

**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 Suselbar	55
4.2 Data saluran transmisi system	56
4.3 Data sistem tenaga listrik Suselbar	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.

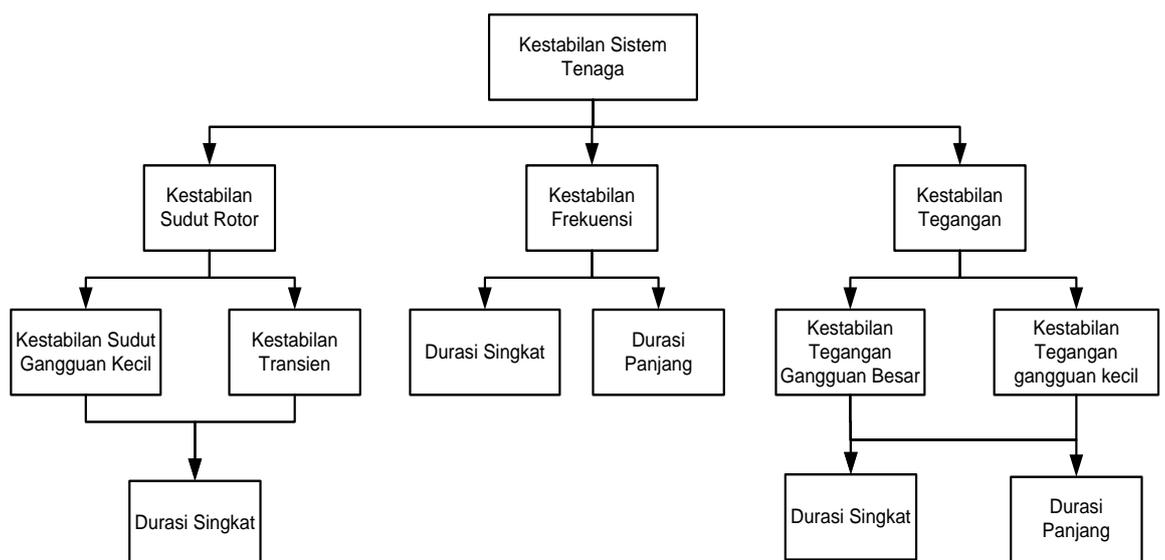
Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai sifat yang memungkinkan mesin bergerak sinkron dalam sistem untuk memberikan reaksinya terhadap gangguan dalam keadaan normal serta balik kembali ke keadaan semula bila keadaan menjadi normal (Stevenson, 1983:408)

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.

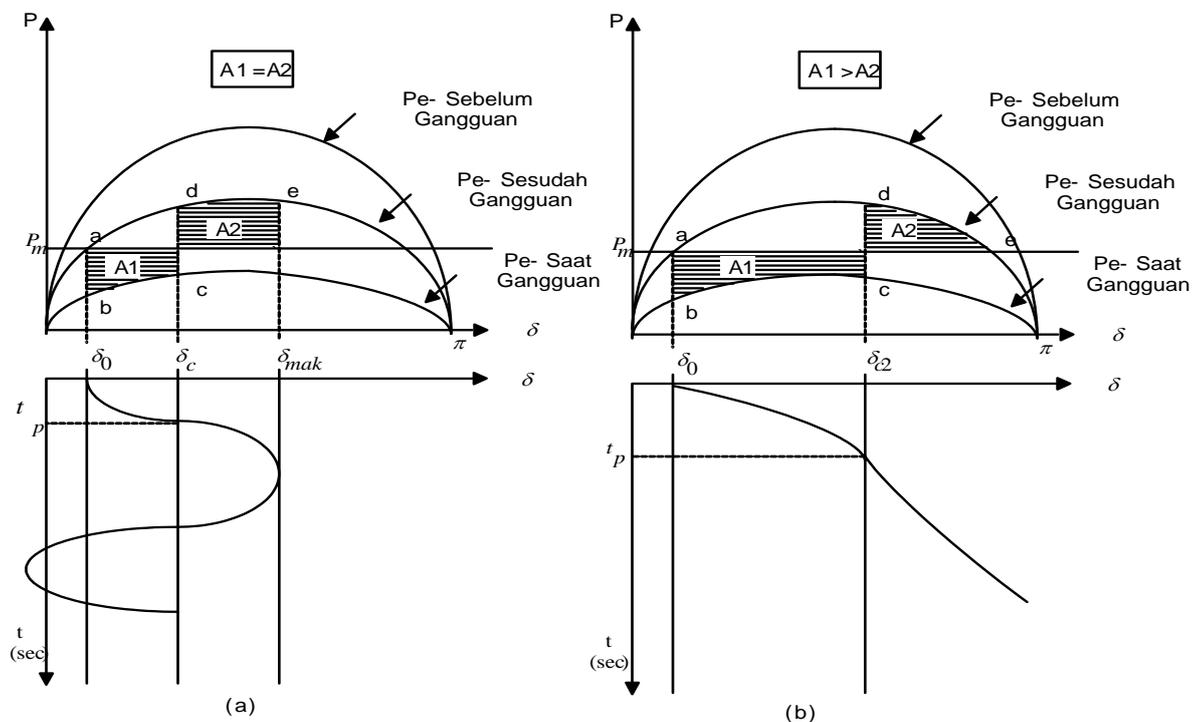
Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat digolongkan menjadi :

- 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)

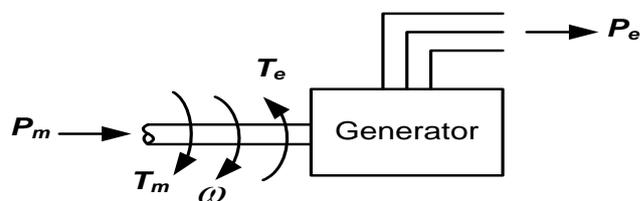
Semua studi-studi kestabilan dibuat dalam tiga asumsi yang mendasar untuk memudahkan dalam perhitungan yaitu :

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 :

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

atau,

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

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

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

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 :

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

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

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 :

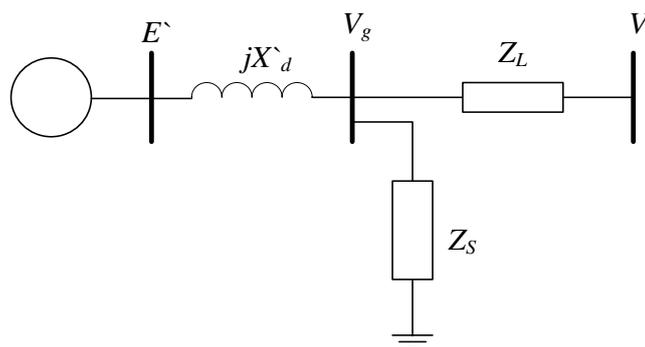
$$\frac{2}{\omega_s} \left(\frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} \right) \frac{d^2 (\delta_1 - \delta_2)}{dt^2} = \frac{P_{m1} H_2 - P_{m2} H_1}{H_1 + H_2} - \frac{P_{e1} H_2 - P_{e2} H_1}{H_1 + H_2} \quad (25)$$

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)

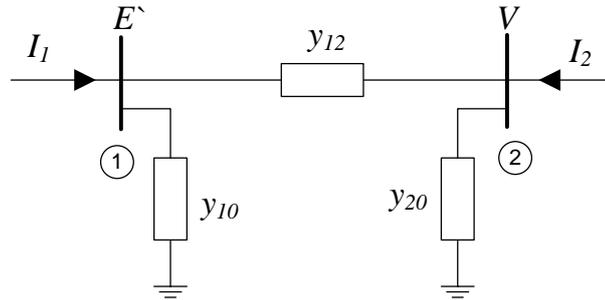
Rangkaian ekivalen dengan tegangan dinyatakan oleh titik 1, dan *infinite bus* oleh titik 2 yang ditunjukkan pada Gambar 5. Penuliskan persamaan *node* (titik simpul) diperoleh,

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

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

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

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

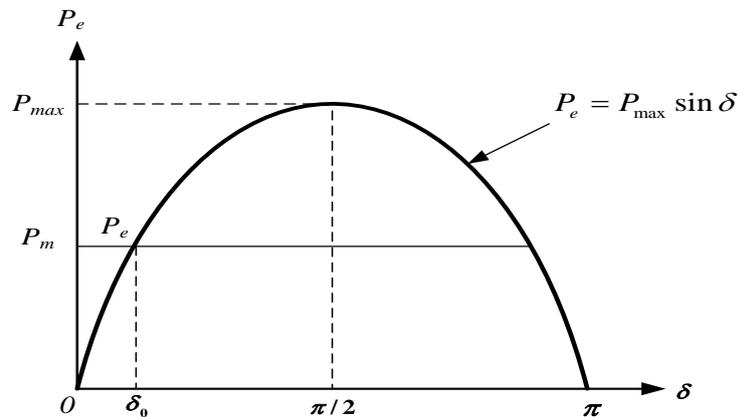
jika harga $\theta_{11} = \theta_{12} = 90^\circ$, dan $Y_{12} = B_{12} = \frac{1}{X_{12}}$, sehingga persamaan (31),

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,

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

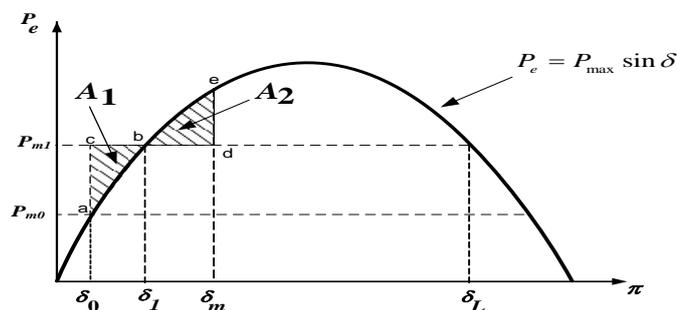
Jika pada persamaan (42) kecepatannya menjadi nol sesaat setelah gangguan, maka diperoleh kriteria luas sama sebagai berikut :

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

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 :

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

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

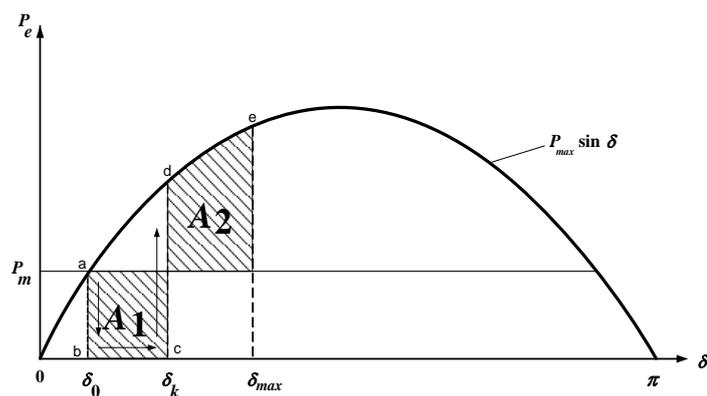
Persamaan (45) dikenal sebagai persamaan kriteria luas sama. persamaantersebut dapat kita gunakan untuk menentukan sudut dan waktu pemutusan gangguan yang berturut-turut disebut dengan sudut pemutusan kritis (*critical clearing angle*) dan waktu pemutusan kritis (*critical clearing time*).

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}

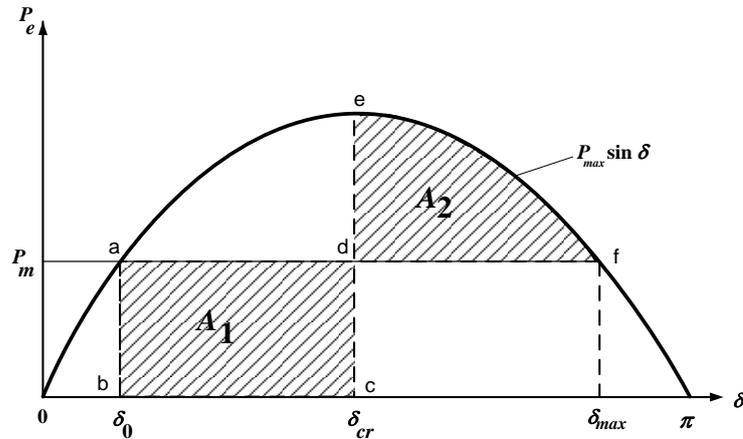
$$\delta_{max} = \pi - \delta_0 \quad \text{rad listrik} \quad (50)$$

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 :

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

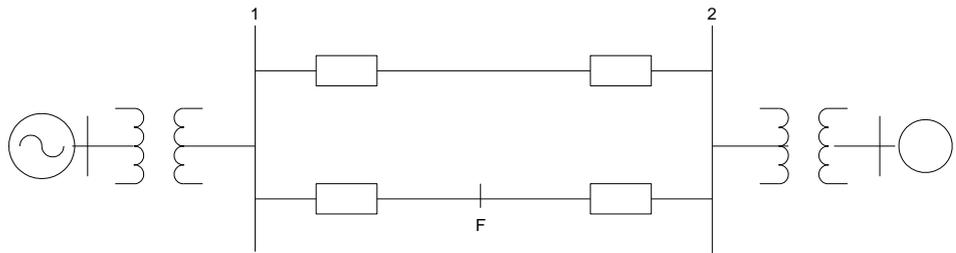
dengan mengintegrasikan sekali lagi didapatkan :

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

dan hubungannya 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.



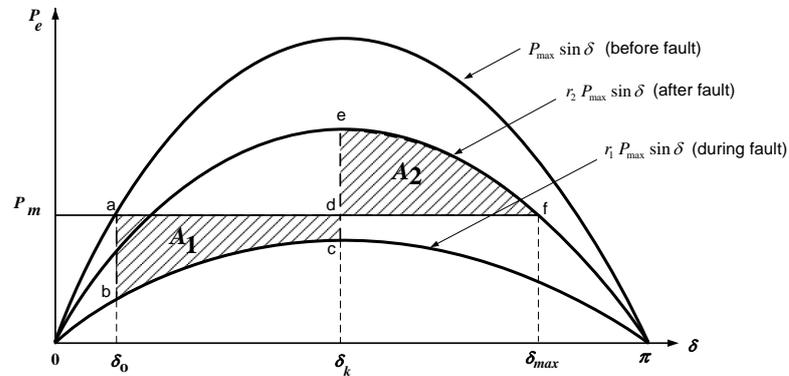
Gambar 11 Sistem satu mesin terhubung ke *infinite bus*, gangguan tiga fasa pada titik F (Saadat Hadi, 1999: 495)

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 :

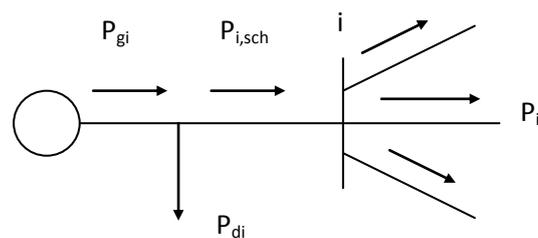
1. Setiap mesin sinkron direpresentasikan sebagai sumber tegangan konstan yang terhubung seri dengan reaktansi transien . Representasi ini mengabaikan efek saliensi dan mengasumsikan fluks bocor konstan.
2. Aksi governor diabaikan dan masukan daya mekanis diasumsikan selalu konstan selama keseluruhan 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 :

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

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

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

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

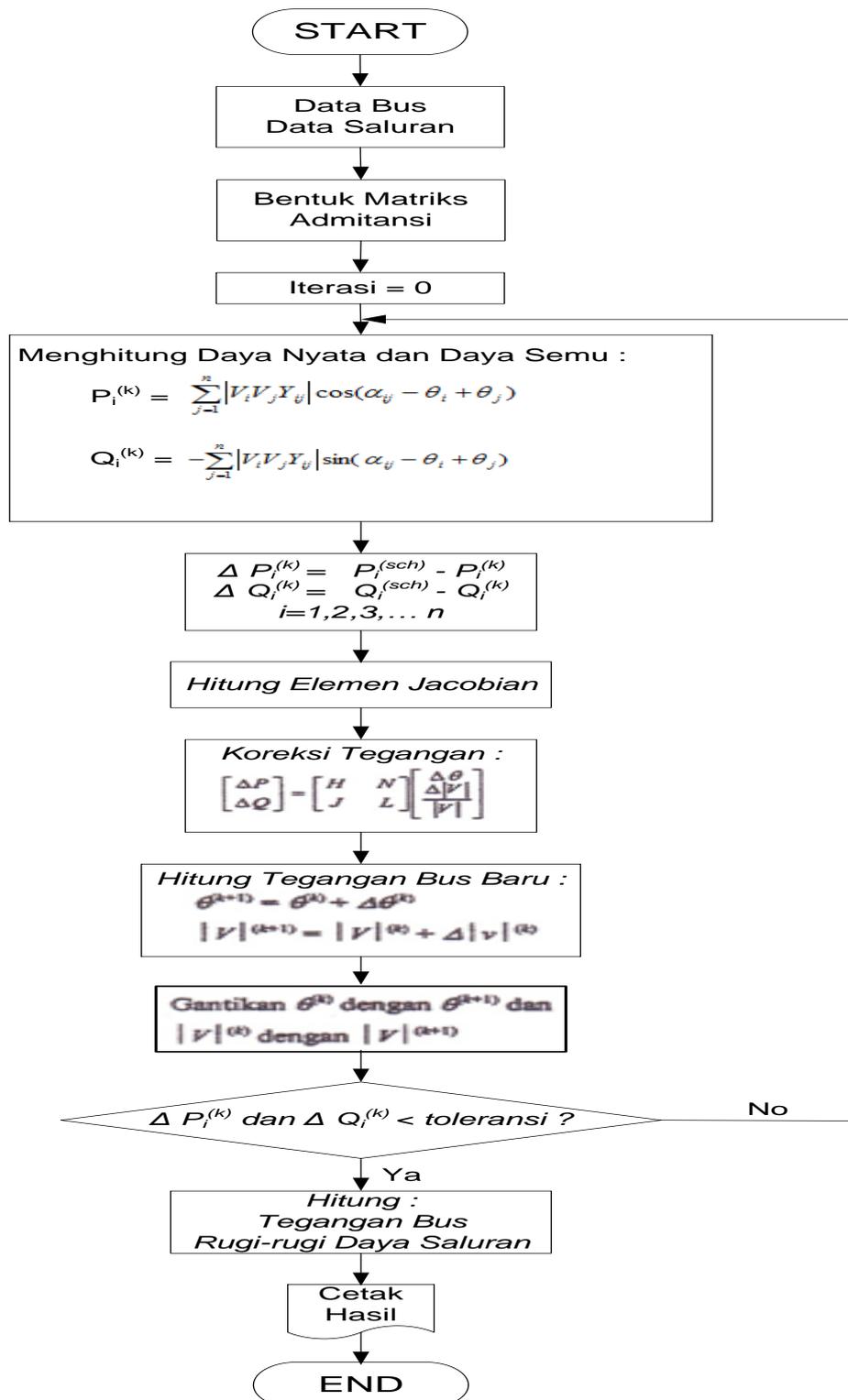
Nilai estimasi baru untuk tegangan bus adalah

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

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

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)

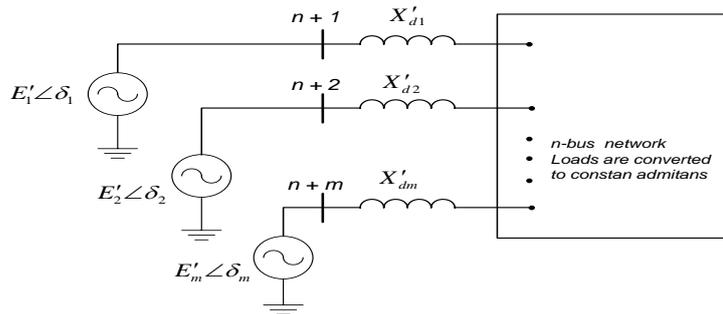
$$E' = V_g + jX'_d I_a$$

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)

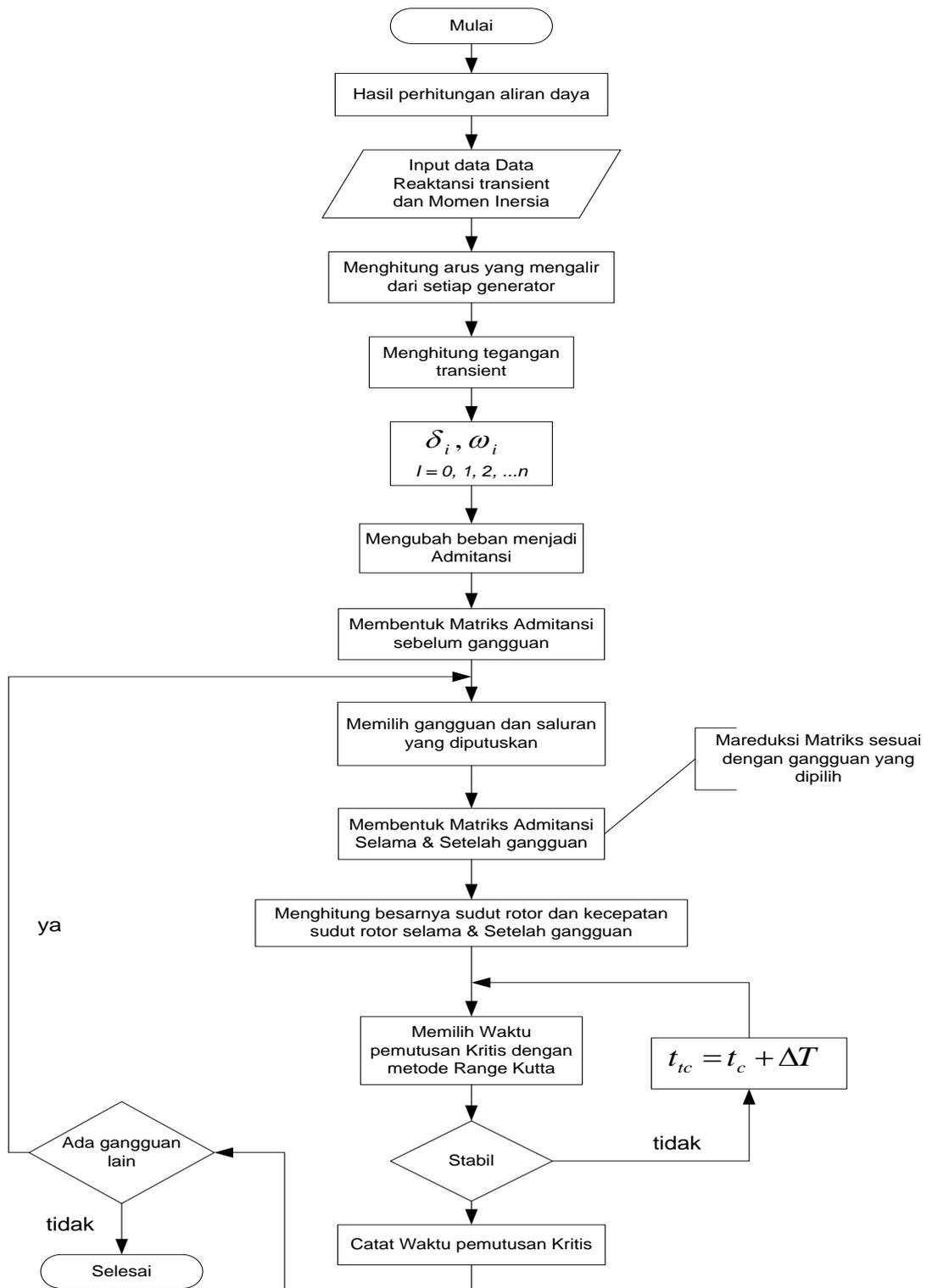
kedalam model variabel keadaan dinyatakan dengan :

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

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

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