 2xk_2 + 2xk_3 + k_4)}{6}$$

$$\partial_2 = 1.843 + \frac{(0.003121)}{6}$$

$$\partial_2 = 1.834007$$

$$\omega_2 = \omega_1 + \frac{(l_1 + 2xl_2 + 2xl_3 + l_4)}{6}$$

$$\omega_2 = 0 + \frac{(0.777544)}{6}$$

$$\omega_2 = 0.13$$

Selengkapnya nilai dan nilai dengan adanya
 perubahan waktu dapat dilihat pada lampiran 9

Tabel 4.20 Nilai konstanta

L2m1	0.12959
L2m2	1.05376
K3m1	0.00026
K3m2	0.00526
l3m1	0.12959
l3m2	1.05376
K4m1	0.00129
K4m2	0.01054
L4m1	0.12959
L4m2	1.0536

Nilai k1, k2, k3, k4, tetap, sedangkan nilai l1, l2, l3 dan l4 berubah setelah gangguan seperti pada persamaan berikut:

$$l1(mesin1) = \frac{\pi f}{H1} (P1 - Pa) * \sin(\theta1))x\Delta t$$

$$l1(mesin2) = \frac{\pi f}{H2} (P2 - Pa)x \sin(\theta2))x\Delta t$$

$$l2(mesin1) = \frac{\pi f}{H1} ((P1 - Pa)x \sin(\theta1) + (0.5xk2(mesin1)))x\Delta t$$

$$l2(mesin2) = \frac{\pi f}{H2} ((P2 - Pa)x \sin(\theta2) + (0.5xk2(mesin2)))x\Delta t$$

$$l3(mesin1) = \frac{\pi f}{H1} ((P1 - Pa)x \sin(\theta1) + (0.5xk3(mesin1)))x\Delta t$$

$$l3(mesin2) = \frac{\pi f}{H2} ((P2 - Pa)x \sin(\theta2) + (0.5xk3(mesin2)))x\Delta t$$

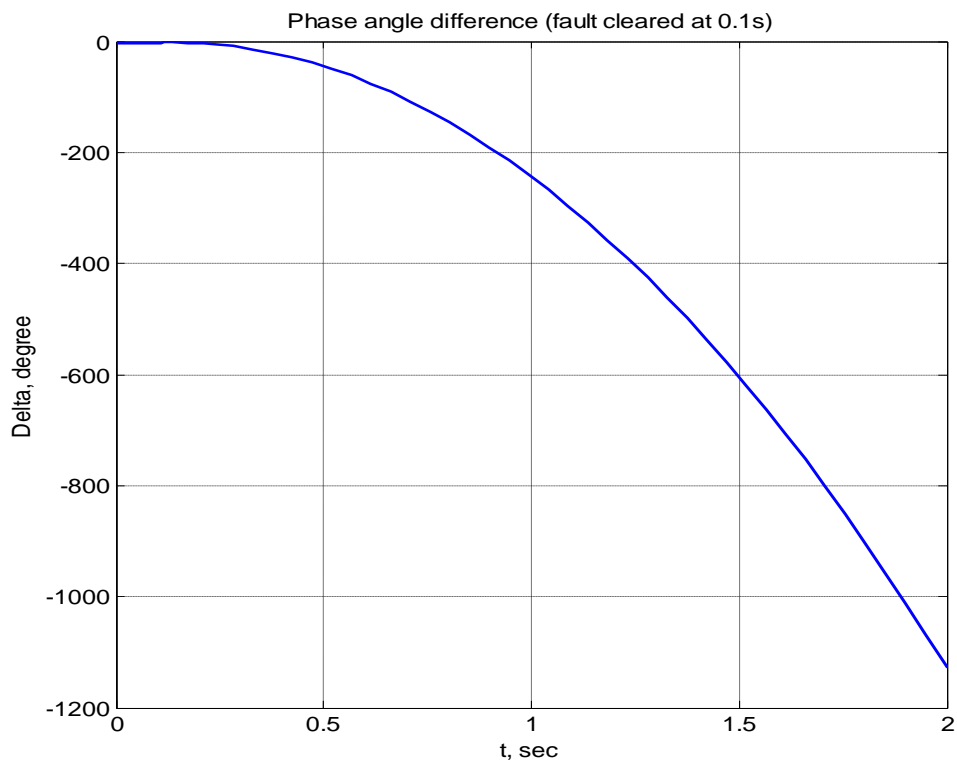
$$l4(mesin1) = \frac{\pi f}{H1} ((P1 - Pa)x \sin(\theta1) + (k4(mesin1)))x\Delta t$$

$$l4(mesin2) = \frac{\pi f}{H2} ((P2 - Pa) x \sin(\theta2) + (k4(m$$

Selanjutnya menghitung nilai menggunakan persamaa:

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \frac{(k1 + 2xk2 + 2xk3 + k4)}{6}$$

$$\omega_{i+1} = \omega_i + \frac{(l1 + 2xl2 + 2xl3 + l4)}{6}$$



Gambar 4.5 Hasil simulasi berdasarkan contoh

Hasil perhitungan nilai dengan menggunakan persamaan yang ada maka diperoleh nilai dalam bentuk Tabel menggunakan bantuan excel dapat dilihat pada lampiran 9.

Berikut ini hasil simulasi menggunakan Matlab dalam menganalisis sistem Sulsebar dengan jumlah bus 37 dan 5 generator

C. Hasil Komputasi Kestabilan Transien Menggunakan Parameter Kestabilan Sudut Rotor pada Sistem Kelistrikan Sulselbar

Dalam Pembahasan ini, kondisi kestabilan transient dianalisis pada suatu kondisi pembebanan tertentu, yakni pembebanan tanggal 10 Februari 2011 pukul 19.30 WITA. Tabel 4.5 menunjukkan hasil perhitungan aliran daya dengan menggunakan metode Newton Raphson (lampiran 4). Penjelasan perhitungan aliran daya telah dibahas pada BAB II halaman 37.

Berdasarkan Tabel 4.20, bus no. 1 dalam hal ini bus Bakaru memiliki tegangan 1,05 pu dengan sudut fasa 0° , daya nyata (P) 48.223 MW atau 0.48223 pu dan daya reaktif (Q) adalah 28.571 MVAR atau 0,28571 pu, untuk bus 12 yaitu bus Suppa, memiliki tegangan 1.02 pu dengan sudut fasa -0.849° dengan daya nyata (P) pembangkitan adalah 64.8 MW atau 0.648 pu dan daya reaktif (Q) Pembangkitan adalah 51.434 MVAR atau 0.51434 pu, sedangkan bus 21 yaitu bus Tello 150 kV, memiliki tegangan 0.98 pu dengan sudut fasa -1.5° dengan daya nyata (P) pembangkitan adalah 186.8 MW atau 1.868 pu dan daya reaktif (Q) Pembangkitan adalah 158.644 MVAR atau 1.58644 pu

Untuk bus 11 yaitu bus Sengkang, memiliki tegangan 1,02 pu dengan sudut fasa 12.407° dengan daya nyata (P) pembangkitan adalah 195 MW atau 1.95 pu dan daya reaktif (Q) Pembangkitan adalah 8.419 MVAR atau 0.08419 pu.

Tabel 4.21 Hasil perhitungan aliran daya metode Newton – Raphson pada sistem interkoneksi Sul-Sel Bar Tingkat ketelitian = , iterasi ke – 4

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load -----		----Generation----		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.05	0	3.9	0.2	48.223	28.571	0
2	1.031	-3.152	8.8	0.7	0	0	0
3	1.033	-1.844	6.6	1.7	0	0	0
4	1.035	-1.024	5.4	0.4	0	0	0
5	1.023	-0.9	16.5	4.7	0	0	0
6	1.015	-0.889	6.6	-1	0	0	0
7	1.006	-0.41	15.9	9.8	0	0	0
8	0.984	-4.332	11	1.6	0	0	0
9	0.975	-5.342	25.4	5.4	0	0	0
10	1.007	6.069	11	4.8	0	0	0
11	1.02	12.407	15.8	7.5	195	8.419	0
12	1.02	-0.849	50	17	64.8	51.434	0
13	0.993	-1.369	4.3	1.1	0	0	0
14	0.971	-1.654	13.2	5	0	0	0
15	1.039	-3.569	7.2	0	0	0	0
16	1.033	-3.742	17.4	12.2	0	0	0
17	1.011	-1.295	6.3	1.5	0	0	0
18	0.974	-1.861	18.3	0	0	0	0
19	1.009	-2.424	8.4	2.1	0	0	0
20	1.006	-2.451	18.6	2.5	0	0	0
21	0.98	-1.5	21	8	186.8	158.644	0
22	1.01	-2.04	0	0	21.5	-56.151	0
23	1.008	-2.21	2.7	0	0	0	0
24	1.01	-2.04	0	0	0	0	0
25	0.823	-18.562	0	0	0	0	0
26	0.726	-23.748	38.9	11.5	0	0	0
27	0.971	-1.467	1.9	3.7	0	0	0
28	1.022	-3.703	0	0	0	0	0
29	1.001	-3.382	35.4	0	0	0	0
30	0.978	-1.681	38.9	11.5	0	0	0
31	0.989	-2.764	35.8	13.7	0	0	0
32	0.984	-1.937	10.6	3.7	0	0	0
33	0.982	-1.656	2.2	5.7	0	0	0
34	0.981	-0.48	7.5	4.1	0	0	0
35	0.985	0.726	6.1	0.5	0	0	0
36	0.986	1.578	8.3	2.9	0	0	0
37	0.992	3.364	20.1	5.9	0	0	0
Total			500	148.4	516.323	190.916	0

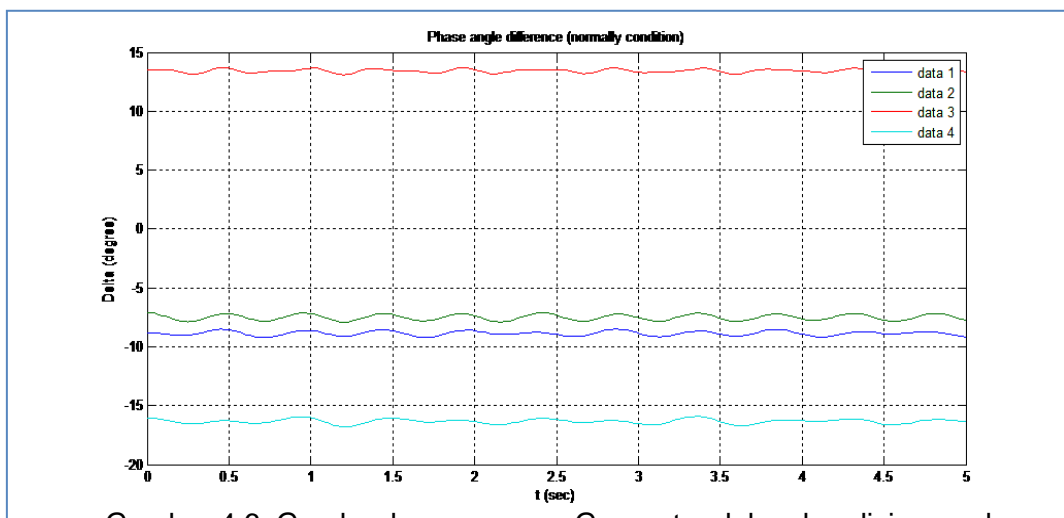
Dari hasil aliran daya pada Tabel 4.20 tersebut maka kurva ayunan dapat ditentukan bila terjadi gangguan tiga fasa di bus atau saluran.

Besaran tegangan pada sistem Suselbar hasil aliran daya digunakan untuk arus yang mengalir dari jala-jala (bus Generator) dan juga untuk menghitung tegangan peralihan pada masing-masing Generator, dengan memperhitungkan besarnya reaktansi transien dari setiap Generator, dan akhirnya nilai awal kecepatan sudut rotor dan sudut rotor dapat diketahui.

D. Hasil Analisis Dan Pembahasan

1. Besaran kecepatan sudut rotor dan sudut rotor Pada Kondisi Normal (Tanpa Gangguan)

Kondisi sudut rotor terhadap waktu ketika aliran daya dalam kondisi normal atau tanpa gangguan seperti pada 4.2 di bawah ini.



Gambar 4.6. Gambar kurva ayunan Generator dalam kondisi normal

Grafik pada gambar 4.6 menggambarkan kondisi sudut rotor dalam keadaan normal pada tanggal 10 Februari 2011 pukul 19.30 WITA, dimana frekuensi dan tegangan hampir tidak mengalami perubahan yang berbanding lurus dengan perubahan sudut rotor setiap Generator.

Pada saat ini Sistem Interkoneksi SULSELBAR memiliki 7 daerah pembangkitan yang bekerja pada tegangan 150kV, 70 KV dan 30 KV. Namun demikian dalam analisis ini dibatasi pada tegangan 150 KV dan 70 kV, sehingga dari 7 pembangkit yang ada terdapat 2 bus atau lokasi yang bertegangan 30 KV, dengan demikian yang bekerja pada tegangan 150 kV hanya 4 pembangkit utama dan 1 unit pembangkitan yang bekerja pada tegangan 70 kV yang menyuplai Sistem Interkoneksi SULSELBAR (lampiran 2)

Ke-5 pembangkit tersebut dinotasikan dalam bentuk matrix admintansi dengan menggunakan persamaan (77) sehingga terbentuk matrix Y_{bf} atau matrix sebelum gangguan.

2. Hasil simulasi kestabilan transient pada sistem interkoneksi Sulselbar

Gangguan transient yang disimulasikan adalah gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah. *Critical Clearing Time* dapat ditentukan dengan melihat grafik sudut rotor. Semakin lama waktu gangguan terjadi maka grafik akan memperlihatkan respon sudut rotor yang akan semakin menuju ke kondisi tidak stabil. Komputasi kestabilan transient ini diperoleh dengan bantuan software MATLAB versi 7.8.

Untuk menentukan kurva ayunan (gambar 4.6) berdasarkan waktu pemutusan, maka diperlukan data tegangan dalam peralihan dan arus yang mengalir pada bus.

Berdasarkan perhitungan aliran daya dengan metode Newton Raphson maka perhitungan kestabilan sistem dapat dilakukan seperti berikut:

- a. Menghitung besarnya arus yang mengalir dalam sistem dari setiap bus Generator
- b. Tegangan transien dari masing-masing Generator sehingga diperoleh nilai awal dan

Selanjutnya menghitung elemen-elemen matrix admintasi bus sebelum gangguan berdasarkan jumlah Generator dan semua beban dalam sistem dirubah menjadi admitansi konstan, setelah itu mereduksi matrik seperti pada contoh sebelumnya sampai didapatkan matrix Y_{ii} sesuai dengan jumlah Generator yang ada pada sistem, dalam simulasi ini dipilih 5 pembangkit, sehingga diperoleh matrix admitansi sebelum gangguan dengan ukuran matrix 5x5 seperti berikut:

$$Y_{bf} =$$

$$\begin{vmatrix} 0.4285 - 2.6206i & 0.0962 + 0.5455i & 0.1146 + 0.6896i & 0.0556 + 0.8094i & 0.0223 + 0.0911i \\ 0.0962 + 0.5455i & 0.1039 - 1.8656i & 0.1024 + 0.4260i & 0.0709 + 0.5035i & 0.0180 + 0.0560i \\ 0.1146 + 0.6896i & 0.1024 + 0.4260i & 0.6377 - 3.6528i & 0.1295 + 0.8971i & 0.0937 + 0.2714i \\ 0.0556 + 0.8094i & 0.0709 + 0.5035i & 0.1295 + 0.8971i & 0.7230 - 3.0701i & 0.0248 + 0.1099i \\ 0.0223 + 0.0911i & 0.0180 + 0.0560i & 0.0937 + 0.2714i & 0.0248 + 0.1099i & 0.0371 - 0.7234i \end{vmatrix}$$

Matrix Y_{bf} ini diperoleh dengan mereduksi semua bus dari 37 bus menjadi 5 bus berdasarkan jumlah generator. Hal ini dilakukan dengan cara yang sama seperti diperlihatkan pada contoh perhitungan dalam menghitung matriks reduksi sebelumnya. Prosesnya didasarkan pada persamaan 105 dari bab II) sehingga dituliskan:

$$Y_{bus}^{red} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_{nn}^{-1} Y_{nm}$$

Dengan

m = baris dan atau kolom pada matrix Y_{mm}

N = kolom pada matrix Y_{nm} dan menjadi baris atau kolom pada matrik Y_{nn}

Hal ini dilakukan sampai secara berulang sampai diperoleh matrix yang ukurannya sama dengan jumlah bus Generator yang ada.

Untuk gangguan hubung singkat tiga fasa pada bus 14, maka matrix admitansi selama gangguan pada bus 14 yang terhubung singkat ke tanah, maka semua admitansi yang terhubung dengan bus ke 14 dilepaskan dari sistem, selanjutnya matrix admitansi sistem sebelum gangguan direduksi hingga diperoleh ukuran matrik sama dengan jumlah Generator yang diamati yaitu ukuran 5x5. Pada saat reduksi nilai admitansi bus berubah tergantung pada saluran yang terganggu. Untuk gangguan pada bus 14 dengan saluran 14-21 yang dilepas, maka nilai matrix admitansi sebelum reduksi akan berubah. Nilai hasil reduksi ini tidak menghasilkan nol walaupun saluran 14-21 lepas karena pada bus 14 dan bus 21 masih ada saluran lain yang terhubung ke bus tersebut. Apabila yang ada hanya 1 saluran maka pada matrix sebelum reduksi dan sesudah reduksi akan nol karena tidak saluran lain yang terhubung ke bus tersebut.

Pada saat saluran 14-21 dilepas maka. Nilai matrix yang terbentuk adalah matrix admintasi selama gangguan pada bus 14 dan saluran 14-21 terhubung ke tanah.

$$Y_{df} =$$

$$\begin{pmatrix} 0.4001 - 2.9279i & 0.0647 + 0.3546i & 0.0043 + 0.0262i & 0.0339 + 0.4733i & 0.0006 + 0.0018i \\ 0.0647 + 0.3546i & 0.0757 - 1.9835i & 0.0039 + 0.0162i & 0.0423 + 0.2944i & 0.0004 + 0.0011i \\ 0.0043 + 0.0262i & 0.0039 + 0.0162i & 0.2937 - 5.0771i & 0.0292 + 0.1702i & 0.0325 + 0.0807i \\ 0.0339 + 0.4733i & 0.0423 + 0.2944i & 0.0292 + 0.1702i & 0.7094 - 3.4374i & 0.0038 + 0.0118i \\ 0.0006 + 0.0018i & 0.0004 + 0.0011i & 0.0325 + 0.0807i & 0.0038 + 0.0118i & 0.0268 - 0.7487i \end{pmatrix}$$

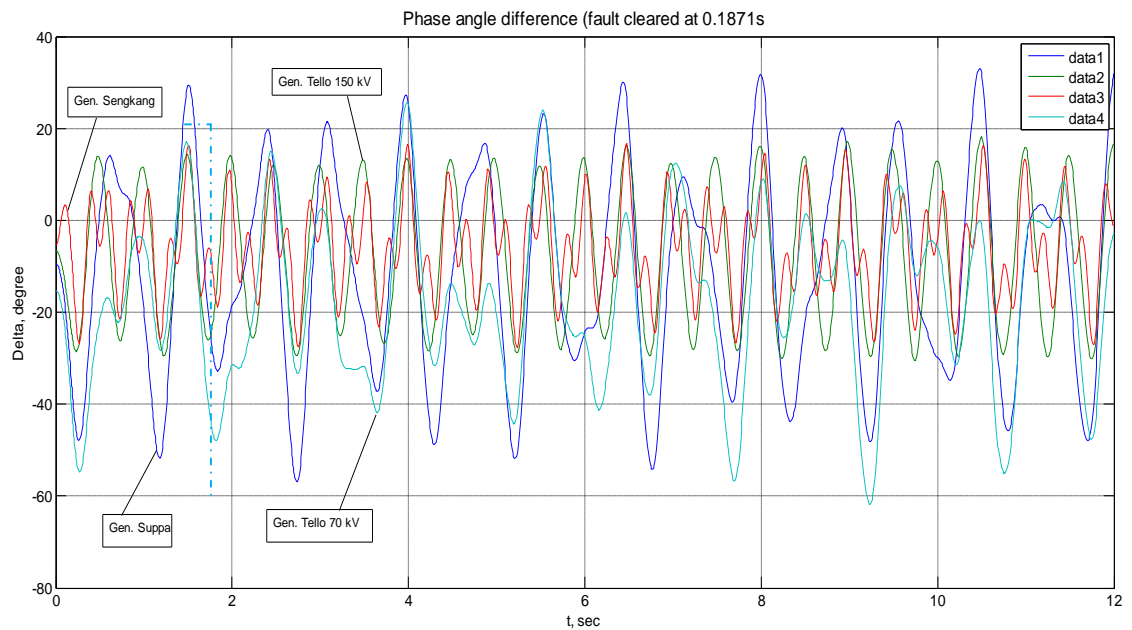
Selanjutnya dilakukan perhitungan matrix admitansi setelah gangguan dengan cara melepaskan saluran yang terganggu, dalam kasus ini saluran 14-21, yaitu saluran Pangkep-Tello. Dengan melepaskan saluran 14-21 dibentuk matrix baru tanpa addmitansi pada saluran 14-21, kemudian direduksi sampai mendapatkan ukuran matrix sama dengan jumlah Generator yaitu ukuran matrix 5x5. Hasilnya dapat dilihat berikut ini:

$$Y_{af} =$$

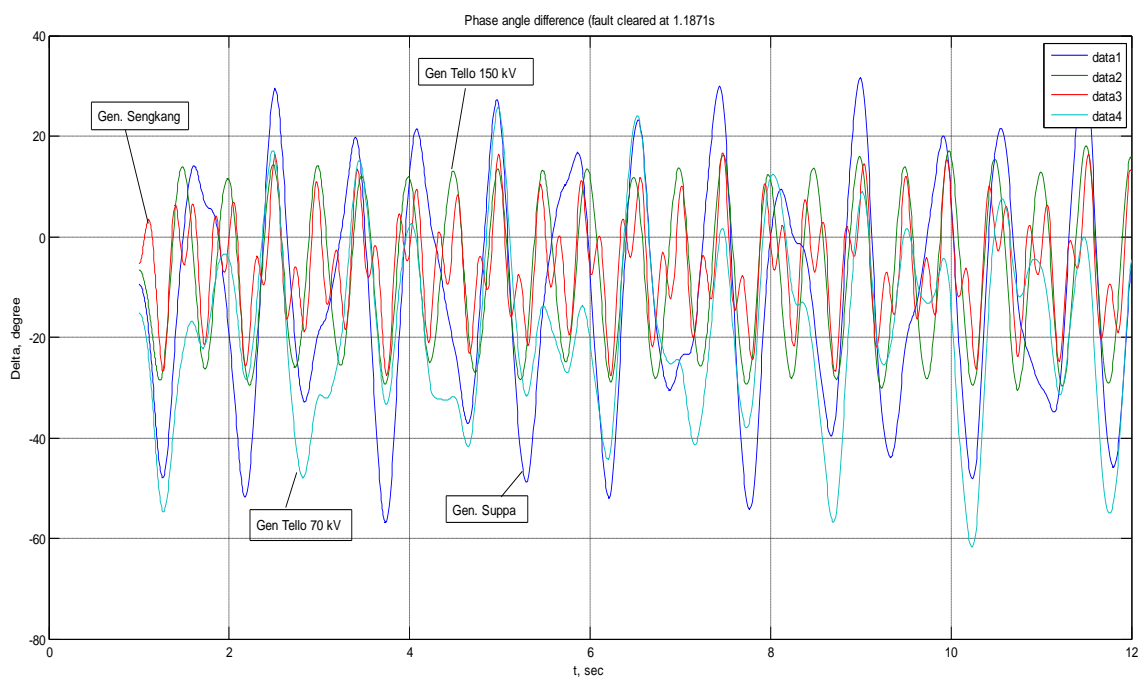
$$\begin{pmatrix} 0.4353 - 2.5795i & 0.1023 + 0.5708i & 0.1037 + 0.6111i & 0.0592 + 0.8334i & 0.0222 + 0.0919i \\ 0.1023 + 0.5708i & 0.1089 - 1.8500i & 0.0921 + 0.3774i & 0.0743 + 0.5184i & 0.0180 + 0.0565i \\ 0.1037 + 0.6111i & 0.0921 + 0.3774i & 0.6507 - 3.5114i & 0.1234 + 0.8502i & 0.0935 + 0.2694i \\ 0.0592 + 0.8334i & 0.0743 + 0.5184i & 0.1234 + 0.8502i & 0.7249 - 3.0563i & 0.0247 + 0.1103i \\ 0.0222 + 0.0919i & 0.0180 + 0.0565i & 0.0935 + 0.2694i & 0.0247 + 0.1103i & 0.0370 - 0.7234i \end{pmatrix}$$

Berdasarkan matrix admintansi di atas, maka akan diperoleh gambar kurva ayunan untuk masing-masing Generator selama 5 detik jika gangguan yang terjadi pada saluran 14-21 seperti pada gambar 4.6

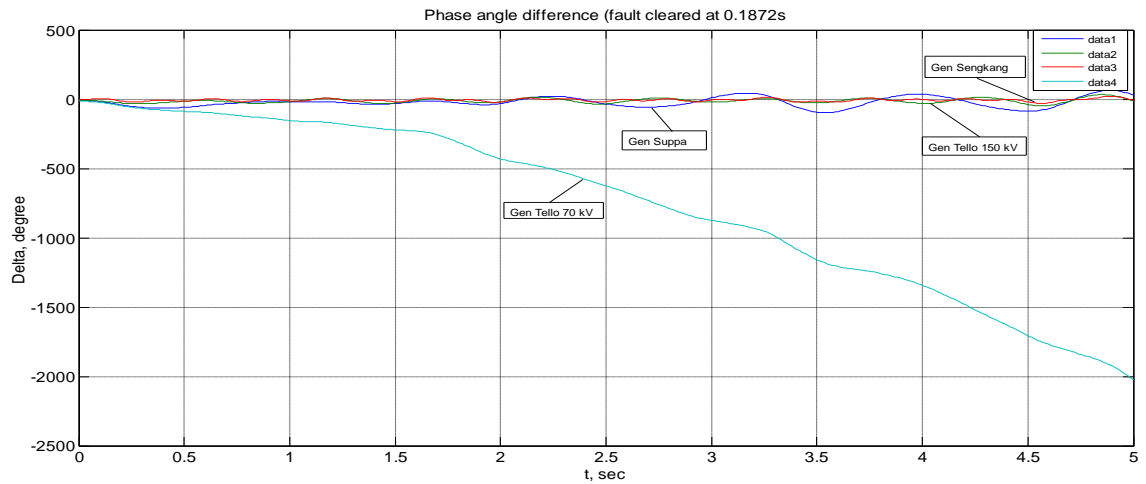
Waktu lama gangguan diperoleh dengan metode *step-by-step* (langkah demi langkah) sehingga diperoleh waktu pemutusan kritis (*Critical Clearing Time*).



Gambar 4.7. Respon sudut rotor pada saat terjadi gangguan pada Bus 14 (lama gangguan = 0.1871 detik), Saluran 14-21 di buka



Gambar 4.8 Respon sudut rotor pada saat terjadi gangguan pada bus 14 yang diawali dengan kondisi normal selama 1 detik. (lama gangguan = 1.1871 detik), saluran 14-21 dibuka



Gambar 4.9 Respon sudut rotor pada saat terjadi gangguan pada bus 14 (lama gangguan = 0.1872 detik), saluran 14-21 dibuka

Pada gambar 4.7, gambar 4.8 dan gambar 4.9 dapat dijelaskan

bahwa:

- Untuk warna biru merupakan perbandingan sudut rotor pembangkit Suppa terhadap pembangkit Bakaru dan dinyatakan sebagai data 1.
- Untuk warna merah merupakan perbandingan sudut rotor Pembangkit Tello terhadap Pembangkit Bakaru dan dinyatakan sebagai data 2
- Untuk warna hijau merupakan perbandingan sudut rotor Pembangkit Sengkang terhadap Pembangkit Bakaru dan dinyatakan sebagai data 3

- Untuk warna biru muda merupakan perbandingan sudut rotor Pembangkit Tello 70 kV terhadap Pembangkit Bakaru dan dinyatakan sebagai data 4

3. Analisis Grafik dan Pembahasan

Untuk menganalisis kestabilan sistem dilihat perubahan beban sudut rotor tiap Generator pada slack bus (Bakaru). Waktu pemutusan kritis yang dipilih adalah waktu saat gangguan diputuskan tidak mempengaruhi kestabilan sistem atau tidak ada salah satu Generator yang hilang kesinkronannya. Apabila ada perbedaan sudut rotor yang naik tidak terbatas pada salah satu Generator, sistem tersebut dikatakan tidak stabil.

Grafik yang diperoleh dari hasil komputasi kestabilan transient sistem interkoneksi Suselbar dengan pemilihan waktu pemutusan kritis dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Gambar 4.7 adalah gangguan hubung singkat yang terjadi pada saluran 14-21 pada bus 14 (Pangkep) selama 0.1871 detik. Terlihat bahwa sudut rotor sudah hampir menuju ke kondisi tidak stabil (Generator tidak sinkron lagi). Kemudian pada Gambar 4.9 waktu gangguan ditambahkan lagi sampai 0.1872 detik, maka terlihat sudut rotor menjadi tidak stabil . Gambar 4.8 Respon sudut rotor pada saat terjadi gangguan pada bus 14 yang diawali dengan kondisi normal selama 1 detik.
2. Lampiran 8-1 adalah gangguan hubung singkat yang terjadi pada saluran 18-21 pada bus 18 (Bosowa) selama 0.2976 detik. Terlihat

bahwa sudut rotor sudah hampir menuju ke kondisi tidak stabil (Generator tidak sinkron lagi).Kemudian pada Gambar 8-3 waktu pemutusan ditambahkan lagi sampai 0.2977 detik,maka terlihat sudut rotor menjadi tidak stabil. Gambar 8-2 Respon sudut rotor pada saat terjadi gangguan pada bus 18 yang diawali dengan kondisi normal selama 1 detik. (lama gangguan = 0.2889 detik), saluran 18-21.

3. Lampiran 9-1 adalah gangguan hubung singkat yang terjadi pada saluran 32- 21 pada bus 32 (Sungguminasa) selama 0.1865 detik. Terlihat bahwa sudut rotor sudah hampir menuju ke kondisi tidak stabil (Generator tidak sinkron lagi). Kemudian pada lampiran 9-3 waktu pemutusan ditambahkan lagi sampai 0.1866 detik, maka terlihat sudut rotor menjadi tidak stabil.Lampiran 9-2 Respon sudut rotor pada saat terjadi gangguan pada bus 32 yang diawali dengan kondisi normal selama 1 detik.
4. Lampiran 10-1 adalah gangguan hubung singkat yang terjadi pada saluran 21-27 pada bus 27 (Tello Lama) selama 0.2581 detik. Terlihat bahwa sudut rotor sudah hampir menuju ke kondisi tidak stabil (Generator tidak stabil lagi). Kemudian pada lampiran 10-3 waktu pemutusan ditambahkan lagi sampai 0.2582 detik, maka terlihat sudut rotor menjadi tidak stabil. Lampiran 10-2 Respon sudut rotor saat terjadi gangguan pada bus 27 yang diawali dengan kondisi normal selama 1 detik.

Pada saat kondisi gangguan nilai *critis clearing time* (CCT) diperoleh dengan cara menaikkan waktu secara bertahap (*step by step*) sehingga diperoleh perubahan nilai sudut rotor. Hal ini dilakukan untuk mengetahui batas kondisi sistem mendekati ketidakstabilan. Dengan demikian maka batas ketidakstabilan (kondisi mendekati ketidakstabilan) sudut rotor dapat diperoleh sehingga waktu pemutusan dapat dilakukan dengan menaikkan waktu sebesar 0.1 detik agar sistem dapat kembali pada kondisi semula.

Apabila waktu gangguan yang terjadi cukup lama maka nilai sudut rotor dari pembangkitan menuju pada kondisi tidak stabil demikian halnya bila lokasi gangguan dekat dengan pembangkitan maka waktu pemutusan yang diperoleh makin cepat sehingga kecenderungan sistem pada kondisi tidak stabil semakin besar. Keadaan demikian dapat terjadi bila gangguan pada bus 35 yakni bus Bulukumba dan saluran 35-36 lepas (Bulukumba – sinjai) yang lokasinya jauh dari pembangkitan, maka gangguan akan menjadi lama sehingga nilai sudut rotor dari semua pembangkitan menuju pada kondisi tidak stabil.

Tabel 4.21 Letak gangguan dan hasil analisis selengkapnya

No	Letak Gangguan	Saluran yang dibuka	Reaktansi saluran Transmisi		Waktu Pemutusan Kritis (detik)	Sudut Pemutusan Kritis (°)
			Rpos(P.U)	Xpos(P.U)		
1	Dekat bus Tello 150 kV	Tello-Pangkep 150 kV	0.02382	0.08535	0.1871	87,8915
		Tello-Bosowa 150 kV	0.01683	0.06049	0,2976	90,5776
		Tello-Sungguminas 150 kV	0.00192	0.01318	0.1865	82,2817

		Tello-Tello lama 150 kV	0.00363	0.01300	0.2581	89,0314
--	--	-------------------------------	---------	---------	--------	---------

Dari Tabel 4.21 dapat dilihat bahwa pada saat terjadi gangguan disekitar saluran bus Tello 150 kV, pembangkit yang berada pada bus Sengkang yang mengalami respon tercepat terhadap gangguan. Hal ini terjadi karena momen inersia Generator pada bus Sengkang relatif lebih kecil yaitu $H=1.05$ MJ/MVA dibandingkan momen inersia Generator lain, sehingga Generator pada bus Sengkang mudah melepas pada saat terjadi gangguan 3 fasa. Demikian halnya pada saat gangguan di bus Sungguminasa di saluran Sungguminasa-Tello, maka Generator di bus Sengkang mengalami gangguan tercepat dimana waktu pemutusan yang diperoleh adalah 0.1865 detik. Hal ini disebabkan oleh momen inersia yang relatif kecil di pusat pembangkit Sengkang dan reaktansi saluran transmisi Sungguminasa 150 kV-Tello 150 kV relatif lebih kecil dibandingkan reaktansi saluran lainnya terhadap gangguan hubung singkat 3 fasa.

Perbedaan waktu pemutusan kritis yang diperoleh tersebut disebabkan karena pengaruh letak titik gangguan, dimana hasil analisis menunjukkan bahwa jika gangguan yang terjadi semakin dekat dengan pembangkit, maka waktu pemutusan kritis yang diperoleh semakin cepat.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan analisis pada bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kestabilan sudut rotor saat terjadi gangguan disekitar saluran bus Tello 150 kV, pembangkit yang berada pada bus Sengkang yang mengalami respon tercepat terhadap gangguan. demikian halnya pada saat gangguan di bus Sungguminasa di saluran Sungguminasa-Tello, maka Generator di bus sengkang mengalami gangguan tercepat dimana waktu pemutusan yang diperoleh adalah 0.1865 detik. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu :
 - a. Lama waktu gangguan mempengaruhi kestabilan sudut rotor dari semua pembangkit. Semakin lama gangguan maka akan membuat sudut rotor menuju ke kondisi tidak stabil.
 - b. Letak gangguan mempengaruhi kestabilan sudut rotor dari semua pembangkit. Semakin dekat gangguan terjadi terhadap pembangkit, maka waktu pemutusan kritis yang diperoleh semakin cepat, sehingga kecendrungan sistem tidak stabil semakin besar.
2. Waktu pemutusan kritis tercepat diperoleh bila terjadi hubung singkat 3 fasa pada saluran Tello-Sungguminasa 150 kV di dekat bus

Sungguminasa yaitu sebesar 0.1865 detik dengan perolehan sudut pemutusan kritis sebesar .

3. Penentuan waktu pemutusan kritis dilakukan dengan menggunakan metode *step by step* (langkah demi langkah) hingga diperoleh waktu dimana kondisi sistem hampir tidak stabil.

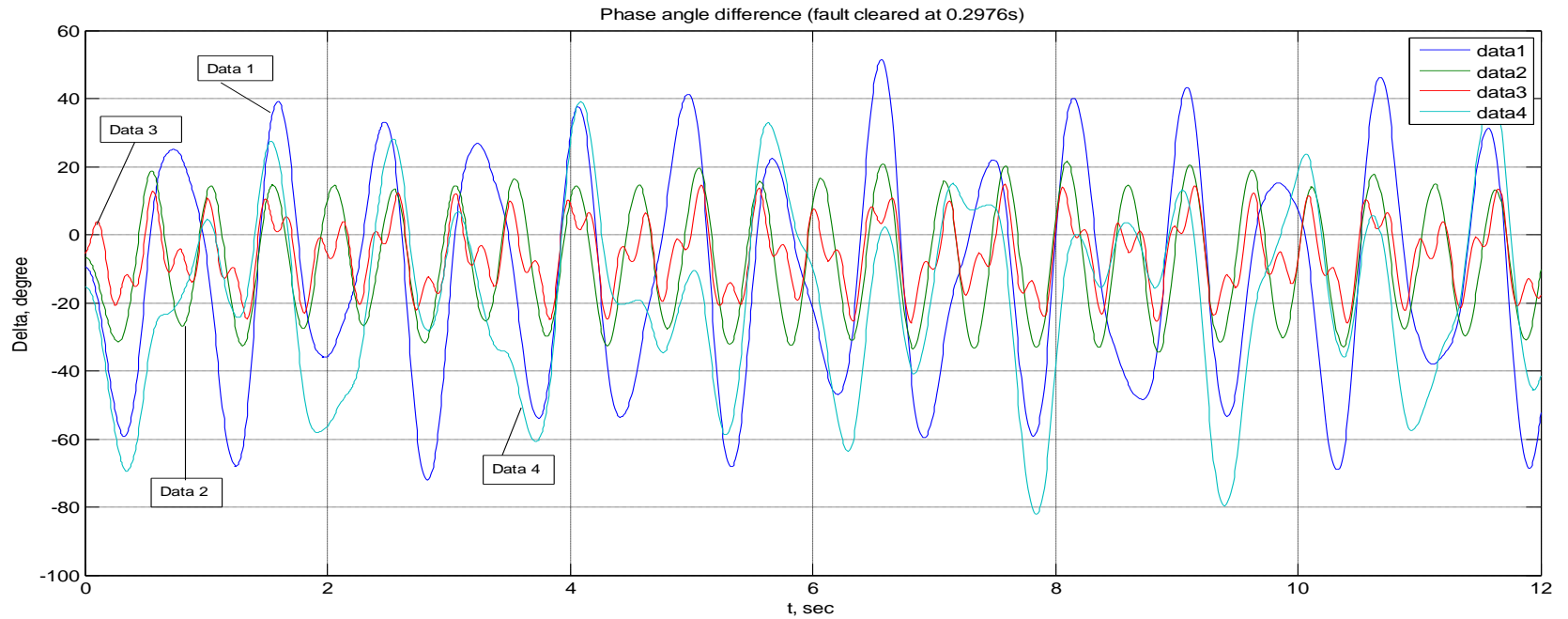
B. Saran

Diharapkan setting waktu operasi dari CB tidak lebih besar dari waktu pemutusan kritis (*critical clearing time*), karena jika setting waktu CB lebih besar dari waktu pemutusan kritis, maka pada saat terjadi gangguan, sistem sudah dalam kondisi tidak stabil (sudut rotor Generator sudah menyimpang dan tidak bekerja sinkron lagi) baru kemudian CB beroperasi. Sehingga fungsi CB tidak berjalan dengan semestinya.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, Fuad. 1977. *Power System Stability and Control*. USA : Ames Iowa
- Arikunto, Suharsimi. 2005. *Manajemen Penelitian*. Jakarta : PT. Rineka Cipta
- Cekdin, Cekmas. 2007. *Sistem Tenaga Listrik, Contoh Soal dan Penyelesaian Menggunakan MATLAB*. Yogyakarta : C.V Andi Offset.
- Grigsby, L.L. 2001. *The Electric Power Engineering Handbook*. United States of America : CRC Press LLC
- Gross, Charles A. 1979. *Power System Analysis*. New York : John Wiley & Sons.
- Kundur, Prabha. 1994. *Power System Stability and Control*. United States of America : McGraw-Hill
- Nagath, I. G., Kothari, D. P. 1987. *Modern Power System Analysis*. New Delhi : Tata McGraw Hill Publishing Company Limited
- Saadat, Hadi. 1999. *Power System Analysis*. Singapore: WCB McGraw-Hill.
- Stagg, Glenn W., Ahmed H. El-Abjad. 1983. *Computer Methode in Power System Analysis. International Student Edition*. Tokyo, Japan: Togho Printing
- Stevenson, William.D. 1984. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Edisi 4. Terjemahan Kamal Idris. Jakarta: Erlangga.
- Ulum, Misbahul. 2007. *Studi Stabilitas Transient Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Kriteria Luas Sama dan Menggunakan MATLAB*. Skripsi tidak diterbitkan. Surabaya: JPTE FT Unesa.
- Sanatang, *Perbaikan Stabilitas Frekuensi Dan tegangan Pada Beban Dinamik Sistem SulSelBar Menggunakan Metode Linier Quadratic Regulator (LQR)*, Pasca Unhas, 2009

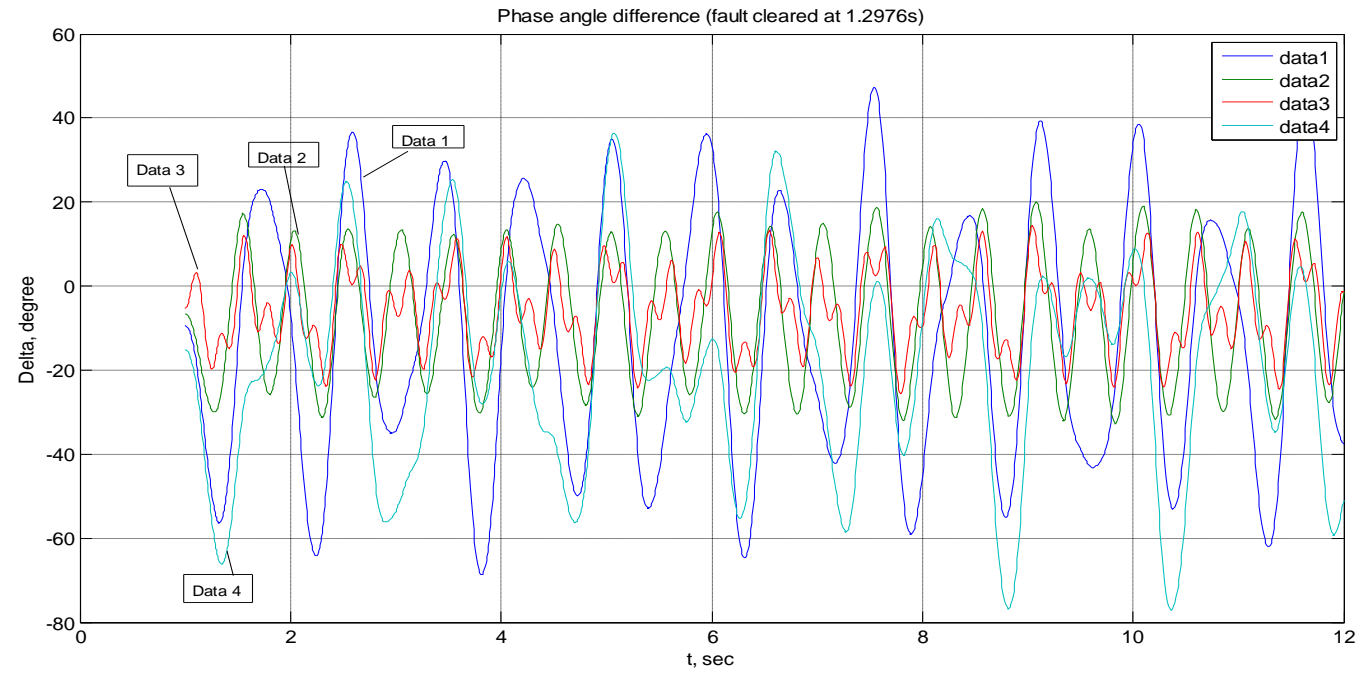
Lampiran 8-1



Keterangan gambar:

- | | |
|------------------|-----------------------------------|
| Warna Biru tua | = Data 1 (Generator Suppa) |
| Warna Hijau | = Data 2 (Generator Tello 150 kV) |
| Warna merah | = Data 3 (Generator Sengkang) |
| Warna biru mudah | = Data 4 (Generator Tello 70 kV) |

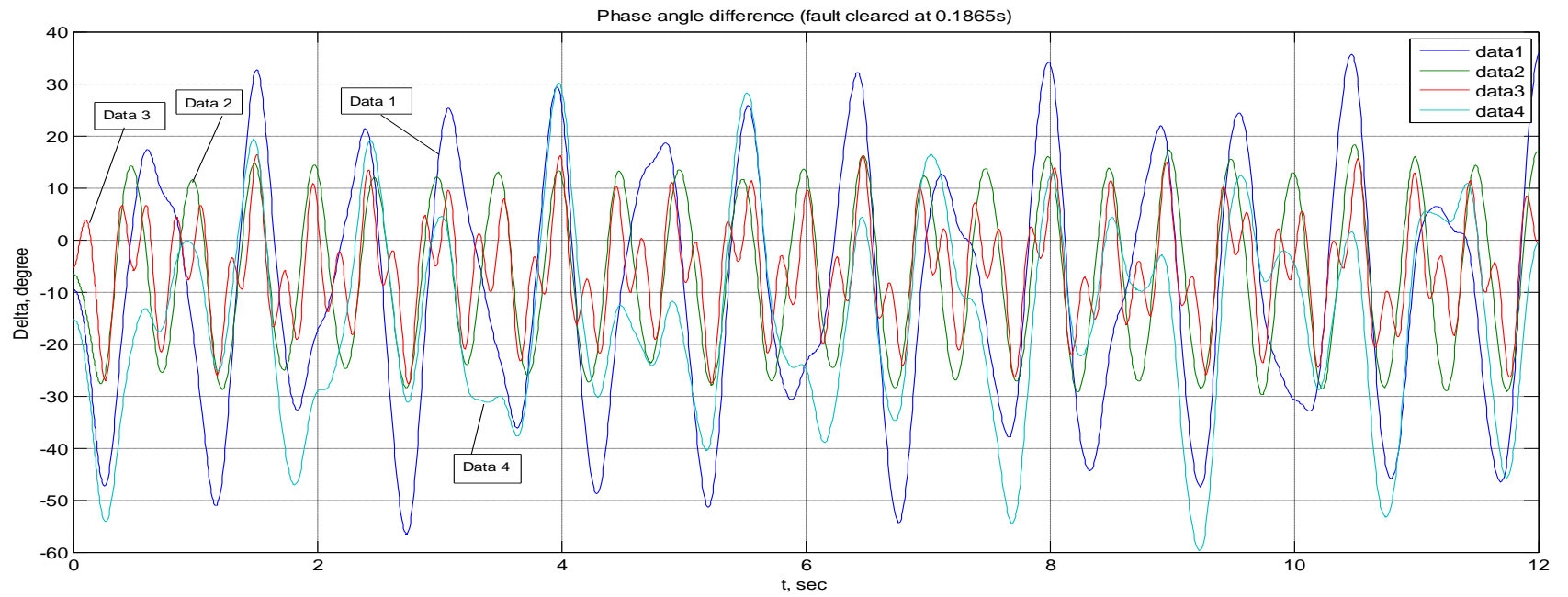
Lampiran 8-2



Keterangan gambar:

- | | |
|------------------|-----------------------------------|
| Warna Biru tua | = Data 1 (Generator Suppa) |
| Warna Hijau | = Data 2 (Generator Tello 150 kV) |
| Warna merah | = Data 3 (Generator Sengkang) |
| Warna biru mudah | = Data 4 (Generator Tello 70 kV) |

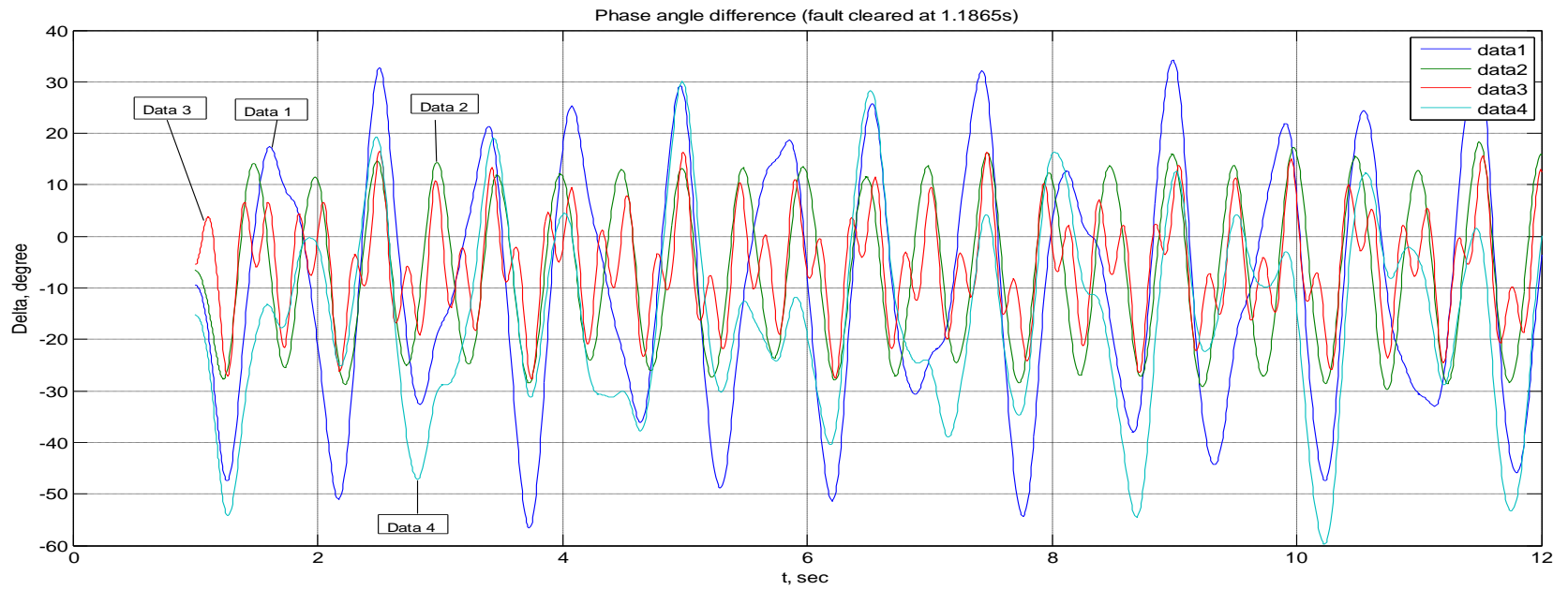
Lampiran 9-1



Keterangan gambar:

- | | |
|------------------|-----------------------------------|
| Warna Biru tua | = Data 1 (Generator Suppa) |
| Warna Hijau | = Data 2 (Generator Tello 150 kV) |
| Warna merah | = Data 3 (Generator Sengkang) |
| Warna biru mudah | = Data 4 (Generator Tello 70 kV) |

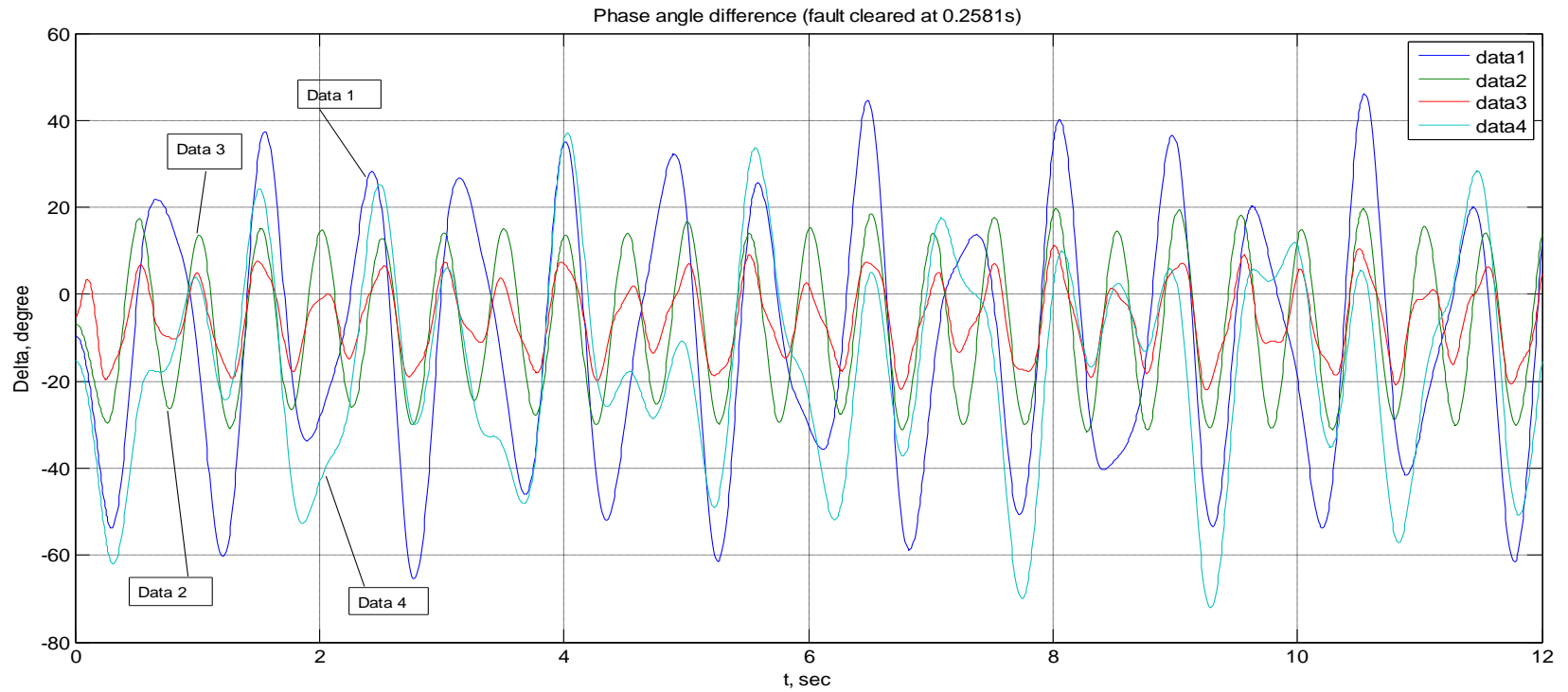
Lampiran 9-2



Keterangan gambar:

- Warna Biru tua = Data 1 (Generator Suppa)
- Warna Hijau = Data 2 (Generator Tello 150 kV)
- Warna merah = Data 3 (Generator Senggang)
- Warna biru mudah = Data 4 (Generator Tello 70 kV)

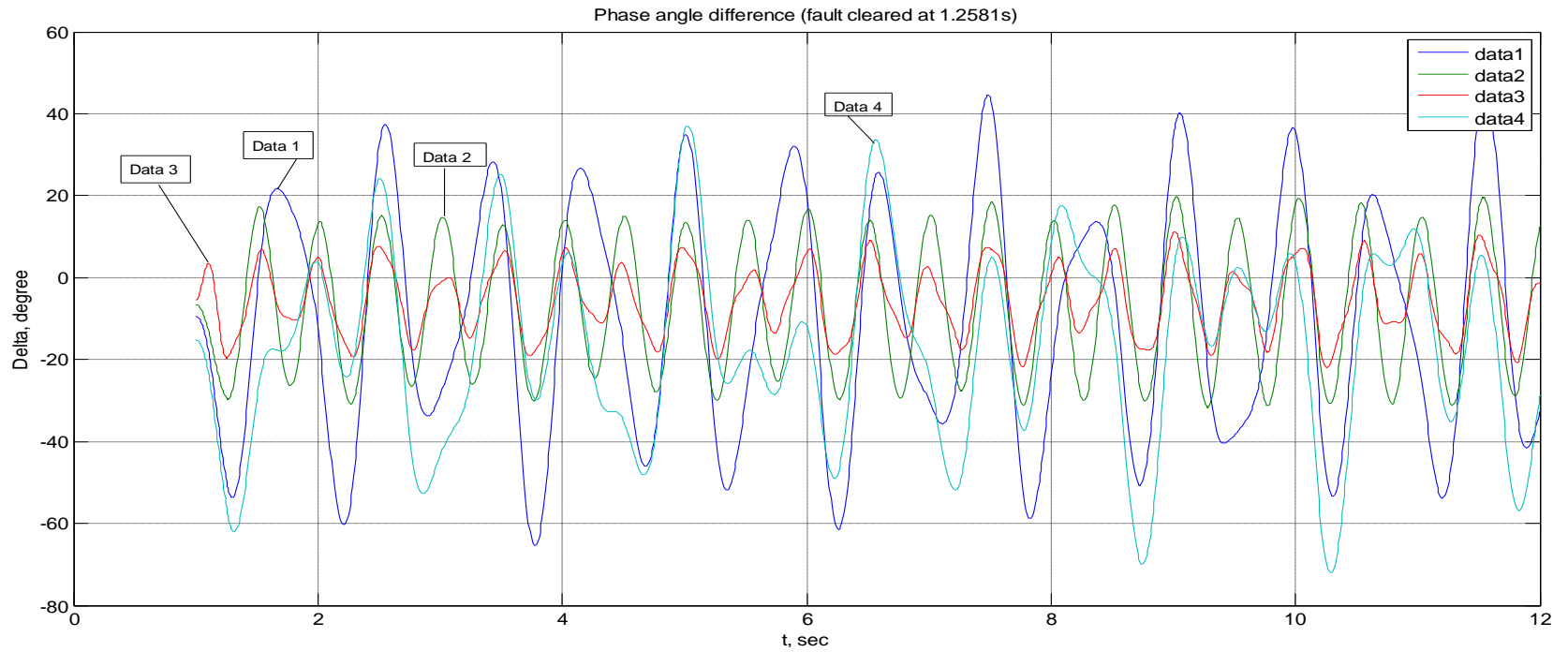
Lampiran 10-1



Keterangan gambar:

- Warna Biru tua = Data 1 (Generator Suppa)
- Warna Hijau = Data 2 (Generator Tello 150 kV)
- Warna merah = Data 3 (Generator Senggang)
- Warna biru mudah = Data 4 (Generator Tello 70 kV)

Lampiran 10-2



Keterangan gambar:

- | | |
|------------------|-----------------------------------|
| Warna Biru tua | = Data 1 (Generator Suppa) |
| Warna Hijau | = Data 2 (Generator Tello 150 kV) |
| Warna merah | = Data 3 (Generator Senggang) |
| Warna biru mudah | = Data 4 (Generator Tello 70 kV) |