



TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENENTUAN GENERATOR KRITIS PADA SISTEM
MULTIMESIN MENGGUNAKAN *MODAL ANALYSIS***

Yusran Muhammad Maududi
NRP 0711174000123

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra ST., MT.

DEPATERMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021



TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENENTUAN GENERATOR KRITIS PADA SISTEM
MULTIMESIN MENGGUNAKAN MODAL ANALYSIS**

Yusran Muhammad Maududi
NRP 0711174000123

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021



FINAL PROJECT - EE 184801

***DETERMINATION OF CRITICAL GENERATIONS IN
MULTI-MACHINE SYSTEMS USING MODAL ANALYSIS***

Yusran Muhammad Maududi
NRP 07111740000123

Supervisors
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa seluruh isi pada tugas akhir ini dengan judul “**Penentuan Generator Kritis Pada Sistem Multimesin Menggunakan *Modal analysis***” adalah merupakan hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan sumber materi yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 13 Agustus 2021

Yusran Muhammad Maududi
0711174000123

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

PENENTUAN GENERATOR KRITIS PADA SISTEM MULTIMESIN MENGGUNAKAN *MODAL ANALYSIS*

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I



Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
NIP. 197309271998031004

Dosen Pembimbing II



Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.
NIP. 198811082012121001

**SURABAYA
AGUSTUS, 2021**

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

PENENTUAN GENERATOR KRITIS PADA SISTEM MULTIMESIN MENGGUNAKAN MODAL ANALYSIS

Nama : Yusran Muhammad Maududi
Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Dosen Pembimbing II : Dr. Dimas Fajar Uman Putra ST., MT.

ABSTRAK

Dalam menjaga kelangsungan dan keandalan sistem sangat penting, maka kestabilan sistem tenaga juga harus diperhatikan. Pada sistem tenaga listrik, analisis stabilitas transien berperan penting dalam menjaga keselamatan operasional. Saat terjadi gangguan, maka sistem pengamanan akan bekerja untuk melindungi dan mengamankan sistem kelistrikan. Setelah gangguan dapat dihilangkan dan sistem beroperasi seperti semula, belum ada jaminan bahwa sistem akan kembali ke keadaan semula. Misalnya, apabila terjadi beban tambahan, maka generator di sistem akan menjadi tidak stabil. Maka dari itu, fokus penelitian ini adalah penentuan generator kritis menggunakan metode *modal analysis*. *Modal analysis* memberikan informasi tentang *eigenvalue* dan *participation factor*. Sistem dikatakan stabil jika seluruh nilai *eigenvalue* bernilai negatif, jika terdapat satu saja nilai *eigenvalue* positif sistem dikatakan tidak stabil. Setelah itu, hasil dari metode *modal analysis* dibandingkan dengan metode *Energy Index*. Dengan penentuan generator kritis yang tepat, diharapkan mampu memperbaiki kestabilan pada sistem tenaga. Sehingga sistem tetap stabil dan bertahan dari gangguan saat terjadi gangguan. Pada penelitian ini didapatkan hasil dari *modal analysis* sistem Anderson dan Fouad 3-generator 9-bus, generator kritis terletak di generator ke-2. Sementara pada sistem Anderson dan Fouad 4-generator 9-bus, generator kritis terletak di generator ke-2. Hasil pada *Energy Index* dalam penentuan generator kritis sama dengan *modal analysis* sistem Anderson dan Fouad 3-generator 9-bus, generator kritis terletak di generator ke-2. Sementara pada sistem Anderson dan Fouad 4-generator 9-bus, generator kritis terletak di generator ke-2.

Kata kunci: Generator kritis, Kestabilan Sistem, *Modal analysis*

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

DETERMINATION OF CRITICAL GENERATIONS IN MULTI-MACHINE SYSTEMS USING MODAL ANALYSIS

Student's Name : Yusran Muhammad Maududi
First Supervisor : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Second Supervisor : Dr. Dimas Fajar Uman Putra S.T., M.T.

ABSTRACT

In maintaining the continuity and reliability of the system is very important, the stability of the power system must also be considered. In electric power systems, transient stability analysis plays an important role in maintaining operational safety. When a disturbance occurs, the protection system will work to protect and secure the electrical system. Once the disturbance has been removed and the system operates as before, there is no guarantee that the system will return to its original state. For example, if there is an additional load, the generator in the system will become unstable. Therefore, the focus of this research is the determination of critical generators using the *modal analysis* method. *Modal analysis* provides information about *eigenvalue* and participation factors. The system is said to be stable if all the *eigenvalues* are negative, if there is only one positive *eigenvalue* the system is said to be unstable. After that, the results of the *modal analysis* method are compared with the Energy Index method. By determining the right critical generator, it is expected to be able to improve the stability of the power system. So that the system remains stable and survives disturbances when disturbances occur. In this study, the results obtained from the Anderson and Fouad 3-generator 9-bus *modal analysis* system, the critical generator is located in the 2nd generator. While in the Anderson and Fouad 4-generator 9-bus systems, the critical generator is located at the 2nd generator. The results on the Energy Index in determining the critical generator are the same as the Anderson and Fouad 3-generator 9-bus *modal analysis*, the critical generator is located in the 2nd generator. While in the Anderson and Fouad 4-generator 9-bus systems, the critical generator is located at the 2nd generator.

Key words: *Critical generator, Stability System, Modal Analysis*

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil ‘Alamin. Puji syukur Penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayahnya-Nya sehingga dapat menyelesaikan penelitian dengan judul “**Penentuan Generator Kritis pada Sistem Multimesin Menggunakan Modal Analysis**” dengan tepat waktu.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan S1 Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT, karena masih memberi kesempatan pada hamba-Nya yang satu ini untuk memperbaiki diri, menjadi hamba dan pribadi yang lebih baik.
2. Keluarga Penulis terutama Bapak Ir. R. M. Ikhlas Nurdin, Ibu Tri Lestari Iriani, Kakak Nuran Nabila, Mas Taufik Widyanugraha, dan Keponakan Kayisa Wisyasana Hanifa yang selalu memberikan *support* secara materiil maupun non-materiil.
3. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng., dan Bapak Dr. Dimas Fajar Uman Putra ST., MT., pembimbing yang telah memberikan waktu, ilmu, dan kesabarannya selama proses penyusunan penelitian.
4. Mbak Talitha Puspita Sari, dan Mas Isa Hafidz selaku kakak yang membimbing penulis dalam pengerjaan tugas akhir.
5. Dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan bimbingan selama penulis menempuh pendidikan di Teknik Elektro ITS.
6. Teman-teman e-57 yang saling berjuang dan memberi semangat satu sama lain dalam pengerjaan tugas akhir.
7. Teman-teman Gabut Cabut yang selalu menemani dan memberikan kebahagiaan sejak awal masa perkuliahan hingga saat ini.
8. Mas dan Mba penghuni dari DPR dan kantin untuk segala pesan moral yang telah disampaikan dan perbincangan selama masa perkuliahan berlangsung.

9. Seluruh teman-teman saya yang berasal dari berbagai departemen di ITS yang telah memberikan banyak pengalaman selama mengenyam bangku perkuliahan ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini, namun besar harapan penulis akan saran dari pembaca agar nantinya laporan tugas akhir ini dapat menjadi referensi yang berguna bagi penelitian selanjutnya.

Surabaya, 2021

Penulis

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
1.7 Relevansi	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA & DASAR TEORI	5
2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	5
2.2 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga	5
2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor	6
2.2.2 Kestabilan Frekuensi	9
2.2.3 Kestabilan Tegangan	9
2.3 Generator	10
2.3.1 Konstruksi Generator	11
2.3.2 Prinsip Generator	11
2.4 Generator Kritis	12
2.5 <i>Small Signal Stability</i>	12
2.6 Analisis Modal	15
2.6.1 State Space	16
2.6.2 Titik Keseimbangan	17
2.6.3 Linearisasi	17
2.6.4 <i>Eigenvalue</i>	18
2.6.5 <i>Eigenvector</i>	19
2.6.6 <i>Eigenvalue</i> dan Kestabilan	20
2.6.7 Participation Factor	20
2.7 Metode Fungsi Energi	21

BAB 3 PEMODELAN SISTEM	23
3.1 Persiapan Data Awal.....	23
3.1.1 Data Sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i>	23
3.1.2 Data Sistem Fouad dan Anderson <i>4-machine 9-bus</i>	25
3.2 Modal Analysis pada DigSilent Power Factory	28
3.2.1 Menggunakan <i>Modal analysis</i> pada DigSILENT Power Factory.....	29
BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS HASIL.....	33
4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan.....	33
4.2 Penentuan Generator Kritis Sistem Fouad dan Anderson 3- machine 9-bus.....	35
4.2.1 <i>Eigenvalue</i> Sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> 35	35
4.2.2 Hasil Participation Factor (Mode 00013).....	36
4.2.3 Perbandingan <i>Modal analysis</i> dengan Energy Index pada sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i>	37
4.3 Modal analysis Sistem Fouad dan Anderson 4-machine 9-bus 	39
4.3.1 <i>Eigenvalue</i> Sistem Fouad dan Anderson 4-machine 9- bus 39	39
4.3.2 Hasil Participation Factor (Mode 00018).....	40
4.3.3 Perbandingan <i>Modal analysis</i> dengan Energy Index pada sistem Fouad dan Anderson <i>4-machine 9-bus</i>	41
BAB 5 KESIMPULAN & SARAN	43
5.1 Kesimpulan	43
5.2 Saran.....	43
DAFTAR PUSTAKA	45
BIODATA PENULIS	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga	6
Gambar 2.2 Respon Sudut Rotor di Generator	8
Gambar 2.3 Konstruksi generator	10
Gambar 2.4 Oscilatory Instability Menggunakan Kontrol Eksitasi	13
Gambar 2.5 Sistem stabil dengan tegangan konstan.....	13
Gambar 2.6 Sistem Stabil Dengan Kontrol Eksitasi.....	14
Gambar 2.7 Non-Oscilatory Instability Dengan Tegangan Konstan....	14
Gambar 2.8 Jaringan area local	15
Gambar 3.1 Single Line Diagram Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus	23
Gambar 3.2 Single Line Diagram Sistem Anderson dan Fouad 4-Generator 9-Bus	26
Gambar 3.3 <i>Modal Analysis Toolbar</i>	29
Gambar 3.4 Basic Command Modal analysis.....	30
Gambar 3.5 Advance Option Modal analysis	31
Gambar 3.6 <i>Dialog Box Result of Modal Analysis</i>	32
Gambar 3.7 Hasil Modal Analysis.....	32
Gambar 4.1 Flowchart Penentuan Generaor Kritis.....	34
Gambar 4.2 Plot Eigenvalue Sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus	35
Gambar 4.3 Mode Bar Plot mode 00013	37
Gambar 4.4 Plot Eigenvalue Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus	39
Gambar 4.5 Mode Bar Plot Mode 00018.....	41

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Transmisi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus	24
Tabel 3.2 Data Tegangan dan Daya Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus	25
Tabel 3.3 Data saluran transmisi sistem Fouad dan Anderson 4-machine 9-bus.....	27
Tabel 3.4 Data Tegangan dan Daya Sistem Anderson dan Fouad 4-Generator 9-Bus	27
Tabel 4.1 Eigenvalue dengan damping ratio dibawah 5%.....	36
Tabel 4.2 Participation Factor Mode 00013.....	36
Tabel 4.3 Hasil Indeks Energi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus	38
Tabel 4.4 Hasil Modal analysis Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus	38
Tabel 4.5 Eigenvalue dengan damping ratio dibawah 5%.....	40
Tabel 4.6 Participation Factor Mode 00018.....	40
Tabel 4.7 Hasil Indeks Energi Sistem Anderson dan Fouad 4-Generator 9-Bus	42
Tabel 4.8 Hasil Modal analysis Sistem Anderson dan Fouad 4-Generator 9-Bus	42

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kestabilan merupakan hal yang sangat penting dan harus diperhatikan karena sangat berguna dalam menjaga kontinuitas dan keandalan sistem. Ketika sistem mengalami gangguan besar, misalnya hubung singkat pada saluran transmisi atau lepasnya generator besar dari sistem, maka perlu dilakukan studi kestabilan transien. Tujuan utama dari studi kestabilan transien adalah untuk memastikan bahwa sistem dapat mempertahankan sinkronisasinya pada kondisi transien setelah terjadinya gangguan besar secara tiba-tiba. Ketika sistem mengalami gangguan yang besar, terjadi perubahan kondisi kerja pada sistem dari kondisi awalnya menuju suatu kondisi baru. Periode transien merupakan periode singkat di mana terjadi perubahan dari kondisi lama sistem menuju suatu kondisi baru[1]. Misalnya, pada tiga fasa merupakan salah satu gangguan transien yang harus segera diatasi untuk mengatasi kehilangan sinkronisasi pada sistem agar tetap stabil. Jika gangguan diputus melebihi waktu kritisnya, maka sistem akan menjadi tidak stabil dan kehilangan sinkronisasinya[2]. Selanjutnya, pada saat penambahan beban generator terkadang tidak stabil pada saat itu bisa dikatakan generator kritis.

Seiring dengan bertambahnya beban dan terjadinya fluktuasi beban pada sistem kelistrikan di Indonesia oleh karena itu diperlukan studi kestabilan *small signal stability* dimana dapat melihat kestabilan sistem saat terjadi gangguan-gangguan kecil dengan menggunakan *modal analysis* kita bisa mendapatkan nilai-nilai dari *eigenvalue* sistem dimana berdasarkan nilai-nilai *eigenvalue* ini dapat dilihat karakteristik sistem dan kestabilan sistem tersebut. Stabilitas sinyal kecil (*small signal stability*) adalah kemampuan daya sistem untuk mempertahankan sinkronisme (tetap seimbang) ketika mengalami gangguan kecil. Dalam hal ini, gangguan dianggap kecil jika persamaan yang menggambarkan hasil respons sistem dapat dilinierisasi untuk tujuan analisis. Ketidakstabilan itu dapat menghasilkan dapat berupa dua bentuk yaitu peningkatan sudut generator rotor yang stabil karena kurangnya sinkronisasi torsi, atau osilasi rotor yang meningkatkan amplitudo karena kurangnya torsi redaman yang cukup. Gangguan kecil pada saat kondisi beban puncak, karena fenomena tidak dapat di amati pada *transient*

stability, dengan *modal analysis* dapat dicari sumber yang menyebabkan sistem tidak stabil sehingga mudah bagi seorang *dispatcher* untuk bisa *rescheduling* serta melakukan pengaturan daya. Setelah melakukan penentuan generator kritis menggunakan *modal analysis*, akan dilakukan perbandingan dengan indeks energi. Pada Tugas Akhir ini, metode *modal analysis* digunakan untuk mencari metode untuk penentuan generator kritis.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas pada Tugas Akhir ini adalah menentukan generator kritis dengan metode *modal analysis*. Sistem multimesin IEEE Fouad-Anderson 3 Mesin 9 Bus dan Sistem multimesin IEEE Fouad-Anderson 4 Mesin 9 Bus akan digunakan dalam tugas akhir ini. Selanjutnya akan dilakukan analisis dari hasil penentuan generator kritis menggunakan metode *modal analysis* lalu dibandingkan dengan *energy index*, Sehingga akan didapatkan metode paling optimal dan akurat untuk penentuan generator kritis.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Dapat memodelkan dan simulasi sistem multimesin IEEE Fouad-Anderson 3 Mesin 9 Bus dan Sistem multimesin IEEE Fouad-Anderson 4 Mesin 9 Bus
2. Mendapatkan generator kritis yang didapatkan dari metode *modal analysis*.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian akan dibatasi oleh hal-hal dibawah ini:

1. Tugas Akhir ini menggunakan *software DigSILENT power Factory 15.1*
2. Penentuan generator kritis hanya berdasarkan konsep pada metode *modal analysis*.
3. Hasil dari generator kritis dengan metode *modal analysis* dibandingkan dengan penentuan generator kritis dengan metode *energy index*.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Sebagai penunjang dan validasi dari pengerjaan Tugas Akhir ini diperlukan studi literatur melalui *paper*, jurnal, buku, dan media lain yang berfokus pada penentuan generator kritis pada sistem multimesin menggunakan analisis modal.

2. Pengumpulan Data dan Pemodelan Sistem

Untuk mendapatkan perhitungan generator kritis menggunakan sistem multimesin dengan metode analisis modal yang optimal, dan mampu untuk mengatasi permasalahan pada sistem yang telah ada saat ini. Maka diperlukan perancangan dan pemodelan sistem dengan memasukkan data-data penunjang serta formulasi dari perhitungan terkait.

3. Simulasi

Menyimulasikan dari hasil pemodelan Single Line Diagram sistem multimesin IEEE Fouad-Anderson 3 Mesin 9 Bus dan Sistem multimesin IEEE Fouad-Anderson 4 Mesin 9 Bus dengan metode analisis modal yang ada saat ini menggunakan software (DIGSILENT & MATLAB).

4. Analisis Hasil

Data yang didapatkan dari hasil simulasi akan dilakukan analisa untuk penentuan generator kritis menggunakan sistem multimesin dengan metode analisis modal untuk bisa digunakan di industry.

5. Kesimpulan

Setelah seluruh tahap sebelumnya selesai dilaksanakan, maka dilakukan pembuatan kesimpulan berdasarkan simulasi dan Analisa dari data yang diperoleh. Sebagai hasil akhir, laporan akan dituliskan dalam bentuk buku Tugas Akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dibagi menjadi lima bab yang terdiri dari:

Bab 1. Pendahuluan

Bab ini membahas mengenai latar belakang masalah, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi pada penelitian ini.

Bab 2. Tinjauan Pustaka

Bab ini membahas mengenai latar belakang masalah, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi pada penelitian ini.

Bab 3. Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan langkah-langkah untuk memperoleh generator kritis menggunakan metode analisis modal, selain itu diberikan data pendukung dari sistem multimesin IEEE Fouad-Anderson 3 Mesin 9 Bus dan Sistem multimesin IEEE Fouad-Anderson 4 Mesin 9 Bus.

Bab 4. Hasil dan Pembahasan

Bab ini membahas mengenai simulasi yang berupa nilai generator kritis untuk sistem multimesin IEEE Fouad-Anderson 3 Mesin 9 Bus dan Sistem multimesin IEEE Fouad-Anderson 4 Mesin 9 Bus dengan metode analisis modal.

Bab 5. Penutup

Bab ini membahas tentang kesimpulan dari keseluruhan tahapan dalam penelitian dan juga saran yang dapat digunakan sebagai masukan untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan topik tugas akhir ini.

1.7 Relevansi

Hasil dari Tugas Akhir ini diharapkan membantu memperoleh generator kritis dengan metode *modal analysis*. Selain itu juga bisa sebagai referensi penentuan generator kritis dengan sistem multimesin yang menggunakan metode *modal analysis* dan referensi penelitian serupa yang akan bisa dikembangkan dalam stabilitas transien pada sistem tenaga

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA & DASAR TEORI

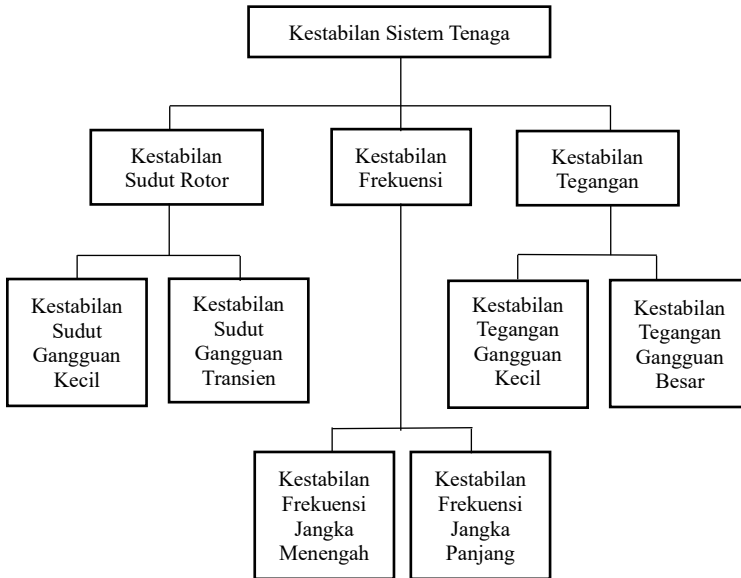
2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem merupakan salah satu poin penting dalam sistem tenaga listrik. Hal ini bertujuan agar kontinuitas dan reliabilitas sistem tetap terjaga serta mampu beroperasi dengan optimal. Berdasarkan definisinya, kestabilan merupakan kemampuan suatu sistem tenaga listrik, dengan kondisi awal tertentu, untuk mencapai kembali titik keseimbangannya setelah mengalami gangguan, baik gangguan kecil hingga gangguan besar[3]. Saat terjadi gangguan, kestabilan sistem akan sangat bergantung pada kondisi awal dari sistem dan sifat dari gangguan yang terjadi.

Pada kestabilan sistem tenaga yang menjadi perhatian adalah perilaku dari sistem setelah mengalami gangguan transien. Sistem yang dikatakan stabil akan mampu mempertahankan sinkronisasinya sampai akhir dari periode gangguan dimana sistem dapat mencapai kondisi tunak (*steady state*). Respons osilasi sistem tenaga dinyatakan stabil bila gangguan mengalami peredaman selama periode transien hingga mencapai kondisi tunak (*steady state*), namun apabila respon osilasi pada sistem tidak mengalami redaman atau tidak terredam maka sistem dinyatakan tidak stabil. Sistem yang baik adalah sistem yang dapat meredam osilasi saat terjadi gangguan kembali ke kondisi tunak. Gangguan bisa berupa gangguan kecil ataupun gangguan besar, pada gangguan kecil perubahan beban maupun perubahan pada operasi pembangkitan. Sistem harus mampu bekerja dengan baik dan memenuhi kebutuhan beban setelah terjadi perubahan beban. Sistem tenaga juga harus mampu menjaga sinkronisasinya setelah mengalami gangguan besar yang terjadi pada sistem, gangguan dapat berupa gangguan hubung singkat pada saluran, lepasnya generator besar maupun beban besar dari sistem, atau putusnya saluran yang menghubungkan dua subsistem.

2.2 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

Ada beberapa aspek yang memengaruhi kestabilan sistem tenaga[3]. Untuk mempermudah, kestabilan sistem tenaga listrik diklasifikasikan dalam beberapa bentuk, antara lain:



Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor mengacu pada kemampuan dari mesin-mesin sinkron yang terhubung dalam sistem terinterkoneksi untuk tetap sinkron dengan menjaga keseimbangan antara torsi mekanik dan torsi elektromekaniknya setelah terjadinya gangguan. Generator merupakan mesin listrik untuk mengonversikan daya mekanis P_m menjadi daya listrik P_e . Terdapat dua bagian penting pada generator yaitu medan (*field*) dan jangkar (*armature*). Medan terletak pada rotor sementara jangkar terletak pada stator. Suplai DC diberikan pada kumparan rotor dan menghasilkan medan magnet. Lalu, rotor diputar oleh *prime mover* (diesel, turbin uap, turbin air) sehingga menghasilkan medan magnet putar B_R dan menginduksi tegangan E_A di tiap fasa pada kumparan jangkar. Sinkronisme pada generator didefinisikan sebagai besarnya frekuensi listrik f_e yang dihasilkan berbanding lurus dengan kecepatan rotor n_m [2] sesuai persamaan di bawah ini:

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (2.1)$$

Besarnya E_A berbanding lurus dengan frekuensi listrik f_e yang dihasilkan.

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_C \Phi f_e \quad (2.2)$$

Dimana,

f_e = frekuensi listrik (Hz)

n_m = kecepatan medan magnet putar (sama dengan kecepatan rotor generator) (r/min)

P = jumlah kutub

Φ = fluks magnetik

N_C = konstruksi mesin

Apabila generator dalam keadaan tidak berbeban maka tidak ada arus yang mengalir pada jangkar. Oleh karena itu, E_A sama dengan tegangan fasa V_ϕ . Namun, saat beban *lagging* terhubung pada terminal generator, arus akan mengalir menuju kumparan jangkar dan membangkitkan tegangan stator E_{stat} .

$$V_\phi = E_A + E_{stat} \quad (2.3)$$

Batas kestabilan pada generator berbanding lurus dengan daya maksimum.

$$P_{max} = \frac{3V_\phi E_A}{X_S} \quad (2.4)$$

Gangguan pada sistem tenaga listrik terbagi menjadi dua yaitu gangguan kecil dan gangguan besar (transien).

a. Gangguan kecil

Pada gangguan kecil ini bergantung pada kondisi awal operasi sistem. Pada gangguan ini ketidakstabilan sistem disebabkan oleh dua hal, yaitu terjadinya peningkatan sudut rotor ketika keadaan mode tanpa isolasi dan tidak periodik. Gangguan kecil seperti perubahan beban secara terus-menerus namun sistem dapat menyesuaikan kondisi tersebut dan mampu mengirimkan daya maksimum menuju beban.

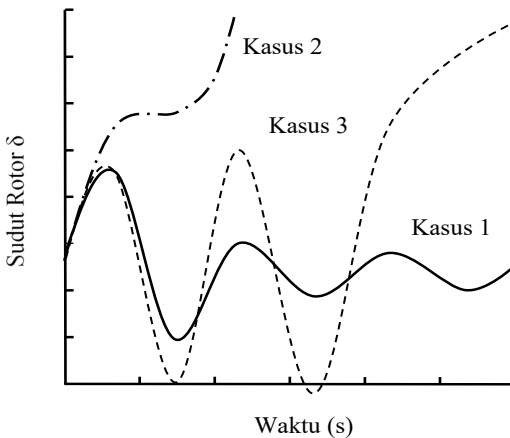
Pada kestabilan sudut rotor bergantung terhadap kondisi awal operasi sistem. Pada gangguan ini, ketidakstabilan mungkin terjadi

disebabkan olasi dan tidak periodic dan torsi redaman tidak mencukupi untuk meredam isolasi tersebut.

b. Gangguan besar

Pada gangguan ini, ketidakstabilan biasanya menghasilkan sudut rotor baru yang disebabkan torsi sinkronisasi tidak mampu mencukupi yang menyebabkan ketidakstabilan pada ayunan pertama. Gangguan besar (transien) seperti hubung singkat pada saluran transmisi, lepasnya beban atau generator dari sistem.

Gambar 2.2 merupakan respons sudut rotor generator saat mengalami gangguan. Kasus Pertama, sudut rotor meningkat hingga mencapai nilai maksimum dan kembali pada kondisi *steady state*. Kasus Kedua, sudut rotor terus-menerus meningkat hingga kehilangan sinkronnya. Kasus Ketiga, sudut rotor meningkat hingga mencapai nilai maksimum pada ayunan pertama dan kedua hingga akhirnya generator kehilangan sinkron saat ayunan ketiga (*multiswing instability*).



Gambar 2.2 Respon Sudut Rotor di Generator

Pada kestabilan sudut rotor dikategorikan menjadi dua, yaitu:

1. *Small-signal (small-disturbance) stability* adalah kemampuan sistem tenaga mempertahankan kondisi sinkronnya setelah mengalami gangguan kecil. Seperti

gangguan yang terjadi secara kontinuu pada sistem seperti perubahan beban ataupun pembangkitan. Ketidakstabilan ini terjadi akibat dua hal antara lain kurangnya torsi sinkronisasi dan kurangnya torsi damping.

2. *Transien stability* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi setelah mengalami gangguan besar untuk studi gangguan stabilitas transien memiliki kurun waktu 3-5 detik setelah terjadi gangguan untuk sistem yang sangat besar dengan ayunan antar wilayah yang dominan maka kurun waktu dapat diperpanjang menjadi 10-20 detik.

2.2.2 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi mengacu pada kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk menjaga agar frekuensi sistem tetap stabil setelah terjadinya gangguan yang mengakibatkan ketidakseimbangan antara daya yang dibangkitkan oleh pembangkit dengan daya yang diserap oleh beban. Kestabilan frekuensi berkaitan dengan ketidakmampuan dari respon peralatan listrik, koordinasi dari peralatan kontrol yang kurang baik, dan daya cadangan pembangkitan (*spining reserve*) yang kurang.

2.2.3 Kestabilan Tegangan

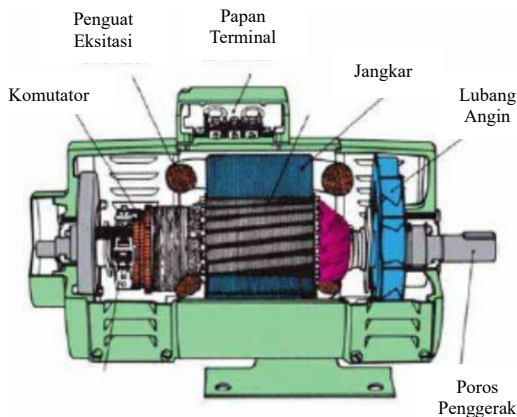
Kestabilan tegangan mengacu pada kemampuan sistem tenaga untuk menjaga keseimbangan antara kebutuhan beban dengan suplai pembangkitan agar tegangan pada semua bus dalam sistem dapat tetap berada pada nilai yang stabil setelah terjadinya gangguan. Gangguan ini dapat mengakibatkan kenaikan ataupun penurunan tegangan. Ketika terjadi kenaikan tegangan arus yang mengalir pada sistem tenaga meningkat sehingga menyebabkan rugi-rugi daya mengalami peningkatan. Hal ini menyebabkan pedeknya umur peralatan. Peningkatan tegangan disebabkan oleh eksitasi berlebihan pada generator, pengaturan beban kapasitif yang berlebihan, dan juga sambaran petir pada saluran transmisi.

Ketika terjadi penurunan tegangan disebabkan kurangnya eksitasi dari generator, jarak beban yang jauh dari sistem distribusi, dan jarak transmisi yang terlalu panjang. Salah satu faktor penyebab ketidakstabilan tegangan adalah ketika gangguan yang terjadi mengakibatkan kebutuhan daya reaktif melebihi kapasitas daya reaktif yang tersedia. Kestabilan tegangan dikelompokkan menjadi beberapa kategori yaitu:

1. Gangguan besar
Biasanya gangguan yang terjadi adalah hilangnya pembangkit dari suatu sistem, lepasnya generator, dan hubung singkat (short circuit).
2. Gangguan kecil
Gangguan kecil yang termasuk seperti kenaikan pada beban.

2.3 Generator

Generator listrik adalah sebuah alat yang memproduksi energi listrik dari sumber energi mekanik, biasanya dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Proses ini dikenal sebagai pembangkitan energi listrik. Walaupun generator dan motor mempunyai banyak kesamaan, tetapi motor adalah alat yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Sumber energi mekanik bisa berupa resprokat maupun turbin mesin uap, air yang jatuh melalui sebuah turbin maupun kincir air, mesin pembakaran dalam, turbin angin, udara di mampatkan. Sebelum hubungan antara magnet dan listrik ditemukan, generator menggunakan prinsip elektrostatik yang berkaitan dengan gaya yang dikeluarkan oleh medan listrik static terhadap objek bermuatan yang lain.



Gambar 2.3 Konstruksi generator

Generator terpasang satu poros dengan motor diesel, yang biasanya menggunakan generator sinkron (alternator) pada pembangkitnya. Generator sinkron terdiri dari dua bagian yaitu sistem medan magnet dan jangkar. Generator ini kapasitasnya besar, medan magnet berputar karena terleta pada rotor.

2.3.1 Konstruksi Generator

Konstruksi generator adalah sebagai berikut:

1. **Rangka stator** badan utama atau *body* generator yang terbuat dari baja kuat.
2. **Stator** adalah bagian yang menempel pada rangka generator dan terdapat lilitan stator yang mempunyai fungsi sebagai induksi gaya gerak listrik. Bahan stator terbuat dari ferromagnetic yang disusun berlapis dan ada alur untuk lilitan stator.
3. **Rotor** adalah komponen generator yang berputar, terdapat kutub magnet dengan lilitan yang terbuat dari tembaga.
4. **Slip ring** berbentuk menyerupai cincin terdapat dua buah dan ikut berputar dengan rotor dan poros generator. Bahan utamanya terbuat dari tembaga atau kuningan. Komponen inilah yang mempunyai peran untuk mentransfer listrik dari motor.
5. **Komutator** berfungsi sebagai penyearah mekanik yang bersama-sama dengan sikat-sikat membuat suatu Kerjasama yang disebut komutasi.
6. **Jangkar** digunakan dalam generator arus yang searah alah berbentuk silinder yang diberi alur-alur pada permukaannya untuk tempat melilitkan kumparan kumparan tepat terbentuknya GGL induksi.

2.3.2 Prinsip Generator

Generator listrik merupakan perangkat yang mengubah energi mekanik yang diperoleh dari sumber lain menjadi energi listrik sebagai outputnya. Penting untuk dipahami bahwa generator sebenarnya tidak 'menciptakan' energi listrik. Sebagai gantinya, ia menggunakan energi mekanis yang dipasok untuk mengerjakan muatan listrik yang ada di kawat gulungannya melalui sirkuit listrik eksternal. Aliran muatan listrik ini merupakan arus listrik keluaran yang dipasok oleh generator. Mekanisme ini bisa dipahami dengan mempertimbangkan generator yang ada pada pompa air, yang menyebabkan aliran air tapi sebenarnya tidak

‘menciptakan’ air yang mengalir melewatinya. Prinsip kerja generator sesuai dengan hukum Lens, yaitu arus listrik yang diberikan pada stator akan menimbulkan momen elektromagnetik yang bersifat melawan putaran rotor sehingga menimbulkan EMF pada kumparan rotor. Tegangan EMF ini akan menghasilkan suatu arus jangkar. Jadi diesel sebagai prime mover akan memutar rotor generator, kemudian rotor diberi eksitasi agar menimbulkan medan magnet yang berpotongan dengan konduktor pada stator dan menghasilkan tegangan pada stator. Karena ada dua kutub yang berbeda, utara dan selatan, maka tegangan yang dihasilkan pada stator adalah tegangan bolak-balik. Generator AC bekerja dengan element diam dan rotor yang merupakan elemen berputar dan terdiri dari belitan-belitan medan. Pada generator AC jangkarnya diam sedangkan medan utamanya berputar dan lilitan jangkarnya dihubungkan dengan dua cincin geser.

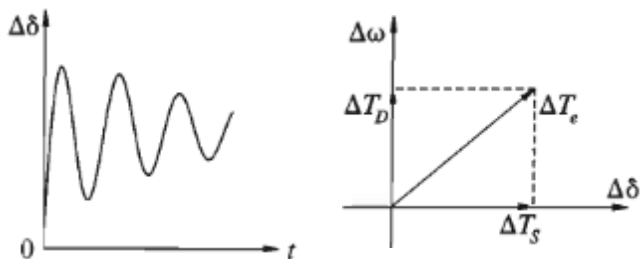
2.4 Generator Kritis

Pengertian generator adalah sebuah mesin yang dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Generator menurut hukum Faraday yaitu apabila suatu penghantar diputar dalam sebuah medan magnet sehingga memotong garis gaya magnet maka pada ujung penghantar tersebut akan timbulkan GGL (Garis Gaya Listrik) dengan satuan Volt. Generator kritis adalah generator yang memiliki potensi paling besar untuk kehilangan sinkron saat terjadi gangguan di suatu titik tidak stabil ketika terjadi penambahan maupun pelepasan beban secara tiba-tiba akibat gangguan 3 fasa.

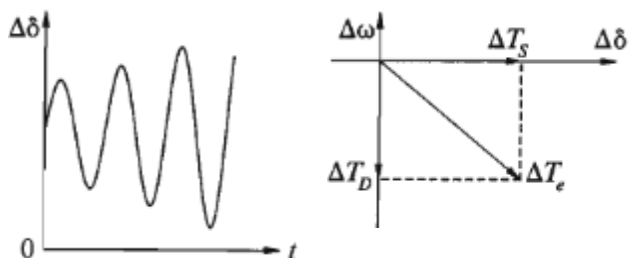
2.5 *Small Signal Stability*

Small signal stability adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkronnya setelah mengalami gangguan kecil. Seperti gangguan yang terjadi secara kontiniu pada sistem seperti perubahan beban ataupun pembangkitan. Pada konteks ini gangguan di pertimbangkan sebagai gangguan kecil jika persamaan yang merupakan respon dari sistem dapat dilinierisasi untuk tujuan analisis. Ketidakstabilan pada *small signal stability* dapat berupa kenaikan konstan pada sudut rotor generator dikarenakan kurangnya torsi sinkronisasi atau dapat berupa osilasi rotor dan kenaikan amplitudo karena kurangnya torsi redaman. Dewasa ini permasalahan *small signal stability* biasanya di karenakan kurangnya redaman osilasi sistem. Respon dari sistem untuk gangguan kecil bergantung pada banyak faktor termasuk dari kondisi

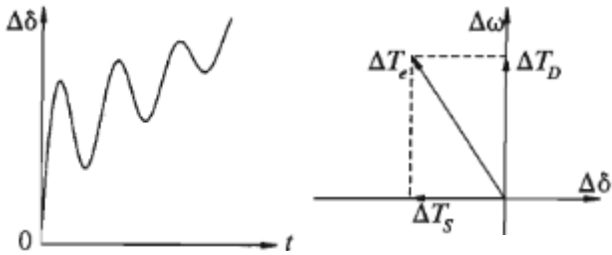
awal operasinya, kekuatan saluran transmisi dan kontrol eksitasi generator. Tanpa adanya *automatic voltage regulator* ketidakstabilan yang dikarenakan oleh kurangnya torsi sinkronisasi menyebabkan ketidakstabilan non-osilasi. Sedangkan dengan adanya *automatic voltage regulator* gangguan kecil menyebabkan terjadinya ketidakstabilan osilasi yang dapat di ilustrasikan seperti gambar 2.4-2.7:



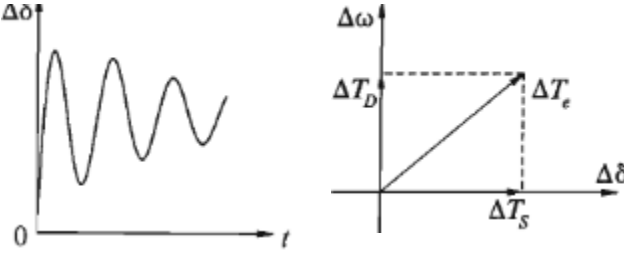
Gambar 2.5 Sistem stabil dengan tegangan konstan



Gambar 2.4 Oscillatory Instability Menggunakan Kontrol Eksitasi



Gambar 2.7 Non-Oscillatory Instability Dengan Tegangan Konstan



Gambar 2.6 Sistem Stabil Dengan Kontrol Eksitasi

Gambar 2.4 merupakan respon sistem tegangan konstan yang stabil dengan nilai torsi redaman dan torsi sinkronisasi bernilai positif. Gambar 2.5 merupakan respon sistem tenaga yang tidak stabil dengan menggunakan tegangan konstan dengan nilai torsi redaman positif sedangkan torsi sinkronisasi bernilai negatif. Gambar 2.6 merupakan respon sistem tenaga yang tidak stabil dengan menggunakan kontrol eksitasi dimana nilai torsi redaman positif sedangkan torsi sinkronisasi bernilai negatif. Gambar 2.7 merupakan respon sistem tenaga yang tidak stabil dengan menggunakan kontrol eksitasi dimana nilai torsi redaman negatif sedangkan torsi sinkronisasi bernilai positif.

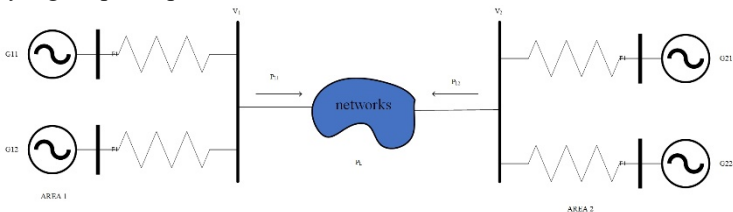
Perubahan pada sistem tenaga seperti perubahan tegangan, arus, dan aliran daya antara area yang berbeda. Sistem tenaga yang besar akan memiliki mode osilasi elektromekanikal yang dominan pada saat terjadi gangguan. Mode osilasi elektromekanika di klasifikasikan berdasarkan sebagai berikut:

1. *Mode Inter-area* pada frekuensi 0.1-0.8 Hz
 Generator dengan *mode local area* yang sama juga dapat

berosilasi terhadap generator *mode local area* lainnya. Jika generator di area yang berbeda dihubungkan melalui saluran transmisi jarak jauh, generator *inter-area* terhubung secara lemah pada sistem. Untuk *mode inter-area*, yang terdiri dari beberapa *mode local area* yang dimana ketika terjadi *swing* mengakibatkan *mode local area* yang lain terimbas terutama pada parameter frekuensinya. Mode ini dapat muncul saat terjadi gangguan pada saluran yang menghubungkan kedua area pembangkitan ini atau pada saluran transmisi yang di matikan untuk keperluan pemeliharaan.

2. *Mode Local area* pada frekuensi 1-2 Hz

Mode ini dapat muncul saat terjadi gangguan yang letaknya dekat dengan area generator tersebut. Generator yang berdekatan di area yang sama terhubung kuat dari sudut pandang listrik. Osilasi antara generator berosilasi pada frekuensi yang sama, yang relative lebih tinggi. Sebuah mode dimana hanya beberapa generator local yang berpartisipasi dalam osilasi.



Gambar 2.8 Jaringan area local

Pada gambar 2.8 menunjukkan generator yang saling berhubungan dengan generator lain melalui jaringan. Dalam sistem seperti itu, sinkronisasi antara generator di dalam area terjadi secara bersamaan dengan diantara area itu sendiri.

2.6 Analisis Modal

Analisis modal atau bisa disebut dengan *modal analysis* yaitu untuk menentukan berbagai macam parameter yang mempengaruhi respon pada sistem. Analisis modal, atau analisis stabilitas sinyal kecil, mengacu pada kemampuan sistem untuk menahan gangguan kecil di sekitar titik ekuilibrium tanpa mencapai ketidakstabilan atau menampilkan osilasi yang berkelanjutan[4]. Ini adalah masalah penting

dalam sistem nyata karena osilasi yang berkelanjutan dapat menyebabkan kegagalan mekanis pada unit pembangkit dan membuat sistem rentan hingga kehilangan stabilitas. analisis modal dapat juga disebut sebagai *analysis small signal stability*. Dengan metode analisis modal akan mendapatkan generator yang tidak stabil ketika penambahan beban.

2.6.1 State Space

Karakteristik dari sistem dinamis seperti sistem tenaga dapat dideskripsikan sebagai persamaan diferensial dimana dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{x}=f(x,u,t) \tag{2.5}$$

dimana,

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$$

x adalah sebagai *state vector* dan x_i sebagai *state variable*, sedangkan u adalah sebagai masukan sistem. Waktu dinotasikan sebagai t dan *state variable* yang berhubungan dengan waktu di notasikan sebagai \dot{x} jika turunan dari *state variable* sistem tidak merupakan persamaan yang berhubungan dengan waktu maka sistem dapat dikatakan *autonom* persamaan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{x}=f(x,u) \tag{2.6}$$

Sedangkan untuk keluaran dari sistem dimana kita dapat melihatnya dari sistem dapat juga dinotasikan dalam bentuk *state variable* dan *input variable*:

$$y=g(x,u) \tag{2.7}$$

state variable x meliputi kecepatan rotor, sudut rotor dan semua *variable* yang ada pada generator, seperti pada contoh berikut:

$$x = \begin{bmatrix} \delta_{gen1} \\ \delta_{gen2} \\ \omega_{gen1} \\ \omega_{gen2} \end{bmatrix}$$

Jumlah dari state variable bergantung pada model yang digunakan untuk merepresentasikan generator serta banyaknya generator pada sistem, namun pada mode electromekanikal variable yang sangat berpengaruh adalah surut rotor δ_i dan kecepatan sudut rotor dari generator ω_i .

State variable y meliputi variable keluaran dari sistem seperti tegangan pada bus u_i sudut tenggangannya θ_i .

$$y = \begin{bmatrix} U_{Bus1} \\ U_{Bus2} \\ \theta_{Bus1} \\ \theta_{Bus2} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

2.6.2 Titik Keseimbangan

Titik keseimbangan adalah titik dimana semua turunan x_1, x_2, \dots, x_n bernilai nol. Dimana dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$f(x_0) = 0 \quad (2.8)$$

Dimana x_0 adalah state vector x pada titik keseimbangan.

2.6.3 Linearisasi

Untuk mendapatkan permormasi *small signal stability* yang akan diperhatikan adalah sistem yang harus di linearisasi pada titik ekuilibriumnya dan stabilitas dapat dilihat dari nilai *eigenvalue* yang didapatkan setelah sistem di linierisasi sebagai berikut:

$$\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (2.9)$$

state diasumsikan diberikan gangguan sebagai berikut:

$$x = x_0 + \Delta x \quad u = u_0 + \Delta u$$

Dimana Δ merupakan perubahan kecil, sehingga didapatkan state baru sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= x_0 + \Delta x \\ \dot{x} &= f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \end{aligned} \quad (2.10)$$

Karena gangguan dianggap kecil fungsi $f(x, u)$ dapat di tuliskan dalam bentuk deret Taylor dengan mengabaikan orde kedua dan selanjutnya dari Δx dan Δu sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i0} + \Delta x_i = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \\ \dot{x}_i &= f_i(x_0, u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n \\ &\quad + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \end{aligned}$$

Karena $\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0$, didapatkan f

$$\Delta \dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r$$

Sehingga bentuk *state space* yang telah di linearisasi di titik ekuilibrium dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (2.11)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (2.12)$$

2.6.4 Eigenvalue

Eigenvalue adalah sebuah bilangan skalar dari sebuah matrix A yang dapat menjadi suatu karakteristik dari sebuah matriks *eigenvalue* dinotasikan sebagai λ dimana *eigenvalue* atau biasa juga disebut dengan akar ciri atau merupakan suatu nilai yang dapat menunjukkan seberapa besar pengaruh suatu variable terhadap pembentukan karakteristik sebuah matriks, *eigenvalue* didapatkan berdasarkan persamaan:

$$A\phi = \lambda\phi \quad (2.13)$$

Berdasarkan persamaan diatas, nilai *eigenvalue* didapatkan dari:

$$(A - \lambda I) \phi = 0 \quad (2.14)$$

Karena $\phi \neq 0$ maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (2.15)$$

Keterangan,

A = Matriks $n \times n$

I = Matrik identitas $n \times n$

Eigenvalue dapat berupa bilangan *real* atau kompleks. Jika matriks A adalah *real* maka nilai *eigenvalue* yang akan muncul dapat berupa bilangan kompleks.

2.6.5 *Eigenvector*

Untuk setiap nilai *eigenvalue* λ , n -kolom vector Φ disebut dengan *eigenvector* kanan dari matriks A yang berhubungan dengan nilai *eigenvalue* λ sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$A\Phi_i = \lambda_i \Phi_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2.16)$$

Eigenvector kanan memiliki bentuk sebagai berikut

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} \\ \Phi_{2i} \\ \vdots \\ \Phi_{ni} \end{bmatrix}$$

Karena persamaan $(A - \lambda I) \Phi_i$ adalah homogen, $k\Phi_i$ juga merupakan solusi, *eigenvector* yang ditentukan hanya oleh faktor pengali skalar atau dapat ditulis sebagai berikut:

$$\psi_i A = \lambda_i \psi_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2.17)$$

ψ_i disebut dengan *eigenvector* kiri yang berhubungan dengan nilai

eigenvalue. *Eigenvector* kiri memiliki bentuk sebagai berikut:

$$\psi_i = [\psi_{i1} \psi_{i2} \dots \psi_{i3}]$$

2.6.6 *Eigenvalue* dan Kestabilan

Karakteristik suatu mode yang berdomain waktu pada sistem berdasarkan *eigenvalue* λ adalah sesuai dengan persamaan $e^{\lambda t}$ sehingga sistem dapat ditentukan kestabilannya berdasarkan *eigenvalue* dengan ketentuan sebagai berikut:

- a. *Eigenvalue real* berhubungan dengan mode non-osilasi. Nilai *real* negatif dari *eigenvalue* menunjukkan mode penurunan atau *decaying mode*. Semakin besar magnitudenya semakin cepat. Nilai *real* positif dari *eigenvalue* menunjukkan ketidakstabilan sistem.
- b. *Eigenvalue* kompleks muncul dalam bentuk pasangan konjungasi, tiap nilai berhubungan dengan mode osilasi. Nilai *real* dari *eigenvalue* kompleks memberikan informasi tentang redaman sedangkan bagian imajiner memberikan informasi tentang frekuensi osilasi. Nilai negatif dari bagian *real* menunjukkan osilasi yang teredam sedangkan nilai positif menunjukkan osilasi yang amplitudonya terus meningkat. *Eigenvalue* kompleks di berikan sebagai berikut:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (2.18)$$

Dimana frekuensi osilasi dalam Hz didapatkan:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.19)$$

Dan *damping ratio* didapatkan berdasarkan:

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (2.20)$$

2.6.7 *Participation Factor*

Participation factor digunakan untuk menentukan *state variable* atau generator mana yang sangat berpengaruh terhadap suatu mode atau terhadap suatu nilai *eigenvalue*. Namun sebelum memberikan informasi *state variable* mana yang memerikan kontribusi terhadap nilai *eigenvalue*.

Participation factor merupakan kombinasi dari *eigenvector* kanan dan kiri yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P = [P_1 P_2 \dots P_n] \quad (2.21)$$

dengan,

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ P_{2i} \\ \vdots \\ P_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \psi_{i1} \\ \phi_{2i} \psi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \psi_{in} \end{bmatrix}$$

2.7 Metode Fungsi Energi

Fungsi energi merupakan gabungan dari perubahan beberapa energi pada generator yaitu energi kinetik, energi potensial, energi magnetik serta energi disipasi namun dalam hal ini energi disipasi dapat diabaikan karena tidak dapat dihitung[9].

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \hat{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_i^S) \\ & - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^S) \right. \\ & \left. - \int_{\theta_j^S + \theta_j^S}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \right] \end{aligned} \quad (2.22)$$

Persamaan (2.22) terdiri dari empat persamaan perubahan energi yaitu:

1. Perubahan Energi Kinetik Rotor

$$V_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \hat{\omega}_i^2 \quad (2.23)$$

2. Perubahan Energi Potensial Rotor

$$V_p = \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_i^S) \quad (2.24)$$

3. Perubahan Energi Magnetik yang Tersimpan

$$V_m = - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j B_{ij} (\cos(\theta_i - \theta_j) - \cos(\theta_{ij} - \theta_{ij}^S)) \quad (2.25)$$

4. Perubahan Energi Disipasi

$$\int_{\theta_i^S + \theta_j^S}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \quad (2.26)$$

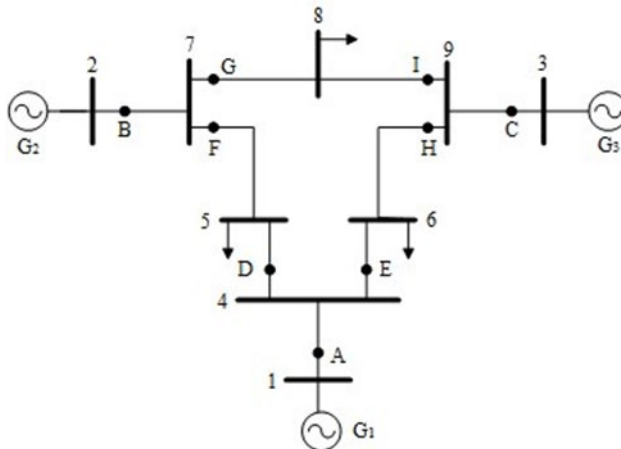
BAB 3 PEMODELAN SISTEM

3.1 Persiapan Data Awal

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dan *4-machine 9-bus*. Diasumsikan bahwa setiap saluran transmisi terdiri atas saluran ganda dan terjadi gangguan tiga fasa(seimbang) pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Data sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dan *4-machine 9-bus* kemudian bisa digunakan untuk menentukan generator kritis atau *critical generator*.

3.1.1 Data Sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus*

Untuk sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus*, telah ditentukan 9 titik lokasi terjadinya gangguan. Gangguan yang terjadi berupa gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. *Single line diagram* dari sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* beserta titik lokasi gangguan dapat dilihat pada gambar 3.1:



Gambar 3.1 Single Line Diagram Sistem Anderson dan Fouad
3-Generator 9-Bus

Keterangan:

- A : titik gangguan antara bus 1 dan bus 4
- B : titik gangguan antara bus 2 dan bus 7
- C : titik gangguan antara bus 3 dan bus 9
- D : titik gangguan antara bus 4 dan bus 5
- E : titik gangguan antara bus 4 dan bus 6
- F : titik gangguan antara bus 5 dan bus 7
- G : titik gangguan antara bus 7 dan bus 8
- H : titik gangguan antara bus 6 dan bus 9
- I : titik gangguan antara bus 8 dan bus 9

Spesifikasi data saluran transmisi dan data bus sistem dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Data Transmisi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus

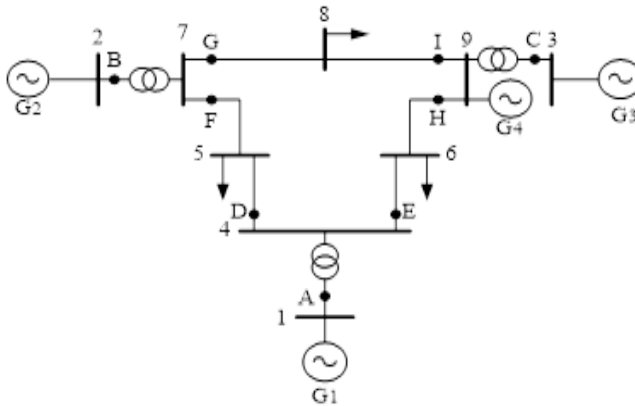
No.	Line	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging Susceptance (p.u.)
1	1-4	0,0000	0,0576	0,0000
2	2-7	0,0000	0,0625	0,0000
3	3-9	0,0000	0,0586	0,0000
4	4-5	0,0100	0,0850	0,0880
5	4-6	0,0170	0,0920	0,0790
6	5-7	0,0320	0,1610	0,1530
7	6-9	0,0390	0,1700	0,1790
8	7-8	0,0085	0,0720	0,0745
9	8-9	0,0119	0,1008	0,1045

Tabel 3.2 Data Tegangan dan Daya Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus

No. Bus	Tegangan Bus (p.u)	<i>Power Generation</i>		<i>Load</i>	
		P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1,040	200,00	0,00	0,00	0,00
2	1,025	163,00	0,00	0,00	0,00
3	1,025	85,00	0,00	0,00	0,00
4	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,000	0,00	0,00	125,00	50,00
6	1,000	0,00	0,00	90,00	30,00
7	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1,000	0,00	0,00	100,00	35,00
9	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00

3.1.2 Data Sistem Fouad dan Anderson 4-machine 9-bus

Untuk sistem Fouad dan Anderson 4-machine 9-bus, telah dtentukan 9 titik lokasi terjadi gangguan. Gangguan yang terjadi berupa gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. *Single line diagram* dari sistem Fouad dan Anderson 4-machine 9-bus beserta titik lokasi gangguan dapat dilihat pada gambar 3.2



Gambar 3.2 Single Line Diagram Sistem Anderson dan Fouad
4-Generator 9-Bus

Keterangan:

- A : titik gangguan antara bus 1 dan bus 4
- B : titik gangguan antara bus 2 dan bus 7
- C : titik gangguan antara bus 3 dan bus 9
- D : titik gangguan antara bus 4 dan bus 5
- E : titik gangguan antara bus 4 dan bus 6
- F : titik gangguan antara bus 5 dan bus 7
- G : titik gangguan antara bus 7 dan bus 8
- H : titik gangguan antara bus 6 dan bus 9
- I : titik gangguan antara bus 8 dan bus 9

Spesifikasi data saluran transmisi dan data bus sistem dapat dilihat pada tabel 3.3 dan tabel 3.4 berikut ini.

Tabel 3.3 Data saluran transmisi sistem Fouad dan Anderson 4-machine 9-bus

No.	Line	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging Susceptance (p.u.)
1	1-4	0,0000	0,0576	0,0000
2	2-7	0,0000	0,0625	0,0000
3	3-9	0,0000	0,0586	0,0000
4	4-5	0,0100	0,0850	0,0880
5	4-6	0,0170	0,0920	0,0790
6	5-7	0,0320	0,1610	0,1530
7	6-9	0,0390	0,1700	0,1790
8	7-8	0,0085	0,0720	0,0745
9	8-9	0,0119	0,1008	0,1045

Tabel 3.4 Data Tegangan dan Daya Sistem Anderson dan Fouad 4-Generator 9-Bus

No. Bus	Tegangan Bus	Power Generation		Load	
		P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1,040	200,00	0,00	0,00	0,00
2	1,025	163,00	0,00	0,00	0,00
3	1,025	85,00	0,00	0,00	0,00
4	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,000	0,00	0,00	125,00	50,00
6	1,000	0,00	0,00	90,00	30,00
7	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00

No. Bus	Tegangan Bus	Power Generation		Load	
		P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
8	1,000	0,00	0,00	100,00	35,00
9	1,000	45,00	0,00	0,00	0,00

3.2 Modal Analysis pada DigSilent Power Factory

Setelah dilakukan pemodelan pada *software* DigSilent Power Factory selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya untuk memastikan apakah sistem dalam keadaan stabil konvergen dan berjalan dengan baik. Setelah simulasi aliran daya telah berjalan dengan baik setelah itu *modal analysis* dapat dilakukan dengan menggunakan menu *modal analysis* yang tersedia pada *software* DigSILENT menggunakan pemodelan 6^{th} order generator [5] [6] dengan persamaan sebagai berikut:

$$\Delta\delta = \omega_0\Delta\omega \quad (3.1)$$

$$\Delta\dot{\omega} = \frac{1}{2H}(\Delta T_m - \Delta T_e - K_D\Delta\omega_m) \quad (3.2)$$

$$\Delta\dot{\psi}_{fd} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \Delta\psi_{ad} - \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \Delta\psi_{fd} + \omega_0 \Delta e_{fd} \quad (3.3)$$

$$\Delta\dot{\psi}_{1d} = \frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \Delta\psi_{1d} - \frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \Delta\psi_{1d} \quad (3.4)$$

$$\Delta\dot{\psi}_{1q} = \frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \Delta\psi_{1q} - \frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \Delta\psi_{aq} \quad (3.5)$$

$$\Delta\dot{\psi}_{2q} = \frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} \Delta\psi_{2q} - \frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} \Delta\psi_{2q} \quad (3.6)$$

Keterangan:

- ω_0 : Kecepatan Sudut Rotor
- H : Inersia
- T_m : Torsi Mekanik
- T_e : Torsi Elektrik
- K_D : Koefisien Torsi Damping
- L_{fd} : Field Winding Leakage Inductance
- L_{1d} : Reaktansi d-axis amortisseur
- L_{1q}, L_{2q} 1st dan 2nd q-axis amortisseur resistance reactance

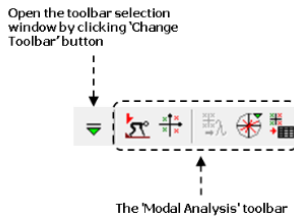
e_{fd}	: Tegangan Medan
$R1_d$: d-axis amortisseur resistance
$R1_q, R2_q$: 1st dan 2nd q-axis amortisseur resistance
$\psi_{aq}, \Delta\psi_{ad}$: d and q-axis mutual flux linkages
$\psi1_d$: d-axis amortisseur flux linkage
$\psi1_q, \psi2_q$: 1st dan 2nd q-axis amortisseur flux linkage

3.2.1 Menggunakan *Modal analysis* pada DigSILENT Power Factory




Modal analysis digunakan untuk mengkalkulasi nilai *eigenvalue* dan *eigenvectors* dari sistem multimesin. Perhitungan dari *eigenvalue* dapat dilakukan pada saat awal simulasi transien maupun saat telah diberhentikan. *Modal analysis* biasa juga disebut dengan perhitungan *eigenvalue*, atau *small signal stability analysis* berikut langkah yang dilakukan untuk mendapatkan *eigenvalue*:

3.2.1.1 Memulai *Modal analysis*

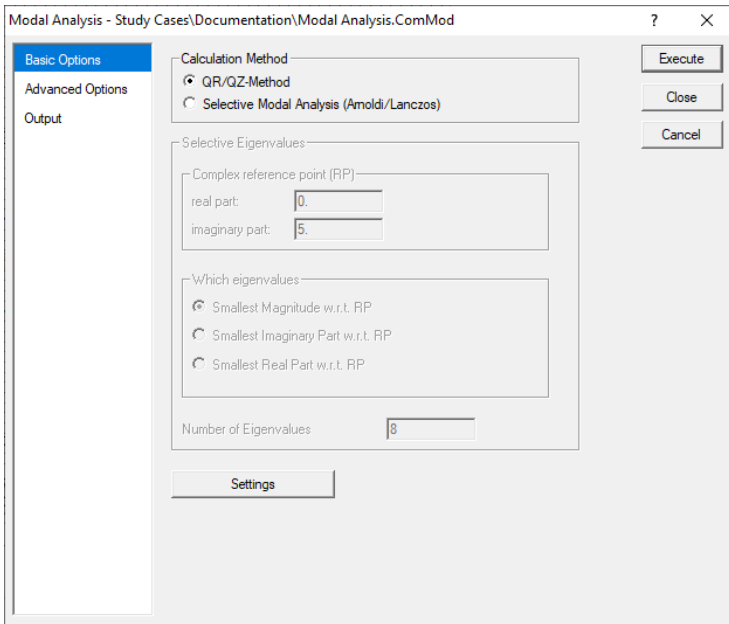
Memilih toolbar *Modal analysis* dengan memilih seperti pada gambar berikut:



Gambar 3.3 *Modal Analysis* Toolbar

1. *Calculate initial condition* menggunakan tombol  lalu pilih tombol *execute*. Pada tahap ini nilai load flow harus konvergen.
2. Setelah *initial condition* telah dilakukan, selanjutnya klik  untuk melakukan perhitungan nilai *eigenvalue*.
3. Setelah perhitungan *eigenvalue* telah dilakukan kita dapat melihat hasil nilai-nilai *eigenvalue* dengan menggunakan tombol 

3.2.1.2 *Basic Command* pada Modal analysis

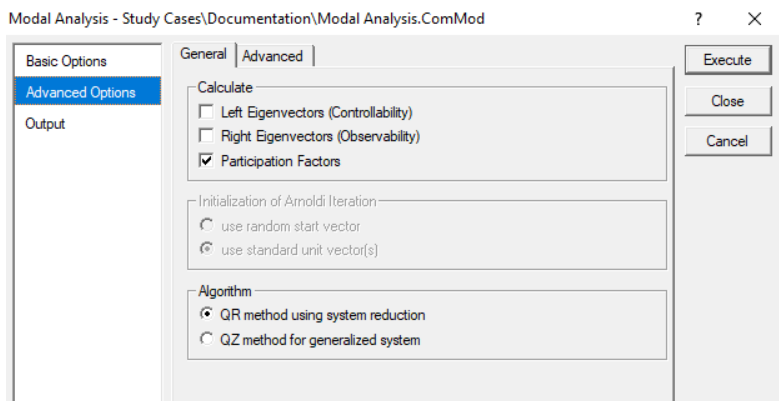


Gambar 3.4 Basic Command Modal analysis

Pada menu *calculation method* ada 2 metode perhitungan, yaitu:

1. QR / QZ-Method: Metode ini adalah metode 'klasik' untuk menghitung semua *eigenvalue* sistem.
2. *Selective Modal analysis* (Arnoldi / Lanczos); Metode ini hanya menghitung subset dari *eigenvalue* sistem di sekitar titik referensi tertentu. Seringkali metode ini digunakan dalam sistem yang sangat besar ketika menggunakan metode QR bisa sangat memakan waktu. Ini sangat berguna jika pengguna mengetahui area target yang diminati untuk *eigenvalue*.

3.2.1.3 Advance Option Modal analysis



Gambar 3.5 Advance Option Modal analysis

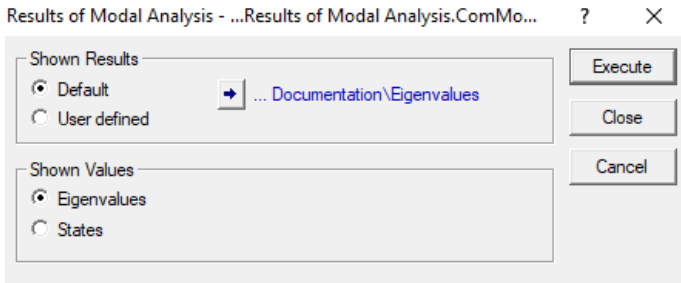
1. *Left Eigenvectors (Controllability)*; Jika opsi ini diaktifkan, perintah *modal analysis* akan hitung vektor Eigen Kiri. Ini diaktifkan secara default. Pengguna dapat memvisualisasikan *Controllability* untuk mode apa pun menggunakan *Mode Phasor Plot* atau *Mode Bar Plot*.
2. *Right Eigenvectors (Observability)*; Jika opsi ini diaktifkan maka perintah *modal analysis* akan menghitung *Eigenvectors* Kanan (Pengamatan) untuk setiap variabel keadaan. Ini dinonaktifkan secara default. Pengguna dapat memvisualisasikan *Observability* untuk setiap mode baik dalam *Mode Phasor Plot* atau *Mode Bar Plot*.
3. *Participation Factor*; Jika opsi ini diaktifkan maka perintah *Modal analysis* akan menghitung Faktor Partisipasi untuk setiap variabel keadaan. Ini dinonaktifkan secara default. Pengguna dapat memvisualisasikan Faktor Partisipasi untuk mode apa pun menggunakan *Mode Phasor Plot* atau *Mode Bar plot*.

3.2.1.4 Hasil modal analysis

Ada beberapa cara bagi pengguna untuk melihat hasil perhitungan *modal analysis*, termasuk melalui laporan yang sudah ditetapkan ke *Output Window*, menggunakan *plot built-in* dalam *Power Factory* atau menggunakan *spreadsheet* seperti *browser data*. Selain itu, pengguna dapat mencari objek individu dalam database dan melihat

Controllability, Observability, dan Participation Factor untuk mode tertentu dalam manajer data atau objek yang familiar.

1. Klik kiri pada ikon akan muncul *Result of Modal Analysis*.
2. Pilih *Eigenvalues*, pada kolom *shown values* pilih nilai yang ingin dilihat.
3. Lalu tekan execute.



Gambar 3.6 Dialog Box Result of Modal Analysis

	Name	Real part 1/s	Imaginary part rad/s	Magnitude 1/s	Angle deg	Damped Frequency Hz	Period s	Damping 1/s	Damping Ratio	Damping Time Co... s	Ratio A1/A2
▶ -+-	Mode 00001	0	0	0	0	0	0	-0	0	0	0
-+-	Mode 00002	-49.68676	0	49.68676	180	0	0	49.68676	1	0.02012608	0
-+-	Mode 00003	-49.75231	0	49.75231	180	0	0	49.75231	1	0.02009956	0
-+-	Mode 00004	-50.00936	0	50.00936	180	0	0	50.00936	1	0.01999625	0
-+-	Mode 00005	-11.95176	14.73731	18.97454	129.04157	2.3455171	0.42634	11.95176	0.629884	0.08366967	163.29792
-+-	Mode 00006	-11.95176	-14.73731	18.97454	-129.04157	2.3455171	0.42634	11.95176	0.629884	0.08366967	163.29792
-+-	Mode 00007	-10.73615	14.34696	17.91927	126.80833	2.2833902	0.43794	10.73615	0.599140	0.09314319	110.15070
-+-	Mode 00008	-10.73615	-14.34696	17.91927	-126.80833	2.2833902	0.43794	10.73615	0.599140	0.09314319	110.15070

Gambar 3.7 Hasil Modal Analysis

Pada gambar 3.7 terdapat hasil dari *modal analysis* dengan beberapa *mode* yang ada pada sistem tersebut. Tentunya disitu terdapat beberapa nilai dari *magnitude, angle, frequency, dan damping ratio*. Pada hasil *modal analysis* dari tiap *mode* itu akan baru terlihat apa saja yang ada pada *mode* ketika di *execute* pada *mode bar plot*, atau *mode phasaor plot*.

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISIS HASIL

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan

Dengan data-data yang sudah ada dilakukan pemodelan dalam bentuk *single line diagram* dari sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dan *4-machine 9-bus* dalam software DigSILENT Power factory. Simulasi dilakukan untuk menganalisis *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 5% menunjukkan kelemahan sistem karena memperpanjang waktu yang dibutuhkan untuk sistem kembali *steady state* dan apabila terjadi gangguan lain pada saat yang sama maka ada resiko yang lebih tinggi yang dapat menyebabkan ketidakstabilan.

Pertama, menggunakan metode *modal analysis* dijalankan untuk menentukan generator kritis atau *Critical Generator (CG)* di sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dan *4-machine 9-bus*. Diasumsikan bahwa setiap saluran transmisi terdiri atas saluran ganda dan terjadi gangguan tiga fasa (seimbang) pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Setelah didapat generator kritis atau *Critical Generator (CG)* menggunakan metode *modal analysis* dibandingkan dengan penentuan generator kritis menggunakan metode *Energy Index*. *Flowchart* pada gambar menunjukkan secara rinci tahap pengerjaan pada penelitian ini.

Kondisi dan spesifikasi perangkat keras akan mempengaruhi waktu simulasi pada sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dan *4-machine 9-bus* untuk mencapai hasil akhir.

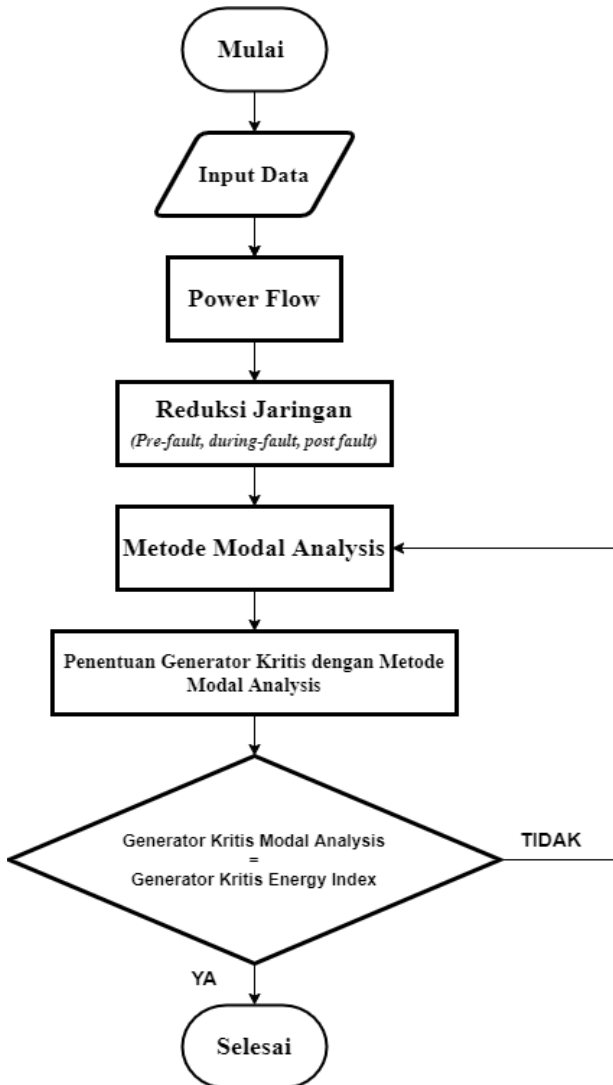
Processor: Intel® Core™ i7-5500U CPU @ 2.40 Ghz 2.4 GHz

Installed RAM: 8.00 GB

System type: 64-bit operating system, x64-based processor

Windows edition: Windows 10 Pro

Software: DigSILENT Power Factory 15.1



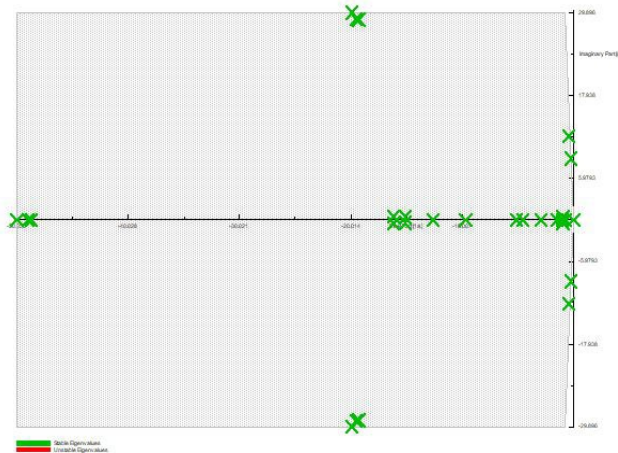
Gambar 4.1 Flowchart Penentuan Generaor Kritis

4.2 Penentuan Generator Kritis Sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus

Dengan sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus didapatkan hasil dari *modal analysis* untuk menentukan generator kritis yaitu pada mode 00013 dengan *damping ratio* dibawah 5%.

4.2.1 Eigenvalue Sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus

Modal analysis pada sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus menghasilkan 32 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai *eigenvalue* menunjukkan bahwa sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif, berikut adalah plot seluruh nilai *eigenvalue*.



Gambar 4.2 Plot Eigenvalue Sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus

Dari 32 nilai *eigenvalue* ditampilkan beberapa nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 10%. Selanjut akan di analisis nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* 5% hal ini dilakukan karena dengan *damping ratio* dibawah 5% waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada sistem menuju *steady state* akan menyebabkan sistem beresiko tinggi untuk *breakdown*.

Tabel 4.1 Eigenvalue dengan damping ratio dibawah 5%

Mode	Real Part 1/s	Imaginary	Frequency	Damping Ratio
Mode 00013	-0.2809	8.777	1.397	3.19%
Mode 00014	-0.2809	-8.777	1.397	3.19%
Mode 00011	-0.5693	12.0565	1.919	4.71%
Mode 00012	-0.5693	-12.0565	1.919	4.71%

Pada mode 00013 dapat dilihat *damping ratio* sebesar 3.19% sehingga merupakan nilai *eigenvalue* yang kritis atau sudah mendekati sumbu positif sehingga perlu dilakukan analisis pembangkit mana saja yang berpengaruh pada *eigenvalue* ini.

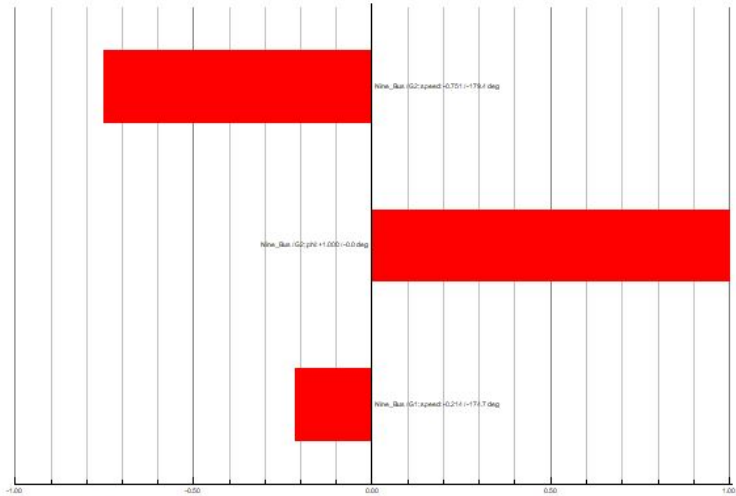
4.2.2 Hasil Participation Factor (Mode 00013)

Pada subbab ini akan ditampilkan *mode bar plot* pada mode dengan *damping ratio* dibawah 5% dalam hal ini mode 00013 memiliki *damping ratio* sebesar 3.20% dengan frekuensi 1.397. Mode 00013 memiliki *mode bar plot* dari segi *participation factor*, sebagai berikut:

Tabel 4.2 Participation Factor Mode 00013

<i>Participation Factor</i>		
Mode	Magnitude	Angle
Mode 00013	8.782	91.833

Participation factor digunakan untuk menentukan *state variable* atau generator mana yang sangat berpengaruh terhadap suatu mode atau terhadap suatu nilai *eigenvalue*. Berdasarkan *Participation Factor* dapat dilihat bahwa mode 00013 mempunyai *magnitude* besar sehingga dapat dikatakan pada mode 00013 yang paling kritis atau tidak stabil. Pada mode 00013 diketahui Generator dua atau G2 tidak stabil dengan hasil dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.3 Mode Bar Plot mode 00013

4.2.3 Perbandingan *Modal analysis* dengan Energy Index pada sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus*

Pemilihan generator kritis atau *critical generator* (CG) merupakan tujuan utama. Pada Metode indeks energi untuk penentuan generator kritis dengan melihat indeks energi terbesar dari setiap generator. Pada table 4.3, generator satu memiliki indeks energi sebesar 0,0137 pu, generator dua 1,2898 pu, dan generator tiga 0,5711 pu lalu dari hasil tersebut dipilih generator yang memiliki indeks energi terbesar yaitu generator dua. Setelah CG tiap titik gangguan telah didapatkan kemudian dipilih CG sistem dari nilai CG yang paling sering muncul di tiap gangguan. Maka, CG sistem 3-generator 9-bus dengan metode indeks energi ialah generator dua.

Tabel 4.3 Hasil Indeks Energi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus

Fault Point	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3	Nilai Maks.	CG	CG Sistem
A	0,0137	1,2898	0,5711	1,2898	2	2
B	0,1021	1,6023	0,1066	1,6023	2	
C	0,1328	0,6629	1,7572	1,7572	3	
D	0,0715	1,4907	0,6366	1,4907	2	
E	0,0844	1,5022	0,6186	1,5022	2	
F	0,1269	1,1790	0,4908	1,1790	2	
G	0,1205	1,7431	0,5436	1,7431	2	
H	0,1234	1,2382	0,5482	1,2382	2	
I	0,1264	1,7328	0,6330	1,7328	2	

Sedangkan untuk penentuan generator kritis dengan metode *modal analysis* dilihat dari nilai *damping ratio* paling kecil atau dibawah 5%. Dari beberapa gangguan ditemukan dengan nilai *damping ratio* terkecil ada pada mode 00013 dengan nilai generator kritis atau *critical generator* (CG) adalah generator dua. Maka, CG sitem 3-generator 9-bus dengan metode *Modal analysis* ialah generator dua.

Tabel 4.4 Hasil Modal analysis Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus

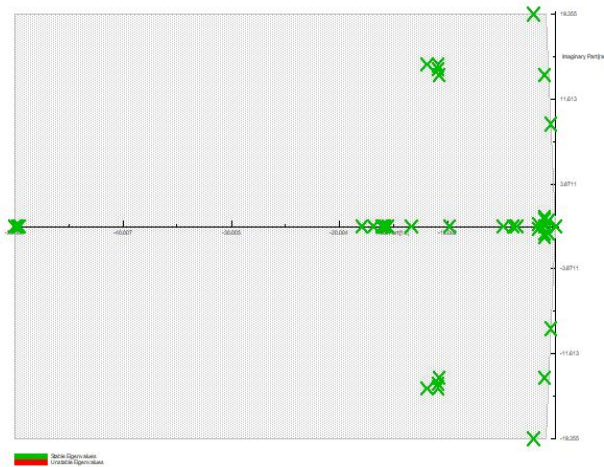
Fault	Mode	Damping Ratio	CG
A	Mode 00013	0.031994229	G2
B	Mode 00013	0.031455186	G2
C	Mode 00013	0.031495283	G2
D	Mode 00013	0.031451329	G2
E	Mode 00013	0.031489487	G2
F	Mode 00013	0.031450559	G2
G	Mode 00013	0.031450934	G2
H	Mode 00013	0.031495303	G2
I	Mode 00013	0.031451359	G2
None	Mode 00013	0.031484087	G2

4.3 Modal analysis Modifikasi Sistem Fouad dan Anderson 4-machine 9-bus

Dengan sistem Fouad dan Anderson 4-machine 9-bus didapatkan data yang ada pada bab 3, dari data tersebut terdapat hasil dari *modal analysis* untuk menentukan generator kritis.

4.3.1 Eigenvalue Sistem Modifikasi Fouad dan Anderson 4-machine 9- bus

Modal analysis pada sistem Fouad dan Anderson 4-machine 9-bus menghasilkan 43 nilai *eigenvalue* dimana seluruh nilai *eigenvalue* menunjukkan bahwa sistem stabil dikarenakan seluruh bagian *real* dari nilai *eigenvalue* bernilai negatif, berikut adalah plot seluruh nilai *eigenvalue*:



Gambar 4.4 Plot Eigenvalue Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus

Dari 43 nilai *eigenvalue* ditampilkan beberapa nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* dibawah 10% dan selanjutnya akan di analisis nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* 5% hal ini dilakukan karena dengan *damping ratio* dibawah 5% waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali ke kondisi *steady state* akan semakin lama sehingga jika terjadi gangguan lain pada sistem menuju *steady state* akan menyebabkan sistem beresiko tinggi untuk *breakdown*.

Tabel 4.5 Eigenvalue dengan damping ratio dibawah 5%

Mode	Real Part 1/s	Imaginary	Frequency	Damping Ratio
Mode 00018	-0.434	9.336	1.485	4.65%
Mode 00019	-0.811	-9.336	1.485	4.65%

Pada mode 00018 dapat dilihat *damping ratio* sebesar 4.65% sehingga merupakan nilai *eigenvalue* yang kritis atau sudah mendekati sumbu positif sehingga perlu dilakukan analisis pembangkit mana saja yang berpengaruh pada *eigenvalue* ini.

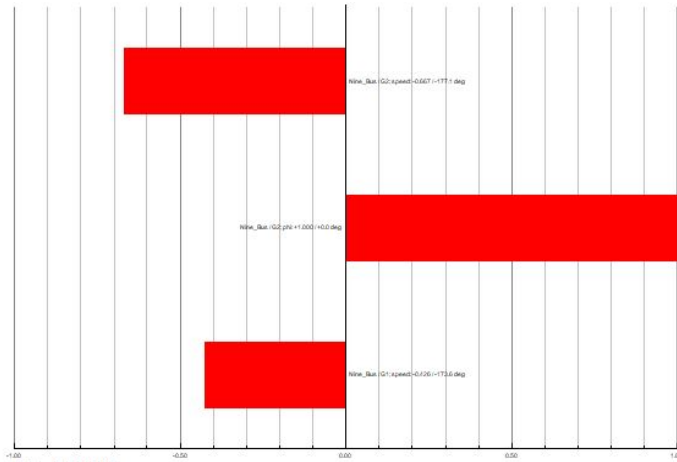
4.3.2 Hasil Participation Factor (Mode 00018)

Pada subbab ini akan ditampilkan *mode bar plot* pada mode dengan *damping ratio* dibawah 5% dalam hal ini mode 00013 memiliki *damping ratio* sebesar 4.65% dengan frekuensi 1.485. Mode 00018 memiliki *mode bar plot* dari segi *Participation Factor*, sebagai berikut:

Tabel 4.6 Participation Factor Mode 00018

<i>Participation Factor</i>		
Mode	Magnitude	Angle
Mode 00018	9.346	92.66

Participation factor digunakan untuk menentukan *state variable* atau generator mana yang sangat berpengaruh terhadap suatu mode atau terhadap suatu nilai *eigenvalue*. Berdasarkan *Participation Factor* dapat dilihat bahwa mode 00018 mempunyai *magnitude* besar sehingga dapat dikatakan pada mode 00018 yang paling kritis atau tidak stabil. Pada mode 00018 diketahui Generator 2 atau G2 tidak stabil dengan hasil dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.5 Mode Bar Plot Mode 00018

4.3.3 Perbandingan *Modal analysis* dengan Energy Index pada sistem Fouad dan Anderson 4-machine 9-bus

Pemilihan generator kritis atau critical generator (CG) merupakan tujuan utama. Pada metode indeks energi untuk penentuan generator kritis dengan melihat indeks energi terbesar dari setiap generator. Berdasarkan *Participation Factor* dapat dilihat bahwa mode 00018 mempunyai *magnitude* besar sehingga dapat dikatakan pada mode 00018 yang paling kritis atau tidak stabil. Setelah CG tiap titik gangguan telah didapatkan kemudian dipilih CG sistem dari nilai CG yang paling sering muncul di tiap gangguan. Maka, CG sistem 4-generator 9-bus dengan metode indeks energi ialah generator dua.

Tabel 4.7 Hasil Indeks Energi Sistem Anderson dan Fouad 4-Generator 9-Bus

Fault Point	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3	Gen. 4	Nilai Maks.	CG	CG Sistem
A	0.081	0.6056	0.3151	0.18	0.6056	2	2
B	0.2	1.3252	0.1372	0.0773	1.3252	2	
C	0.1925	0.8359	0.458	0.2311	0.8359	2	
D	0.1609	0.8153	0.4128	0.2336	0.8153	2	
E	0.1614	0.7926	0.3926	0.2239	0.7926	2	
F	0.1586	0.6133	0.3017	0.1704	0.6133	2	
G	0.2085	0.9915	0.4303	0.2457	0.9915	2	
H	0.1566	0.6095	0.3159	0.1781	0.6095	2	
I	0.2215	0.9708	0.4807	0.2705	0.9708	2	

Sedangkan untuk penentuan generator kritis dengan metode *modal analysis* dilihat dari nilai *damping ratio* paling kecil atau dibawah 5%. Dari beberapa gangguan yang ditemukan dengan nilai *damping ratio* terkecil ada pada mode 00013 dengan *damping ratio* sebesar 4.65% dapat dilihat pada Tabel 4.8, Oleh karena itu generator kritis atau *critical generator* (CG) adalah generator dua. Maka, CG sitem 4-generator 9-bus dengan metode *modal analysis* ialah generator dua.

Tabel 4.8 Hasil Modal analysis Sistem Anderson dan Fouad 4-Generator 9-Bus

Fault	Mode	Damping Ratio	CG
A	Mode 00018	0.046524442	G2
B	Mode 00018	0.046501834	G2
C	Mode 00018	0.046505893	G2
D	Mode 00018	0.046601247	G2
E	Mode 00018	0.046506679	G2
F	Mode 00018	0.046601193	G2
G	Mode 00018	0.046563529	G2
H	Mode 00018	0.046601247	G2
I	Mode 00018	0.046506679	G2
none	Mode 00018	0.046601193	G2

BAB 5

KESIMPULAN & SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Hasil yang didapatkan dari *modal analysis* = indeks energi sehingga metode *modal analysis* dapat menjadi opsi untuk digunakan mencari generator kritis
2. Generator kritis pada sistem Fouad dan Anderson 3 *machine-9 bus* ada pada generator 2
3. Generator kritis pada sistem Fouad dan Anderson 4 *machine-9 bus* ada pada generator 2

5.2 Saran

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Perlu dilakukan studi lanjut untuk meningkatkan *damping ratio* pada nilai *eigenvalue* dengan *damping ratio* yang rendah.
2. Sistem ini bisa dilanjutkan untuk analisa kestabilan transien untuk keseluruhannya dan sistem koordinasi sistem.
3. Perlu dilakukan pengujian pada sistem yang lebih kompleks dengan generator yang lebih banyak untuk membuktikan keakuratan metode.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. M. Anderson dan A. A. Fouad, *Power system control and stability*, 2nd ed. Piscataway, N.J: IEEE Press ; Wiley-Interscience, 2003.
- [2] S. Sharma, S. Pushpak, V. Chinde, dan I. Dobson, "Sensitivity of Transient Stability Critical Clearing Time," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 6, hlm. 6476–6486, Nov 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2854650.
- [3] "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, hlm. 1387–1401, Agu 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981.
- [4] S. Okubo, H. Suzuki, dan K. Uemura, "Modal analysis for Power System Dynamic Stability," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.*, vol. PAS-97, no. 4, hlm. 1313–1318, Jul 1978, doi: 10.1109/TPAS.1978.354616.
- [5] P. Kundur, *Power System Stability and Control*: McGraw-Hill Education, 1994.
- [6] A. V. Ubbise, "Comparison of DigSILENT, Matlab PST and PSAT for Steady State and Stability Studies on HVAC-HVDC Systems " Master, Electrical Engineering University of Cape Town Cape Town, 2012.
- [7] D. P. GmbH. *DigSILENT PowerFactory 15.1.2 User's Manual*.
- [8] F. Dussaud, "An Application of *Modal analysis* in Electric Power Systems to Study Inter-area Oscillations," Electrical Engineering, KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Stockholm, Sweden, 2015.
- [9] G. Á and P. Monzón, "*Modal analysis* of the Uruguayan electrical power system," in *IEEE PES General Meeting*, 2010, pp. 1-6.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BIODATA PENULIS



Yusran Muhammad Maududi, lahir Jakarta, 23 Mei 1998. Penulis lulus dari SMA Negeri 85 Jakarta pada tahun 2016 dan melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Fakultas Teknologi Elektro, Departemen Teknik Elektro, Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga. Selama kuliah, penulis terlibat kegiatan kepanitiaan dan organisasi, yaitu Ketua UKM Fotografi (UKAFO) pada kepengurusan 2018, Wakil Ketua Electra 8, Wakil Ketua Evolty 2020, dan Asisten Sekertaris Jendral BEM FTE tahun kepengurusan 2019-2020.