

PENENTUAN STABILITAS SISTEM TENAGA LISTRIK PADA WAKTU PEMUTUSAN GANGGUAN DENGAN METODE RUNGE KUTTA ORDE 4

SKRIPSI

OLEH :

MUHAMMAD HARIYADI

08.812.0020



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2015**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 22/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
 2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
 3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area
- Access From (repository.uma.ac.id)22/9/23

LEMBARAN PENGESAHAN

PENENTUAN STABILITAS SISTEM TENAGA LISTRIK PADA WAKTU PEMUTUSAN GANGGUAN DENGAN METODE RUNGE KUTTA ORDE 4

OLEH :

MUHAMMAD HARIYADI 08 812 0020

TELAH DISETUJUI

OLEH:

Pembimbing I

Pembimbing II

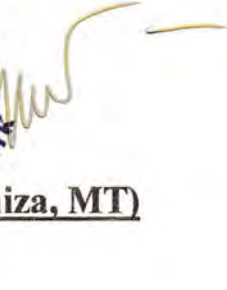

(Ir. Suwarno, MT)


(Rimbawati, ST, MT)

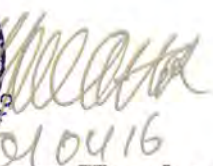
Dekan Fakultas Teknik

Ka. Prodi Teknik Elektro




(Ir. Hs Haniza, MT)




(Ir. H. Usman Harahap, MT)

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Hariyadi
NIM : 08 812 0020
Ka.prodi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Penentuan Stabilitas Sistem Tenaga Listrik Pada Waktu Pemutus Gangguan Dengan Metode Runge Kuta Orde 4

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa:

1. Skripsi yang saya ajukan adalah sebagai syarat untuk memperoleh gelar sarjana pada fakultas teknik universitas medan area bebas dari plagiat sesuai kaedah ilmiah, norma akademik dan norma hukum sesuai peraturan Menteri pendidikan nasional nomor 17 tahun 2010 tentang pencegahan dan penanggulangan plagiat di perguruan tinggi.
2. Bilamana terbukti terdapat tindakan plagiat, maka bersedia menerima sanksi sesuai peraturan dan perundangan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat untuk dapat di pergunakan sebagaimana mestinya.

Medan, Juni 2015

Yang Memberikan Pernyataan


METERAI
TEMPEL
TGL 20
FCADDADF094491697
6000
ENAM RIBU RUPIAH

(Muhammad Hariyadi)

08 812 0020

UNIVERSITAS MEDAN AREA

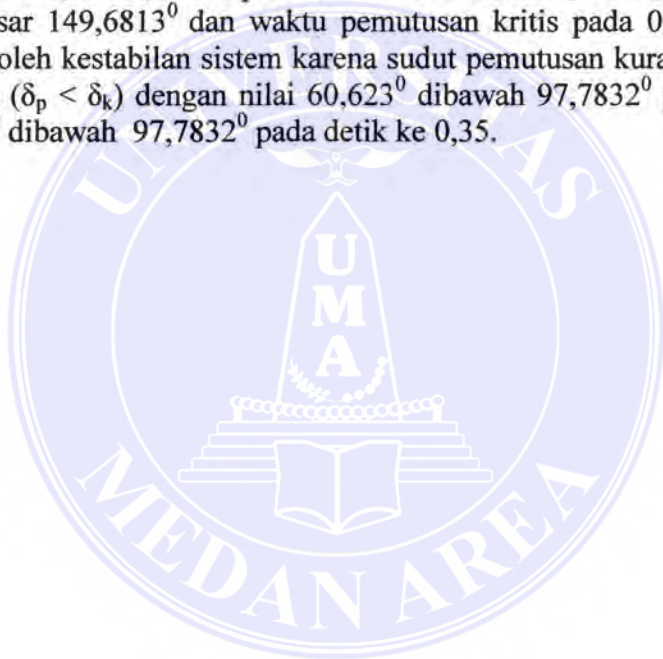
© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 22/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

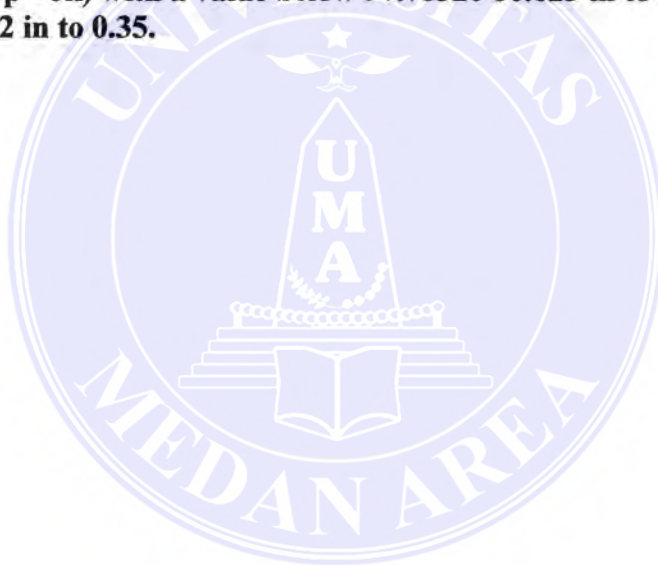
ABSTRAK

Kebutuhan listrik di masyarakat semakin meningkat seiring dengan meningkatnya pemanfaatan tenaga listrik. Sistem tenaga listrik yang baik adalah sistem tenaga yang dapat melayani beban secara kontinu, tegangan dan frekuensi yang konstan, namun apabila terjadi gangguan pada salah satu pembangkit atau pada rel maka hal ini tidak dipungkiri akan terjadi gangguan pada penyaluran daya. Untuk itu perlu dilakukan Studi Stabilitas Sistem Tenaga yang berkaitan dengan Studi Penentuan Sudut Pemutus Kritis dan Waktu Pemutus Kritis pada generator, guna mengetahui berapa besar Sudut Pemutus Kritis dan berapa besar Waktu Pemutus Kritis. Dalam penelitian ini digunakan Metode Runge-Kutta Orde 4 dengan bantuan software Matlab. Hasil dari penelitian adalah bahwa besar sudut kerja awal sebesar $17,9319^0$, sudut pemutus kritis sebesar $97,7832^0$, sudut ayunan maksimum sebesar $149,6813^0$ dan waktu pemutusan kritis pada 0,25 detik dan 0,35 detik diperoleh kestabilan sistem karena sudut pemutusan kurang dari sudut pemutusan kritis ($\delta_p < \delta_k$) dengan nilai $60,623^0$ dibawah $97,7832^0$ pada detik ke 0,25 dan $93,301^0$ dibawah $97,7832^0$ pada detik ke 0,35.



ABSTRACT

Electricity needs in the community is increasing along with the increasing use of electricity. Electric power system that is both power systems that can serve as a continuous load, voltage and frequency are constant, but if there is interference on one plant or on the rail then this will no doubt be an interruption in power delivery. Important for that Power System Stability Study conducted relating to the breaker Angle Determination of Critical Studies and Time Critical breaker on the generator, in to know how much angle breakers and how much time Critical Critical breaker. This study used a method of Runge-Kutta Order 4 with the help of Matlab software. Results from the study is that the large angle of the initial work of 17.9319, 97.7832 corner of the critical breaker, the maximum swing angle of 149.68130 and critical disconnection time at 0.25 seconds and 0.35 seconds diperoleh termination system stability because the angle is less critical from the point of termination ($\delta_p < \delta_k$) with a value below 97.78320 60.623 in to 0.25 and below 93.301, 97.7832 in to 0.35.



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PENGESAHAN	ii
LEMBARAN PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
RIWAYAT HIDUP	v
KATA PENGANTAR	vi
ABSTRAK.....	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1. Latar belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
1.5. Batasan Masalah	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	 6
2.1. Tinjauan Pustaka Relevan.....	6
2.2. Landasan Teori	11
2.2.1. Stabilitas Sistem Tenaga Listrik	11
2.2.2. Stabilitas Transient Sistem Tenaga Listrik	15
UNIVERSITAS MEDAN AREA Rotor dan Persamaan Ayunan.....	17

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)22/9/23

2.2.4. Permodelan Mesin Serempak Untuk Studi Kestabilan.....	24
2.2.5. Menentukan Stabilitas Transient Dengan Metode Kriteria Sama Luas.....	27
2.2.6. Aplikasi Pada Gangguan Tiga Fasa.....	29
2.2.7. Penyelesaian Numerik Persamaan Diferensial Nonlinier.....	34
 BAB III METODOLOGI PENELITIAN	38
3.1. Lokasi Dan Waktu Penelitian	38
3.2. Peralatan Penelitian.....	38
3.3. Data Penelitian	39
3.3.1. Data Generator	39
3.3.2. Data Trafo	39
3.3.3. Data Saluran Transmisi	40
3.4. Jenis Penelitian	40
3.4.1. Wawancara.....	41
3.4.2. Metode Observasi	41
3.5. Teknik analisis Data.....	41
3.5.1. Algoritma Penelitian	42
3.5.2. Pengujian.....	46
 BAB IV ANALISA DAN HASIL HASIL PEMBAHASAN	47
4.1. Analisa Singel Line Pada Saluran.....	47
4.2. Menghitung Reaktansi Pada Saluran	48
4.3. Pengujian Dan Analisa Program Matlab	51
4.3.1. Metode Runge Kutta Orde 4	51
4.4. Kurva Sudut Daya Pada Pembangkitan PT BERKAT BIMA SENTANA	62

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 63

5.1. Kesimpulan 63

5.2. Saran 64

DAFTAR PUSTAKA 65



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Suatu sistem kelistrikan umumnya memiliki beberapa pusat pembangkit yang terdiri pusat pembangkit listrik tenaga air, pusat pembangkit listrik tenaga uap, pusat pembangkit listrik tenaga disel dan jenis pusat pembangkit lainnya. Semua unit pembangkit yang ada tersebut terhubung satu sama lain melalui jaringan transmisi untuk mensuplai kebutuhan listrik bagi para konsumen.

Selain tersedianya pembangkitan yang cukup, hal lain yang juga harus ditentukan adalah apakah kondisi *transient* jika terjadi gangguan akan mengganggu operasi normal sistem atau tidak. Hal ini akan berhubungan dengan kualitas listrik yang sampai ke konsumen berupa kestabilan frekuensi dan tegangan.

Sistem tenaga listrik yang baik adalah sistem tenaga yang dapat melayani beban secara kontinyu tegangan dan frekuensi yang konstan. Fluktuasi tegangan dan frekuensi yang terjadi harus berada pada batas toleransi yang diizinkan agar peralatan listrik konsumen dapat bekerja dengan baik dan aman. Kondisi sistem yang benar-benar mantap sebenarnya tidak pernah ada. Perubahan beban selalu terjadi dalam sistem. Penyesuaian oleh pembangkit akan dilakukan melalui governor dari penggerak mula dan eksitasi generator.

Perubahan kondisi sistem tenaga listrik biasanya terjadi akibat adanya gangguan seperti sambaran petir, gangguan hubung singkat, dan pelepasan atau penambahan beban yang benar secara tiba-tiba. Akibat adanya perubahan kondisi kerja dari sistem ini, maka keadaan sistem akan berubah dari keadaan lama ke keadaan baru. Periode singkat di antara kedua keadaan tersebut disebut periode paralihan atau *transient*. Oleh karena itu diperlukan suatu analisis sistem tenaga listrik untuk menentukan apakah sistem tersebut stabil atau tidak, jika terjadi

UNIVERSITAS MEDAN AREA

gangguan. Stabilitas *transient* didasarkan pada kondisi kestabilan ayunan pertama

(*first swing*) dengan periode waktu penyelidikan pada detik pertama terjadi gangguan.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menentukan kestabilan suatu sistem tenaga listrik apabila mengalami gangguan adalah metode runge-kutta orde 4. Metode ini sangatlah membantu untuk memahami faktor-faktor dasar yang mempengaruhi stabilitas *transient* sistem tenaga listrik serta penggunaan orde 4 ini sangat akurat dibandingkan dengan penggunaan orde 2.

Metode runge-kutta orde 4 merupakan metode langsung untuk memperoleh waktu pemutusan kritis (*Critical Clearing time*), yang mana hanya terbatas untuk satu mesin saja dengan bus infinite (*Single Machine Infinite Bus, SMIB*). Kurva ayunan merupakan alat elevasi suatu kestabilan sistem yang digunakan kestabilan-kestabilan *transient* sistem tenaga listrik.

Alat bantu dalam studi analisa sistem tenaga listrik adalah komputer, karena peranan komputer dalam Analisis Sistem Tenaga mempunyai keuntungan diantaranya fleksibel (dapat digunakan untuk menganalisis hampir semua persoalan), teliti, cepat dan ekonomis. *Software* komputer yang digunakan adalah Matlab, karena Matlab merupakan bahasa canggih untuk komputasi teknik. Dan Matlab merupakan integrasi dari komputasi, visualisasi dan pemrograman dalam suatu lingkungan yang mudah digunakan, karena permasalahan dan pemecahannya dinyatakan dalam notasi matematika biasa.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang dapat dikemukakan dalam penulisan Penelitian ini adalah :

1. Berapa besarnya sudut pemutus kritis (*Critical Clearing Angle*) untuk menentukan kestabilan Sistem Tenaga Listrik di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan dalam keadaan peralihan (*tansient*).
2. Berapa besarnya waktu pemutus kritis (*Critical Clearing Time*) untuk menentukan kestabilan Sistem Tenaga Listrik di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan dalam keadaan peralihan (*tansient*).

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 22/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area
Access From (repository.uma.ac.id)22/9/23

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari penulisan Penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui berapa besar sudut pemutus kritis (*Critical Clearing Angle*) pada generator saat terjadi gangguan di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan.
2. Untuk mengetahui berapa besar waktu pemutus kritis (*Critical Clearing Time*) pada generator saat terjadi gangguan di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan.

1.4 Manfaat

Manfaat dari penulisan Penelitian ini adalah ketika terjadi gangguan di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan misalnya akibat adanya gangguan sambaran petir di salah satu sistem tenaga listrik, gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik, dan pelepasan atau penambahan beban yang benar secara tiba-tiba, maka hasil Penelitian ini mudah-mudahan dapat di aplikasikan di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan.

1.5 Asumsi dan Batasan Masalah

1.5.1 Asumsi

Untuk memudahkan perhitungan pada Penelitian ini maka dibuat beberapa asumsi yang mendasar, yaitu :

- a) Dari 2 generator yang ada di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan, yaitu generator 1, dan generator 2, karena besar kapasitas daya sama maka dinggap 1 mesin.
- b) Panjang saluran transmisi yang digunakan dalam simulasi ini adalah dari pembangkit PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan sampai ke pembangkit PLTU Sicanang.

- c) Beban yang ada di PLTU Sicanang dianggap infinite bus yang besar tegangannya unity $V = 1$ Volt.
- d) Parameter-parameter yang diambil pada analisis sistem tenaga listrik adalah : reaktansi pada generator, reaktansi pada transformator daya dan reaktansi pada saluran 150 kV.

1.5.2 Batasan Masalah

Batasan stabilitas sistem adalah besarnya daya maksimum yang dapat mengalir melalui suatu titik dalam sistem tanpa menyebabkan hilangnya stabilitas. Dari analisis stabilitas ini akan diketahui besar sudut pemutus kritis (δ_{cr}), waktu pemutus (t_c) dan batas-batas stabilitas yang lain pada saat sistem mengalami gangguan.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulis akan memberikan gambaran umum mengenai hal-hal yang akan dibahas dalam penulisan Penelitian ini, sehingga dapat diperoleh gambaran yang jelas tentang isi dari penulisan Penelitian ini. Isi dari penulisan Penelitian ini adalah :

BAB I PENDAHULUAN

Berisikan tentang segala macam pokok persoalan yang akan dibahas dalam penulisan sekripsi ini, yaitu : Latar Belakang, Rumusan Masalah, Tujuan, Manfaat, Asumsi, Batasan Masalah dan Sistematika Penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan tentang teori-teori pendukung yang digunakan untuk menganalisa stabilitas sistem tenaga listrik yang ada di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan diantaranya : Tinjauan Penelitian Relevan, Stabilitas Sistem Tenaga Listrik, Stabilitas *Transient* Sistem Tenaga Listrik, Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan, Pemodelan Mesin Serempak Untuk Studi Stabilitas *Transient* dengan Metode Kriteria Sama Luas,

Aplikasi pada Gangguan Tiga Fasa dan Penyelesaian Numerik Persamaan Diferensial Nonlinear.

BAB III METODE PENELITIAN

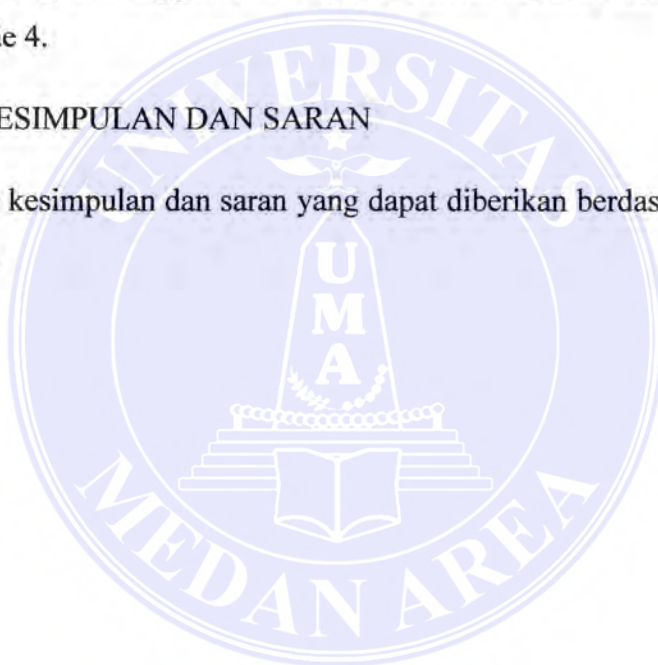
Bab ini berisikan tentang lokasi penelitian, peralatan penelitian, data penelitian, jenis penelitian dan teknik analisa data yang digunakan.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan analisis dan pembahasan dari hasil running program matlab yang dilakukan dengan menggunakan Metode Kriteria Sama Luas dan Metode Runge-Kutta Orde 4.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan kesimpulan dan saran yang dapat diberikan berdasarkan analisis dan pembahasan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

Sistem tenaga listrik yang baik adalah sistem tenaga yang dapat melayani beban secara kontinyu tegangan dan frekuensi yang konstan, fluktuasi tegangan dan frekuensi yang terjadi harus berada pada batas toleransi yang diizinkan agar peralatan listrik konsumen dapat bekerja dengan baik dan aman. Oleh karena itu diperlukan suatu analisis sistem tenaga listrik untuk menentukan apakah sistem tersebut stabil atau tidak jika terjadi gangguan. Stabilitas *transient* didasarkan pada kondisi kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dengan periode waktu penyelidikan pada detik pertama terjadi gangguan.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menentukan kestabilan suatu sistem tenaga listrik apabila mengalami gangguan adalah metode kriteria sama luas. Walaupun metode ini tidak dapat dipergunakan untuk sistem multimesin namun sangatlah membantu untuk memahami faktor-faktor dasar yang mempengaruhi stabilitas *transient* sistem tenaga listrik. 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. Dengan menggunakan model sistem tenaga listrik yang terdiri dari sebuah mesin dan 1 bus infinite dengan saluran transmisi ganda dimana gangguan tiga fasa terjadi pada salah satu saluran maka dengan metode kriteria sama luas

UNIVERSITAS MEDAN AREA

menggunakan matlab bahwa dari sistem tenaga listrik tersebut didapatkan nilai

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)22/9/23

sudut kerja awal $20,3231^0$, sudut pemutus kritis $101,1263^0$, sudut ayunan maksimum $151,474^0$, dan waktu pemutusan kritis 0,25 detik, (Ulum, 2007)

Terjadinya gangguan pada sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan terjadinya perubahan parameter-parameter listrik yang berperan penting. Parameter-parameter tersebut antara lain tegangan, arus, daya, kecepatan rotor, frekuensi dan sudut daya. Pada studi stabilitas peralihan ini akan dilihat perubahan parameter-parameter tersebut terhadap lamanya gangguan, dari awal terjadinya gangguan sampai sistem menjadi stabil kembali (*critical clearing time*) bila terjadi gangguan besar. Studi stabilitas peralihan (*transient stability*) ini menyangkut kemampuan sistem untuk tetap dalam keadaan sinkron (stabil) setelah terjadi gangguan yang besar secara tiba-tiba, berupa gangguan hubung singkat tiga fasa simetris pada saluran. Dengan melakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak Matlab akan dilihat unjuk kerja kestabilan suatu sistem tenaga listrik dengan contoh kasus sistem tenaga listrik Model IEEE 9 Bus 3 Mesin. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa unjuk kerja kestabilan *transient* sistem tenaga listrik Model IEEE 9 Bus 3 Mesin menunjukkan unjuk kerja yang memenuhi kriteria yang ditentukan, dengan waktu clearing time sebesar 0.2 detik atau lebih cepat dan waktu studi 3 detik, (Laksono, 2008)

Pada umumnya sistem tenaga listrik dioperasikan secara kontinyu, namun apabila terjadi gangguan pada salah satu pembangkit atau pada rel maka hal ini tidak dipungkiri akan terjadi gangguan pada penyalur daya. Untuk itu perlu diadakan studi stabilitas sistem tenaga yang khususnya sistem dengan pembangkit lebih dari satu unit pembangkit dimana pembangkit yang dekat dengan pusat

pengendalian akan mengalami pemutusan, sedangkan yang lain akan mengalami

Dalam perencanaan penambahan suatu pembangkit baru ke dalam sistem tenaga listrik diperlukan adanya suatu studi terhadap kestabilan peralihan dari sistem yang akan digabungkan. Hasil studi yang didapatkan akan dijadikan bahan pertimbangan dalam menentukan setting pengamanan peralatan. Hal ini dilakukan agar sistem tenaga listrik dapat melayani beban secara kontinyu pada tegangan dan frekuensi yang terjaga demi tercapainya optimalisasi dalam proses penyediaan energi listrik. Pada penelitian ini, metoda analisa kestabilan yang digunakan adalah kriteria sama luas yang berdasarkan pada keseimbangan energi putaran rotor dengan pendekatan representasi grafik. Kondisi peralihan yang dianalisa dalam penelitian ini adalah perubahan daya mekanis peralihan dan gangguan tiga fasa dengan studi kasus dilaksanakan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Besai. Hal ini dilakukan karena Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Besai merupakan pembangkit yang baru beroperasi dalam sistem interkoneksi tenaga listrik PT. PLN Sumatera dengan sub-sistem Sumatera Bagian Selatan Tengah (Sumbagselteng) yang dihubungkan dengan bus Bukit Kemuning. Perhitungan dan analisa dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab dan diperoleh hasil

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 22/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

awal generator adalah 10.585° , penambahan daya mekanis maksimum adalah 2.922 pu, sudut ayunan maksimum 128.728° , dan sudut daya sinkronisasi operasi baru adalah 51.272° . Untuk gangguan tiga fasa simetris pada bus Besai diperoleh sudut kritis pemutusan gangguan sebesar 118.2787° dan waktu kritis pemutusan sebesar 0.3600 detik, untuk gangguan tiga fasa simetris pada saluran tanpa pemutusan saluran setelah gangguan diperoleh sudut kritis pemutusan gangguan adalah 139.6203° dan waktu kritis pemutusan gangguan sebesar 0.600 detik, untuk gangguan tiga fasa simetris pada salah satu saluran dan diikuti dengan pemutusan saluran yang terganggu diperoleh sudut kritis pemutusan gangguan adalah 138.2200° dan waktu pemutusan kritis 0.6000 detik dan bila gangguan dihilangkan pada waktu yang melebihi waktu kritis, maka generator akan kehilangan keserempakannya (out-of-step), (Laksono dan Suri, 2012)

Analisis kestabilan *transient* secara umum dilakukan dengan menggunakan metode simulasi numerik. Terdapat banyak metode dalam menentukan kestabilan *transient* suatu sistem tenaga, sebagai contoh metode kriteria sama luas. Kelemahan metode ini adalah hanya dapat digunakan pada sistem tenaga satu generator yang terhubung pada bus *infinite*. Oleh karena itu, di dalam penelitian ini diusulkan untuk menggunakan metode EEAC (*Extended Equal Area Criterion*) dan Trajectori Kritis/ *Critical Trajectory* agar dapat digunakan pada sistem multimesin. Sebuah sistem multimesin disederhanakan dengan menggunakan metode EEAC, sehingga didapatkan sebuah mesin yang diduga sebagai mesin kritis. Kemudian sistem disederhanakan menjadi sistem SIME. Besar Nilai CCT dan *critical trajectory* dihitung secara bersamaan. Hasil dari program ini perhitungan CCT dengan menggunakan metode *critical*

trajectory menghasilkan CCT sebesar 1.3721 dengan nilai $m=10$ pada sistem tenaga satu generator yang terhubung ke bus *infinite* dengan kontroler dan *damping*. Untuk sistem multimesin 3 generator 9 bus, perhitungan besar nilai CCT yang dilakukan untuk semua titik gangguan yang telah ditentukan belum akurat jika dibanding hasil simulasi T-D (*Time-Domain*). Besar nilai CCT yang ditemukan mendekati nilai CCT yang dihasilkan metode simulasi T-D ada pada titik gangguan A dan B, yaitu 0,3046 dan 0,1803, (*Pratama dkk, 2012*)

Kestabilan menjadi hal yang utama dalam operasi sistem tenaga listrik. Banyak hal yang dapat mempengaruhi kestabilan sistem tenaga listrik, salah satunya adalah beban *non-linear* yang mempengaruhi kestabilan *transient*. Dimana disini beban *non-linear* memberikan dampak fluktuasi terhadap tegangan dan arus pada sistem tenaga listrik. Sehingga terjadi ketimpangan antara daya *input* mekanis (*prime mover*) dengan daya *output* listrik (beban), yang secara tidak langsung mempengaruhi putaran rotor generator, sehingga menyebabkan percepatan (*acceleration*) dan perlambatan (*deceleration*). Pada penelitian ini akan dianalisis pengaruh penggunaan beban *non-linear* terhadap sistem tenaga listrik 9 bus 3 mesin IEEE, sebelum dan sesudah terjadi gangguan (*short circuit*). Analisis yang dilakukan adalah dengan mencari perbedaan respon tegangan, arus, dan putaran rotor generator sebelum dan sesudah gangguan.

Kesimpulan yang didapat dari hasil analisis sistem tenaga listrik sebelum dan sesudah *short circuit*, dengan menggunakan beban *linear* maupun *non-linear* adalah sebagai berikut : Penggunaan beban *non-linear* pada sistem memberikan dampak lebih buruk jika dibandingkan beban yang lainnya, dimana respon *speed*

motor generator untuk beban *non-linear* lebih lama stabil (selisih waktu *steady* ±

0,4 sekon). Terjadi perbedaan waktu $\pm 7,8$ sekon antara respon tegangan dan arus untuk beban *non-linear* dibandingkan dengan beban lainnya. Sebelum terjadinya gangguan (*short circuit*), tidak terjadi perbedaan respon antara tegangan, arus, dan *speed* rotor generator antara ketiga beban. Karena daya *input* lebih besar dari daya *output* (*input* = 567,5 MVA, *output* = 315 MVA), (Priyadi dkk, 2012).

Kestabilan adalah kemampuan mesin sinkron dari sistem tenaga listrik untuk mencapai kondisi stabil pada kondisi operasi baru yang sama atau identik dengan kondisi sebelum terjadi gangguan. Umumnya analisa kestabilan terbagi dalam dua kategori yaitu kestabilan *steady state* yaitu analisa sistem untuk kembali ke kondisi stabil setelah mengalami gangguan kecil dan kestabilan *transient* yaitu analisa sistem untuk kembali ke kondisi normal/stabil setelah mengalami gangguan besar. Studi/analisa stabilitas sangat diperlukan saat perencanaan pembangkit dan transmisi. Analisa/studi stabilitas sistem tenaga listrik membantu untuk menentukan *setting* waktu *on/off* relai proteksi, waktu pemutusan kritis *circuit breaker*, level tegangan dan kapasitas transfer diantara sistem-sistem. Hasil perhitungan yang didapat dalam penelitian itu adalah pemutusan kritis pada line 4-9 dekat bus 4 (*fault cleared at 0,7295 sec*) dan gangguan pada line 4-9 (*fault cleared at 0,7296 sec*), Pemutusan kritis pada line 2-6 dekat bus 2 (*fault cleared at 1,6816 sec*) dan gangguan pada line 2-6 (*fault cleared at 1,6817sec*), Pemutusan kritis pada line 7-8 dekat bus 7 (*fault cleared at 1,0315 sec*) dan gangguan pada line 7-8 (*fault cleared at 1,0316 sec*), (Bijang, 2012).

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 22/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area
Access From (repository.uma.ac.id)22/9/23

Keseimbangan daya antara kebutuhan beban dengan pembangkitan generator merupakan salah satu ukuran kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik pada setiap saat akan selalu terjadi perubahan kapasitas dan letak beban dalam sistem. Perubahan tersebut mengharuskan setiap pembangkit menyesuaikan daya keluarannya melalui kendali governor maupun eksitasi mengikuti perubahan beban sistem. Jika hal ini tidak dilakukan maka akan menyebabkan keseimbangan daya dalam sistem terganggu dan efisiensi pengoperasian sistem menurun menyebabkan kinerja sistem memburuk.

Kecepatan pembangkit memberi reaksi terhadap perubahan yang terjadi dalam sistem menjadi faktor penentu kestabilan sistem. Kestabilan mesin pembangkit sangat tergantung pada kemampuan sistem kendalinya. Sistem kendali yang andal jika mampu mengendalikan mesin tetap beroperasi normal mengikuti perubahan-perubahan yang terjadi dalam sistem. Jika semua mesin tetap beroperasi dalam kondisi normal meskipun ada gangguan, maka sistem tersebut akan benar-benar stabil.

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*).

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. Secara umum permasalahan stabilitas sistem tenaga listrik terkait dengan kestabilan sudut rotor (*Rotor Angle Stability*) dan kestabilan tegangan (*Voltage Stability*). Klasifikasi ini berdasarkan rentang waktu dan mekanisme terjadinya ketidakstabilan. Kestabilan sudut rotor di klasifikasikan menjadi *Small Signal Stability* dan *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.

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

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

Stabilitas *steady state* adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi antara mesin-mesin dalam sistem setelah mengalami gangguan kecil (fluktuasi beban).

Stabilitas *transient* adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak sekitar satu ayunan (*swing*) pertama dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis belum bekerja.

Stabilitas *dynamic* adalah bila setelah ayunan pertama (periode stabilitas *transient*) sistem mampu mempertahankan sinkronisasi sampai sistem dalam keadaan seimbang yang baru (stabilitas *transient* bila AVR dan *governor* bekerja cepat dan diperhitungkan dalam analisis).

Pengertian hilangnya sinkronisasi adalah ketidakseimbangan antara daya pembangkit dengan beban menimbulkan suatu keadaan *transient* 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.

Faktor-faktor utama dalam masalah stabilitas adalah:

UNIVERSITAS MEDAN AREA

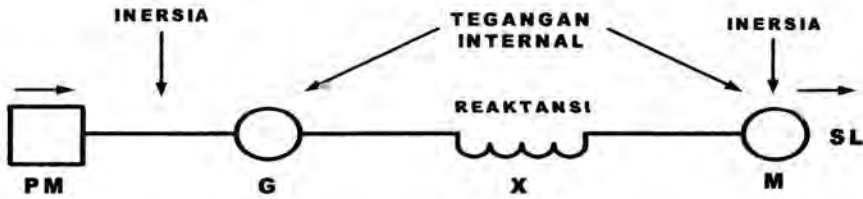
© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 22/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area
Access From (repository.uma.ac.id)22/9/23



Gambar 2.1 Diagram faktor-faktor utama dalam masalah kestabilan

Keterangan :

PM = Prime Mover

G = Generator sinkron

X = Reaktansi saluran

SL = Sumbu beban

1. Faktor mekanis dapat berupa:
 - a. Torsi *input prime* beban.
 - b. Inersia dari *prime mover* dan generator.
 - c. Inersia motor dan sumbu beban.
 - d. Torsi input sumbu beban.
2. Torsi listrik berupa:
 - a. Tegangan internal dari generator sinkron.
 - b. Reaktansi sistem.
 - c. Tegangan internal dari motor sinkron.

2.2.2 Stabilitas Transient Sistem Tenaga Listrik

Situasi yang lebih hebat akan terjadi bila pembangkitan atau beban besar

hilang dari sistem atau terjadi gangguan pada saluran transmisi. Pada kasus

semacam itu stabilitas *transient* harus cukup kuat untuk memperahankan diri

© Hak cipta dilindungi Undang-undang

terhadap kejutan (*shock*) atau perubahan beban yang relatif besar yang terjadi. Stabilitas *transient* adalah kemampuan sistem untuk tetap pada kondisi sinkron (sebelum terjadi aksi dari kontrol governor) yang mengikuti gangguan pada sistem.

Setelah hilangnya pembangkitan atau beban besar secara tiba-tiba, keseimbangan antara energi *input* dan *output* listrik pada sistem akan hilang. Jika energi input tidak lagi mencukupi, inersia rotor mesin yang masih bekerja, pada periode yang singkat, akan melambat. Apabila beban hilang maka energi input pada sistem akan melebihi beban listrik, dan mesin akan bergerak semakin cepat.

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

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

2.2.3 **Dinamika Rotor Dan Persamaan Ayunan**

Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin serempak didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen-momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Dalam sistem unit-unit MKS dan untuk generator serempak, persamaan ini dapat ditulis dalam bentuk:

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

(2.1)

simbol-simbol di atas mempunyai arti sebagai berikut:

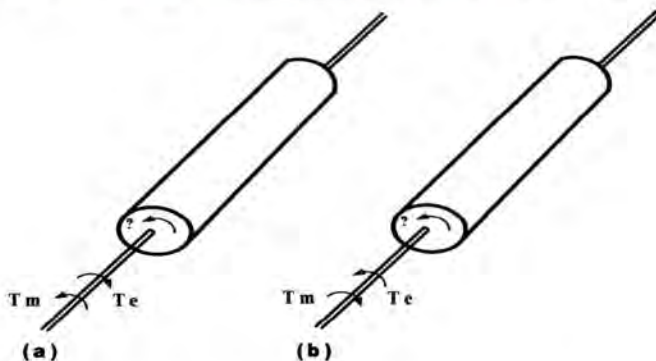
- J = Momen kelembaman total dari massa rotor dalam $kg \cdot m^2$
- θ_m = Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam
 (*stationary*), dalam radian mekanis
- t = Waktu, dalam detik
- T_a = Momen putar percepatan bersih, dalam Nm

UNIVERSITAS MEDAN AREA
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

$$T_e = \text{Momen putar listrik atau elektromagnetis bersih, dalam } Nm$$

Momen putar mekanis T_m dan momen putar listrik T_e dianggap positif untuk generator serempak. Ini berarti bahwa T_m adalah resultan momen putar poros yang mempunyai kecenderungan untuk mempercepat rotor dalam arah putaran θ_m yang positif seperti ditunjukkan Gambar 2.2a. Untuk generator yang bekerja dalam keadaan tetap, T_m dan T_e adalah sama sedangkan momen putar T_a sama dengan nol. Dalam keadaan ini tidak ada percepatan atau perlambatan terhadap massa rotor dan kecepatan tetap resultan adalah kecepatan serempak. Massa yang berputar meliputi rotor dari generator dan penggerak mula dikatakan dalam keadaan serempak dengan mesin lainnya yang bekerja pada kecepatan serempak dalam sistem daya tersebut. Penggerak mulanya mungkin berupa suatu turbin air atau turbin uap dan untuk masing-masing turbin sudah ada model dengan bermacam-macam tingkat kesulitan untuk melukiskan pengaruh pada T_m .



Gambar 2.2 Representasi suatu rotor mesin yang membandingkan arah perputaran serta momen putar mekanis dan listrik untuk (a) generator dan (b) motor (Stevenson, 1996:352).

T_m dianggap konstan pada setiap keadaan kerja yang diberikan. Anggapan ini cukup baik untuk beberapa generator meskipun masukan dari penggerak mulanya diatur oleh regulator (*governor*). Regulator tidak bekerja sebelum dirasakan perubahan pada kecepatan. Momen putar elektris T_e bersesuaian dengan daya bersih celah udara mesin. Dengan demikian adalah daya keluaran total dari generator ditambah dengan rugi-rugi $|I^2| R$ dalam gulungan jangkar. Dalam motor serempak arah aliran daya berlawanan dengan generator. Oleh karena itu untuk motor, T_e dan T_m pada persamaan (2.1) akan terbalik tandanya seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.2b. Di sini T_e adalah daya celah udara yang diberikan oleh sistem tenaga listrik untuk menggerakkan rotor, sedangkan T_m merupakan momen putar tandingan (*counter torque*) beban dan rugi putaran yang cenderung untuk memperlambat rotor.

Karena θ_m diukur terhadap sumbu pedoman yang diam pada stator maka θ_m adalah ukuran absolut sudut rotor. Karena itu pula θ_m akan terus bertambah dengan waktu bahkan pada kecepatan serempak yang konstan. Karena itu menaruh perhatian pada kecepatan rotor relatif terhadap kecepatan serempak adalah lebih mudah untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu pedoman yang berputar dengan kecepatan serempak.

Dengan demikian

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (2.2)$$

di mana

$$\omega_{sm} = \text{Kecepatan serempak mesin dalam radius mekanis per detik}$$

δ_m = Pergeseran sudut rotor dalam radius mekanis dari sumbu pedoman yang berputar dengan kecepatan serempak dalam radian mekanis

Dengan menurunkan persamaan (2.2) terhadap waktu diperoleh

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.3)$$

dan

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.4)$$

di mana

$\frac{d\theta_m}{dt}$ = Kecepatan sudut rotor dalam radian mekanis per detik
 $\frac{d\delta_m}{dt}$ = Penyimpangan kecepatan rotor dari keadaan rotor keadaan serempak dan unit ukurannya adalah radian mekanis per detik

Persamaan (2.4) memberikan kecepatan rotor yang diukur dalam radian mekanis per detik pangkat dua. Dengan mensubstitusikan persamaan (2.3) dan (2.4) diperoleh

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (Nm) \quad (2.5)$$

Untuk mempermudah notasinya

$$\omega_{sm} = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.6)$$

Daya adalah perkalian antara momen putar dengan kecepatan sudut, maka

$$J \omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (Nm) \quad (2.7)$$

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.

$J\omega_m$ = Momentum sudut (*angular momentum*) rotor pada kecepatan serempak

Biasanya rugi-rugi perputaran dan rugi-rugi $|I^2| R$ jangkar dapat diabaikan sehingga P_m dapat dianggap sebagai daya yang dicatu oleh penggerak mula P_e sebagai keseluruhan daya listrik.

Koefisien $j\omega_m$ adalah momentum sudut (*angular momentum*) rotor pada kecepatan serempak ω_m . Momen ini dapat dinyatakan dengan M dan disebut konstanta kelembaman (*inertia constant*) dari mesin tersebut. Jelas bahwa unit-unit yang menyatakan M harus sesuai dengan unit untuk j dan ω_m . Dengan meneliti unit pada masing-masing suku persamaan (2.7) diperoleh M dinyatakan dalam *joule-detik per-radian* dan dapat dituliskan dengan

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (W) \quad (2.8)$$

Meskipun menggunakan M dalam persamaan ini, koefisien tersebut bukanlah suatu konstanta dalam arti yang sebenarnya karena ω_m tidak sama dengan kecepatan serempak pada semua keadaan kerja, tetapi dalam praktik ω_m tidak berlaku berbeda dari kecepatan serempak bila mesin stabil dan karena daya lebih memudahkan perhitungan dari momen putar, persamaan (2.8) lebih banyak

konstanta yang hubungannya dengan kelembaman, konstanta dinamakan H yang didefinisikan sebagai

$$H = \frac{\text{Daya kinetis yang disimpan dalam Megajoule pada kecepatan serempak}}{\text{Rating dalam MVA}}$$

dan

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{mach}} \quad (MJ / MVA) \quad (2.9)$$

di mana :

S_{mach} = Batas kemampuan kerja (*rating*) tiga fasa dalam MVA.

H = Konstanta yang berhubungan dengan kelembaman.

Dengan menyelesaikan untuk M pada persamaan (2.9) diperoleh

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} \quad (MJ/\text{radian mekanis}) \quad (2.10)$$

dan dengan memasukkan persamaan (2.1) diperoleh

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{mach}} = \frac{P_m - P_e}{S_{mach}} \quad (2.11)$$

Bahwa δ_m pada pembilang persamaan (2.8) dinyatakan dalam radian mekanis sedangkan ω_m pada penyebut dinyatakan dalam radian mekanis per detik.

Oleh karena itu dapat ditulis

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (\text{per unit}) \quad (2.12)$$

di mana

ω_s = Kecepatan serempak dalam satuan listrik untuk suatu sistem

dengan frekuensi sebesar $H\omega_s$

Asal saja δ maupun ω_s mempunyai satuan konsisten yang mungkin dalam derajat mekanis, listrik, atau radian. H dan t mempunyai satuan konsisten karena *megajoule per megavoltampere* adalah dalam satuan detik dan P_a , P_m , dan P_e harus dalam satuan dengan dasar yang sama seperti H . Bila subskrip M dihubungkan pada ω , ω_s , dan δ , itu berarti bahwa yang digunakan adalah satuan mekanis, jika tidak demikian yang dimaksud adalah daya listrik. Persamaan (2.12) menjadi

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (\text{per unit}) \tag{2.13}$$

Bila δ dinyatakan dalam radian listrik sedangkan

$$\frac{H}{180 f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (\text{per unit}) \tag{2.14}$$

Persamaan (2.14) disebut persamaan ayunan mesin merupakan persamaan dasar yang mengatur dinamika (gerak) putar mesin serempak. Dalam studi kestabilan persamaan tersebut adalah persamaan differensial orde kedua yang dapat dituliskan sebagai dua buah persamaan differensial orde pertama di mana ω , ω_s

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (\text{per unit}) \tag{2.15}$$

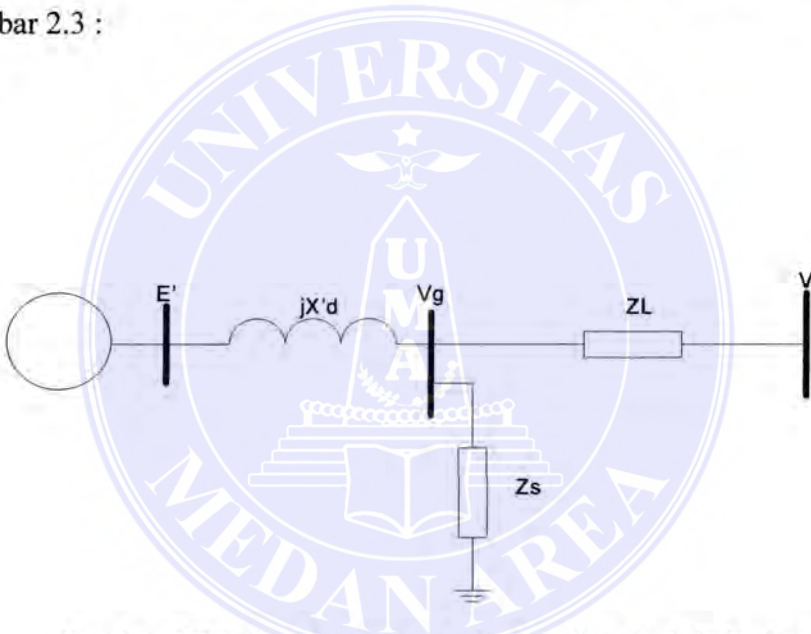
$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \tag{2.16}$$

Dan δ adalah menyangkut radian listrik dan derajat listrik. Berbagai bentuk ekuivalen dari persamaan akan digunakan untuk menentukan sebuah mesin

dalam sistem daya. Bila persamaan tersebut diselesaikan maka diperoleh rumusan untuk δ sebagai fungsi waktu. Grafik penyelesaian ini disebut kurva ayunan (*swing curve*) mesin dan dengan meneliti kurva ayunan semua mesin dalam sistem akan terlihat bahwa mesin akan serempak meskipun terjadi gangguan.

2.2.4 Pemodelan Mesin Serempak Untuk Studi Kestabilan

Sebuah Generator dihubungkan ke Infinite bus sebagaimana dinyatakan pada gambar 2.3 :



Gambar 2.3 Sebuah generator dihubungkan ke infinite bus (Cekdin.2006:232)

Tegangan generator adalah konstan dengan reaktansi transient sumbu langsung X'_d . Representasi titik tegangan terminal generator V_g dapat dieliminasi dengan mentransformasikan impedansi dari hubungan Y ke hubungan Δ , sehingga admitansi yang dihasilkan adalah :

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

UNIVERSITAS MEDAN AREA

(2.17)

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

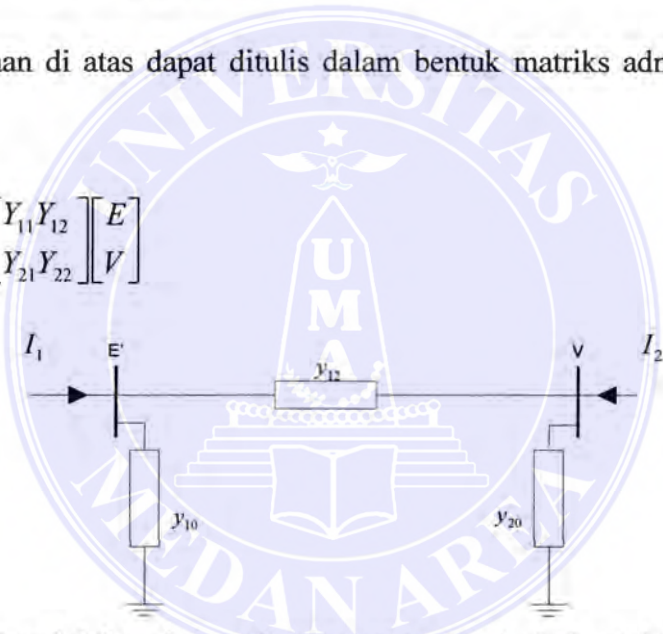
Rangkaian ekivalen dengan tegangan dinyatakan oleh titik 1 dan *infinite bus* oleh titik 2 dapat diperlihatkan pada gambar 2.4 Penulisan persamaan *node* (titik simpul) adalah :

$$I_1 = (y_{10} + y_{12})E - y_{12}V \tag{2.18}$$

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

Persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk matriks admitansi sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ V \end{bmatrix} \tag{2.19}$$



Gambar 2.4 Rangkaian ekivalen satu mesin terhubung ke infinite bus (Cekdin.2006:233)

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:

$$P_e = R[E' x I_1^*]$$
$$P_e = R[|E'| \angle \delta (|Y_{11}| \angle -\theta_{11} |E'| \angle -\delta + |Y_{12}| \angle -\theta_{12} |V| \angle 0)]$$

$$P_e = |E'|^2 |Y_{11}| \cos \theta_{11} + |E'| |V| |Y_{12}| \cos(\delta - \theta_{12}) \quad (2.20)$$

Jika harga $\theta_{11} = \theta_{12} = 90^\circ$, dan $Y_{12} = B_{12} = \frac{1}{X_{12}}$, sehingga persamaan (2.20),

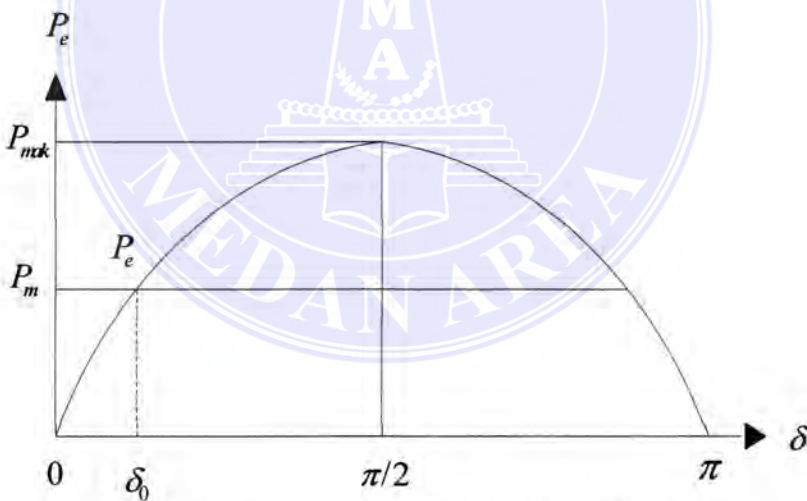
menjadi:

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

Atau

$$P_e = \frac{|E'| |V|}{X_{12}} \sin \delta \quad (2.21)$$

Dari persamaan (2.21) di atas dapat dinyatakan bahwa hubungan daya yang ditransmisikan tergantung pada reaktansi X_{12} dan sudut δ dikenal sebagai kurva sudut daya yang dapat diperlihatkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Kurva sudut daya (Cekdin.2006:233)

Daya maksimum dapat dipandang sebagai batas stabilitas keadaan mantap (*Steady State Stability Limit*), terjadi pada sudut 90° yang dinyatakan dengan:

$$P_e = \frac{|E'| |V|}{X_{12}} \quad (2.22)$$

$$P_e = P_{mak} \sin \delta \tag{2.23}$$

Jika generator tiba-tiba terhubung singkat, maka tegangan E' dapat dihitung dengan:

$$E = V_g + jX'_d I_a \tag{2.24}$$

Dengan I_a adalah arus generator sebelum gangguan.

2.2.5 Menentukan Stabilitas Transient Dengan Metode Kriteria Sama Luas

Studi stabilitas *transient* meliputi penentuan tercapai atau tidaknya keserempakan setelah mesin mengalami gangguan. Gangguan tersebut dapat berupa pembebanan tiba-tiba, kehilangan pembangkit, kehilangan beban yang besar, ataupun gangguan pada sistem.

Suatu metode yang dapat digunakan untuk memprediksi stabilitas yang 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 (2.13) dapat digunakan untuk menurunkan metode kriteria sama luas sebagai berikut:

$$\frac{H}{\pi \cdot f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_a$$

Dengan P_a adalah daya percepatan. Dari persamaan di atas di dapatkan:

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

Jika kedua sisi kiri dan kanan dari persamaan di atas dikalikan dengan

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

Dapat ditulis dalam bentuk yang lain sebagai berikut:

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

Atau

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

Integrasi kedua sisi kiri dan kanan menghasilkan:

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

Atau

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right) = \sqrt{\frac{2\pi f_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta} \quad (2.25)$$

Bila pada persamaan (2.25) kecepatannya menjadi nol sesaat setelah gangguan, maka di dapatkan kriteria sama luas sebagai berikut:

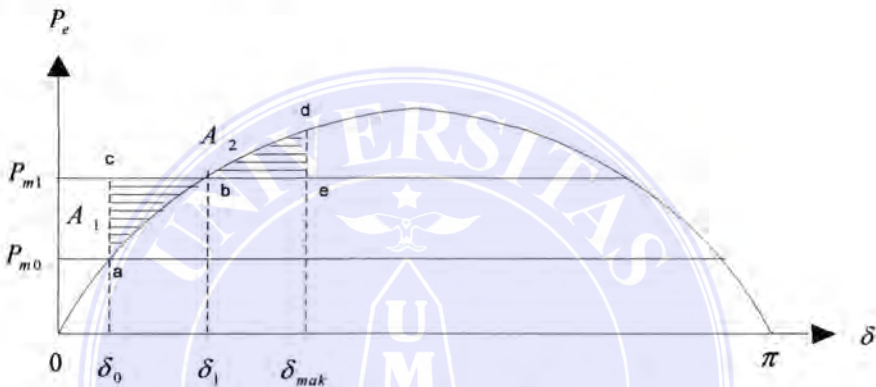
$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.26)$$

Mesin bekerja pada titik setimbang δ_0 . Pada titik ini daya input mekanik $P_{m0} = P_{e0}$ seperti ditunjukkan pada gambar 2.6. 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 :

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = \text{luas abc} = \text{luas } A_1 \tag{2.27}$$

Dengan 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 serempak. Oleh karena itu sudut daya δ dan daya listrik P_e bertambah secara kontinyu.



Gambar 2.6 Kriteria sama luas pada perubahan beban mendadak (Cekdin.2006:235)

Sekarang $P_m < P_e$ yang menyebabkan motor diperlambat kearah kecepatan serempak hingga $\delta = \delta_{mak}$, maka kelebihan energi yang tersimpan pada rotor selama perlambatan adalah sebagai berikut :

$$\int_{\delta_1}^{\delta_{mak}} (P_m - P_e) d\delta = \text{luas bde} = \text{luas } A_2 \tag{2.28}$$

Dari persamaan (2.27) dan (2.28) didapatkan suatu hubungan :

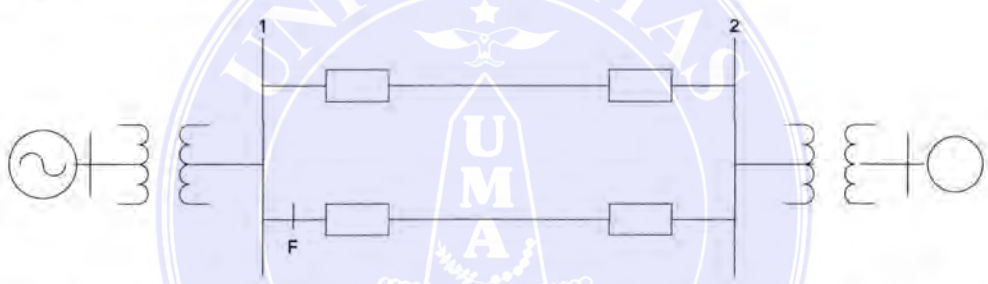
$$|\text{luas } A_1| = |\text{luas } A_2| \tag{2.29}$$

Persamaan (2.29) dikenal sebagai kriteria sama luas.

2.2.6 Aplikasi Pada Gangguan Tiga Fasa
UNIVERSITAS MEDAN AREA

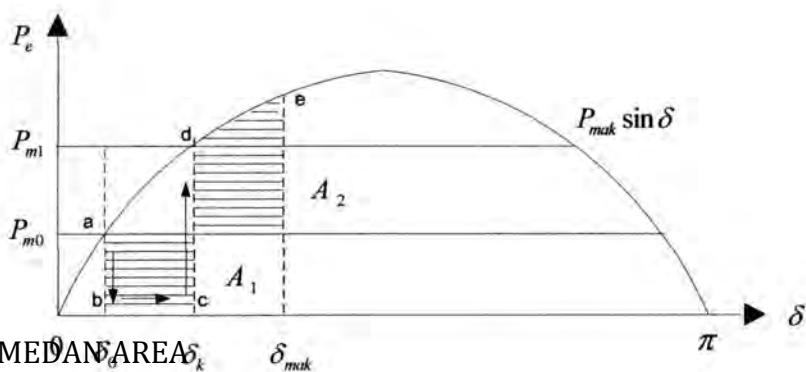
Untuk keandalan yang sempurna, suatu sistem harus dirancang untuk kestabilan peralihan terhadap gangguan tiga fasa pada lokasi yang menimbulkan pengaruh terburuk, dan ini sudah merupakan praktek yang dijalankan secara universal (Stevenson.1996:373).

Perhatikan gambar 2.7 di mana sebuah generator di hubungkan ke infinite bus melalui dua kawat paralel. Gangguan tiga fasa sesaat terjadi pada salah satu saluran dekat bus1, 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 2.8



Gambar 2.7 Sistem satu mesin terhubung ke infinite bus, gangguan tiga fasa pada F

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 2.8.



Gambar 2.8 Kriteria sama luas untuk gangguan tiga fasa pada ujung kirim (Cekdin,2006:236)

Pada gambar 2.8 sudut motor 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 serempak meskipun sudut rotor sudah maju sampai δ_{mak} . Sudut δ_{mak} ditentukan dari kriteria sama luas yaitu $A_1 = A_2$.

Sudut pemutus kritis δ_k (*Critical Clearing Angle*) ini dapat dicari dengan menggunakan kriteria sama luas seperti ditunjukkan pada gambar 2.9 sebagai berikut:

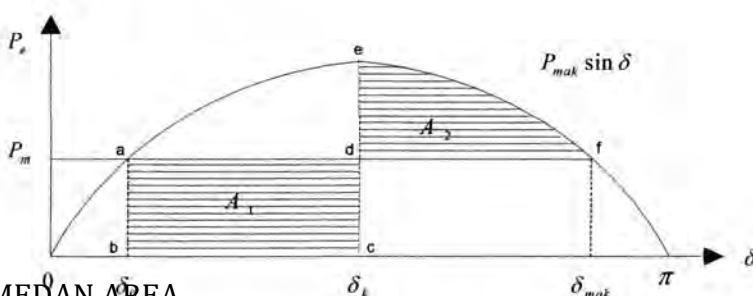
$$\int_{\delta_0}^{\delta_k} P_m d\delta = \int_{\delta_k}^{\delta_{mak}} (P_{mak} \sin \delta - P_m) d\delta \quad (2.30)$$

Dengan mengintegrasikan kedua sisi kiri dan kanan didapatkan:

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

Penyelesaian untuk harga δ_k adalah:

$$\cos \delta_k = \frac{P_m}{P_{mak}} (\delta_{mak} - \delta_0) + \cos \delta_{mak} \quad (2.31)$$



Gambar 2.9 Kriteria sama luas untuk mencari sudut pemutus kritis akibat gangguan tiga fasa pada ujung kirim (Cekdin.2006:237)

Untuk menentukan waktu pemutus kritis t_k , diperlukan penyelesaian persamaan ayunan non linear. Dalam hal ini, dimana daya listrik selama gangguan adalah nol, penyelesaian analitik untuk waktu pemutus kritis (*Critical Clearing Time*) dapat ditentukan. Dari persamaan ayunan yang diberikan oleh persamaan (2.13) dapat ditentukan waktu pemutus kritis, dimana selama gangguan terjadi $P_e = 0$, sehingga waktu pemutus kritis dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\frac{H}{\pi \cdot f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m \quad (2.32)$$

Atau

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi \cdot f_0}{H} P_m \quad (2.33)$$

Integrasi kedua sisi kiri dan kanan menghasilkan:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi \cdot f_0}{H} P_m \int_0^t dt = \frac{\pi \cdot f_0}{H} P_m t \quad (2.34)$$

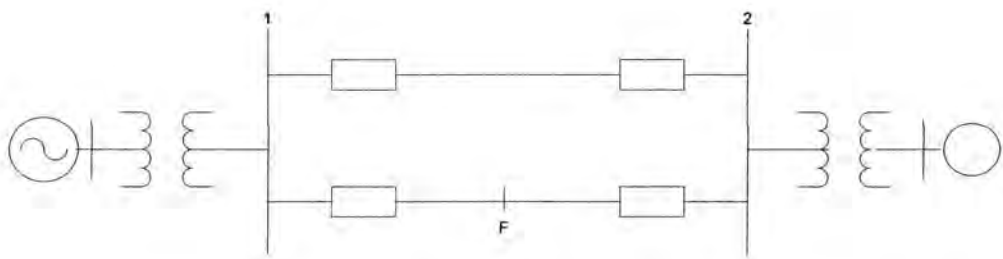
Dengan mengintegrasikan sekali lagi didapatkan:

$$\delta = \frac{\pi \cdot f_0}{H} P_m t + \delta_0 \quad (2.35)$$

Kemudian δ_k adalah sudut pemutus kritis (*Critical Clearing Angle*) yang hubungannya dengan waktu pemutus kritis adalah:

$$t_k = \sqrt{\frac{2H(\delta_k - \delta_0)}{\pi \cdot f_0 P_m}} \quad (2.36)$$

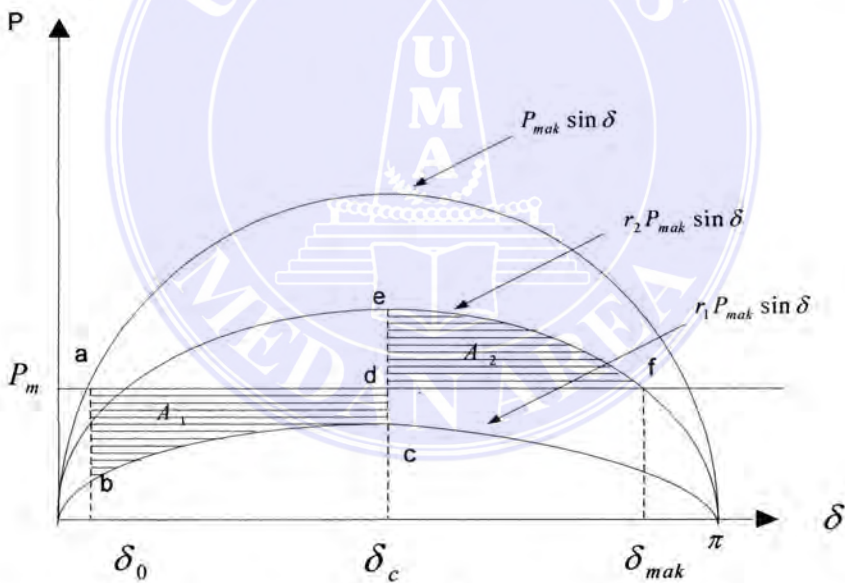
Sekarang perhatikan lokasi gangguan F yang terpisah (jauh) dari sisi kirim, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Sistem satu mesin terhubung ke infinite bus, gangguan tiga fasa pada F

Jika daya ditransfer sebelum gangguan adalah $P_{mak} \sin \delta$, selama gangguan daya di transfer adalah $r_1 P_{2mak} \sin \delta$. Dengan menggunakan kriteria sama luas dari gambar 2.11 dapat ditentukan sudut pemutus kritis sebagai berikut:

$$P_m (\delta_k - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_k} r_1 P_{mak} \sin \delta d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{mak}} r_2 P_{mak} \sin \delta d\delta - P_m (\delta_{mak} - \delta_k) \tag{2.37}$$



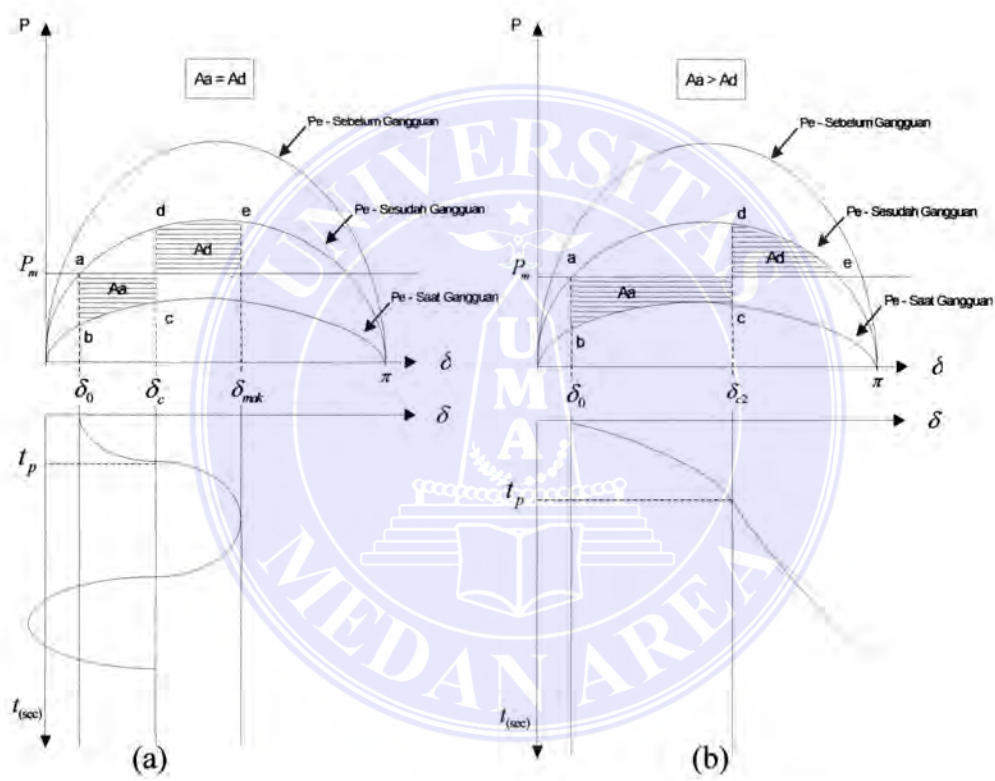
Gambar 2.11 Kriteria sama luas untuk sudut pemutus kritis akibat gangguan tiga fasa yang jauh dari ujung kirim (Cekdin.2006:238)

Dengan mengintegrasikan kedua sisi kiri dan kanan akhirnya didapatkan sudut pemutus kritis δ_k sebagai berikut:

$$\cos \delta_k = \frac{(P_m / P_{mak})(\delta_{mak} - \delta_0) + r_2 \cos \delta_{mak} - r_1 \cos \delta_0}{r_2 - r_1} \tag{2.38}$$

2.2.7 Penyelesaian Numerik Persamaan Diferensial Nonlinear

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.



Gambar 2.12 (a) analisa ayunan pertama untuk contoh sistem stabil, (b) analisa ayunan pertama untuk contoh sistem tidak stabil.

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 yang pada pokoknya merupakan duplikat dari ketelitian sebuah

polinomial taylor. Kesederhanaanya telah membuat metode ini menjadi sangat populer, metode tersebut dapat diturunkan seperti dibawah ini:

1. Metode Runge-Kutta Orde 2

Perhatikan deret taylor untuk $y(t+h)$ sebagai berikut

$$y(t+h) = y(t) + \frac{1}{2}hy''(t)$$

Dengan

$$f_0 = f(t, y)$$

$$f_1 = f(t + Ph, y + Qhf_0)$$

Maka metode umum runge kutta orde 2 adalah

$$y(t+h) = y(t) + \frac{1}{2}(f_0 + f_1)$$

2. Metode Runge-Kutta Orde 4

Dengan Penyelesaian Runge-Kutta Orde 4, dimana untuk menentukan harga $x(t)$, tentukan terlebih dahulu empat konstanta berikut:

$$k_1 = f(t_i, x_i)\Delta t \quad (2.39)$$

$$k_2 = f\left(t_i + \frac{1}{2}\Delta t, x_i + \frac{1}{2}k_1\right)\Delta t \quad (2.40)$$

$$k_3 = f\left(t_i + \frac{1}{2}\Delta t, x_i + \frac{1}{2}k_2\right)\Delta t \quad (2.41)$$

$$k_4 = f(t_i + \Delta t, x_i + k_3)\Delta t \quad (2.42)$$

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

$$x_{i+1} = x_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.43)$$

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 22/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area
Access From (repository.uma.ac.id)22/9/23



3. Penyelesaian Numerik Persamaan Ayunan

Untuk menentukan penyelesaian persamaan ayunan pada gambar 2.11 dimana daya input P_m diasumsikan konstan, pada operasi *steady state* dimana $P_e = P_m$ dan sudut daya mula-mula diberikan oleh :

$$\delta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{P_m}{P_{1mak}} \right) \quad (2.44)$$

Dengan

$$P_{1mak} = \frac{|E'| |V|}{X_1} \quad (2.55 \quad 35)$$

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

$$\omega_0 = 0 \quad (2.46)$$

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

$$P_{2mak} = \frac{|E'| |V|}{X_2} \quad (2.47)$$

Dengan X_2 adalah reaktansi transfer selama gangguan. Dengan demikian persamaan ayunan yang diberikan oleh persamaan (2.13) adalah:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} (P_m - P_{2mak} \sin \delta) = \frac{\pi f_0}{H} P_a \quad (2.48)$$

Persamaan ayunan diatas ditransformasikan kedalam bentuk pernyataan variabel sebagai berikut:

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

(2.49)

Document Accepted 22/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repository.uma.ac.id)22/9/23

$$\frac{d\omega}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} P_a \quad (2.50)$$

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 :

$$k_1 = f(\delta_i, \omega_i) \Delta t = \omega_i \Delta t \quad (2.51)$$

$$l_1 = g(\delta_i, \omega_i) \Delta t = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \Delta t \quad (2.52)$$

$$k_2 = f\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_1, \omega_i + \frac{1}{2} l_1\right) \Delta t = \left(\omega_i + \frac{1}{2} l_1\right) \Delta t \quad (2.53)$$

$$l_2 = g\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_1, \omega_i + \frac{1}{2} l_1\right) \Delta t = \frac{\pi f}{H} \left(P_m - P_e \sin\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_1\right)\right) \Delta t \quad (2.54)$$

$$k_3 = f\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_2, \omega_i + \frac{1}{2} l_2\right) \Delta t = \left(\omega_i + \frac{1}{2} l_2\right) \Delta t \quad (2.55)$$

$$l_3 = g\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_2, \omega_i + \frac{1}{2} l_2\right) \Delta t = \frac{\pi f}{H} \left(P_m - P_e \sin\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_2\right)\right) \Delta t \quad (2.56)$$

$$k_4 = f(\delta_i + k_3, \omega_i + l_3) \Delta t = (\omega_i + l_3) \Delta t \quad (2.57)$$

$$l_4 = g(\delta_i + k_3, \omega_i + l_3) \Delta t = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e \sin(\delta_i + k_3)) \Delta t \quad (2.58)$$

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

$$\delta_{i+1} = \delta_i + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.59)$$

$$\omega_{i+1} = \omega_i + \frac{1}{6} (l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) \quad (2.60)$$

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Adapun lokasi yang digunakan sebagai objek penelitian adalah PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan Jl. P. Sicanang No 1 Belawan-Medan 20416.

3.2 Peralatan Penelitian

Adapun peralatan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut ini :

1. Satu unit Notebook

Merk : Acer Aspire 4730Z

Processor : Intel®Pentium®dual-core (2.0 GHz, 800 MHz FSB)

Installed memory (RAM) : 1 GB DDR2

System type : 32 bit operating system

Fungsi : Sebagai alat simulasi program matlab

2. Satu unit Flashdrive

Merk : Kingston

Kapasitas : 4 GB

Fungsi : Untuk memindahkan data-data yang dibutuhkan peneliti

3. Satu unit software program matlab version 6.1.0

Fungsi : Untuk instalasi program matlab

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 22/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area
Access From (repository.uma.ac.id)22/9/23

3.3 Data Penelitian

3.3.1 Data Generator

Merk	= ABB Synchronous
Tegangan	= (11000±5%) Volt
Arus	= 800 Ampere
Kecepatan	= 500 r.p.m
Kapasitas kVA	= 24156 kVA = 24,15 MVA
Cos phi	= 0,8 lagging
frekuensi	= 50 Hz
Tegangan Excitation	= 185 Volt
Arus Excitation	= 1476 A
Reaktansi Generator (Xq)	= 0,125 Pu

3.3.2 Data Trafo

Merk	= ABB Synchronous
Rating Power ON AN	= 45874 kVA = 45,87 MVA
Rating Power ON AF	= 60975 kVA = 60,97 MVA
Frequency	= 50 Hz
Insul level	= 170/12,5
Impedansi Voltage	= 11,58 %
Ratio	= 400/2
Rating	= 15 VA
Reaktansi Trafo (XT)	= 0,21 Pu

Tabel 3.1 Trafo sisi primer

LV	
voltage (V)	current (A)
11000	4264

Tabel 3.2 Trafo sisi skunder

HV		
Pos N	Voltage (V)	Current (A)
1	157500	298
2	153750	305
3	150000	313
4	146250	321
5	142500	329

3.3.3 Data Saluran Transmisi

- Panjang saluran = 12,400 KM
- Jumlah Tower = 22 Tower
- Jenis Kabel = ACSR (Drake) 2x400mm²
- Reaktansi Kabel = 0,399 Pu = 0,40 Pu
- Resistansi = 0,1284 Pu = 0,13 Pu

3.4 Jenis Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis penelitian langsung yang dilakukan untuk mengumpulkan data atau informasi yang dibutuhkan dengan cara meneliti langsung di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan. Teknik yang digunakan dalam pengumpulan data itu adalah

3.4.1 Wawancara (*Interview*)

Metode ini digunakan untuk memperoleh data atau informasi dengan cara percakapan langsung dengan pegawai atau operator yang ada di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan untuk mendapatkan data yang dibutuhkan

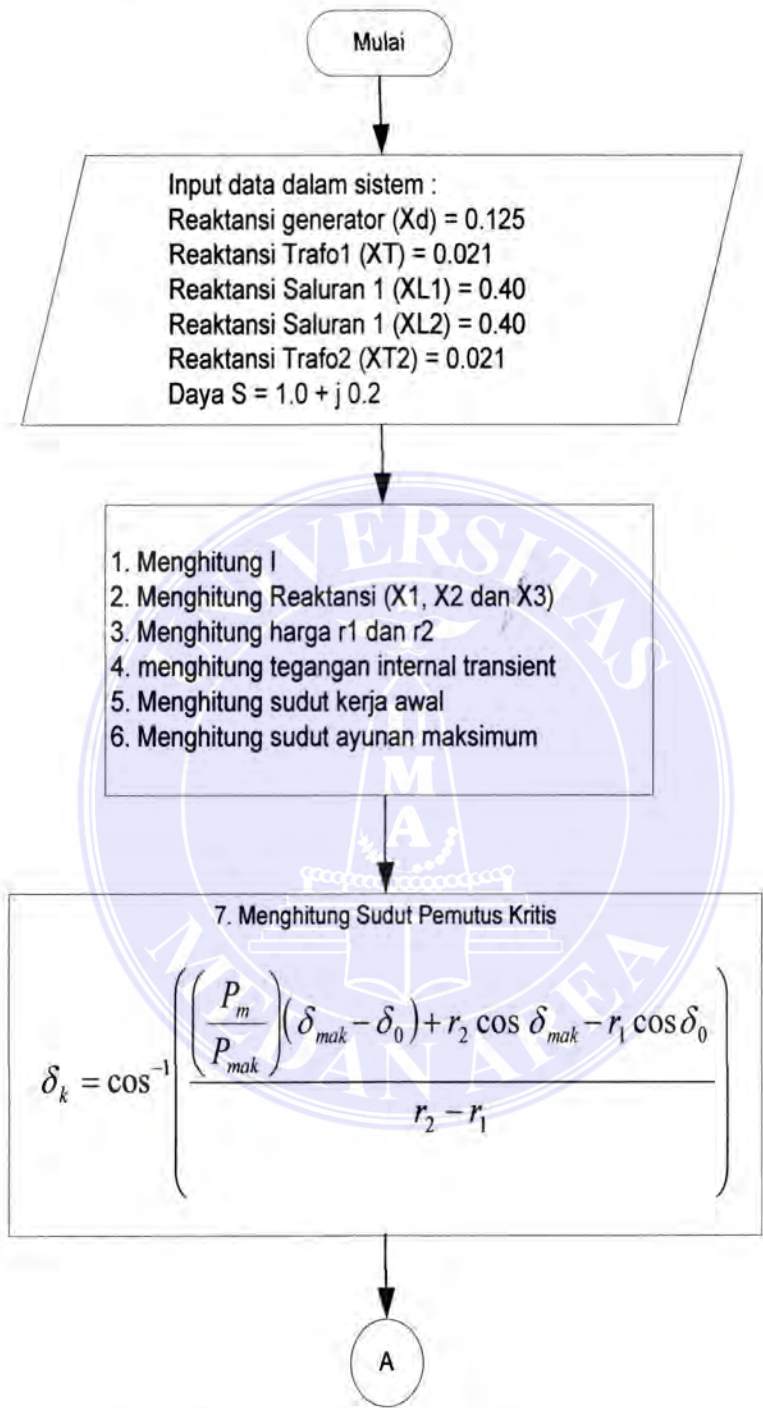
3.4.2 Metode Obsevasi

Metode ini dilakukan dengan pengamatan dilingkungan kerja, pengamatan yang dilakukan adalah mengamati generator yang sedang beroperasi di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan, mengamati transformator daya yang sedang beroperasi di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan dan mengamati saluran transmisi dari PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA Belawan sampai ke pembangkit PLTU Sicanang.

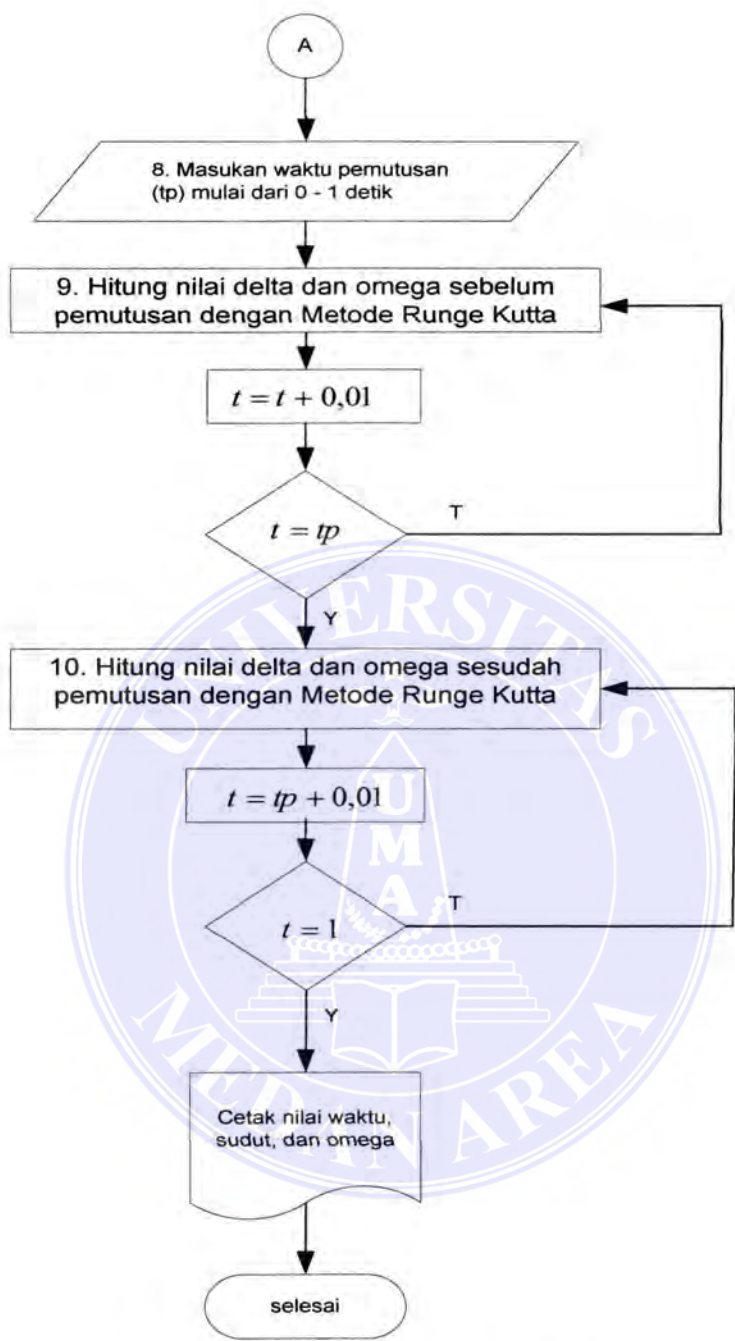
3.5 Teknik Analisis Data

Teknik analisa data sangat diperlukan dalam proses menganalisis data dengan memasukan data yang diperoleh dari penelitian langsung di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA. Data-data tersebut di analisis dengan metode kriteria sama luas dan metode runge-kutta orde 4 dengan menggunakan bahasa pemrograman Matlab, sehingga diperoleh hasil analisis yang valid dan obyektif. Teknik analisa data menggunakan kriteria sama luas dan metode runge-kutta orde 4 dengan alur penelitian sebagai berikut :

3.5.1 Algoritma Penelitian.



Gambar 3.1 (a) Algoritma penelitian



Gambar 3.1 (b) Algoritma penelitian

Keterangan :

Data sesuai dengan data-data yang diambil dilapangan :

1. Menghitung Arus yang mengalir ke Infinite bus (I)

2. Menghitung reaktansi transfer antara tegangan internal dan infinite bus :
 - Sebelum gangguan (X_1)
 - Selama gangguan (X_2)
 - Setelah Gangguan (X_3)

3. Menghitung harga r_1 dan r_2

$$r_1 = \frac{X_1}{X_2} \qquad r_2 = \frac{X_1}{X_3}$$

4. Menghitung tegangan internal transient (E^*)

$$E = V + jX_1 \times I$$

5. Menghitung sudut kerja awal (δ_0)

$$P_{mak} = \frac{ExV}{X_1}$$

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

6. Menghitung sudut ayunan maksimum (δ_{mak})

$$Pe_{2mak} = \frac{r_2 EV}{X_1}$$

$$\delta_{mak} = 180 - \sin^{-1} \left(\frac{S}{Pe_{2mak}} \right)$$

7. Menghitung sudut pemutus kritis (δ_k)

$$\delta_k = \cos^{-1} \left(\frac{\left(\frac{P_m}{P_{mak}} \right) (\delta_{mak} - \delta_0) + r_2 \cos \delta_{mak} - r_1 \cos \delta_0}{r_2 - r_1} \right)$$

8. Masukkan waktu pemutusan mulai dari nol sampai satu detik (t_p)
9. Hitung nilai delta dan omega sebelum waktu pemutusan dengan metode

Runge-Kutta Orde 4.

UNIVERSITAS MEDAN AREA

$$k_1 = f(\delta_i, \omega_i) \Delta t = \omega_i \Delta_i$$

$$l_1 = g(\delta_i, \omega_i) \Delta_i = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \Delta_i = \frac{\pi f}{H} (P_m - r_1 P_{mak} \sin \delta_i) \Delta_i$$

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

$$l_2 = g\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_1, \omega_i + \frac{1}{2} l_1\right) \Delta_i = \frac{\pi f}{H} \left(P_m - r_1 P_{mak} \sin\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_1\right)\right) \Delta_i$$

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

$$l_3 = g\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_2, \omega_i + \frac{1}{2} l_2\right) \Delta_i = \frac{\pi f}{H} \left(P_m - r_1 P_{mak} \sin\left(\delta_i + \frac{1}{2} k_2\right)\right) \Delta_i$$

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

$$l_4 = g(\delta_i + k_3, \omega_i + l_3) \Delta_i = \frac{\pi f}{H} (P_m - r_1 P_{mak} \sin(\delta_i + k_3)) \Delta_i$$

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

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

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

10. Hitung nilai delta dan omega sesudah waktu pemutusan dengan metode Runge-Kutta Orde 4.

$$k_1 = f(\delta_i, \omega_i) \Delta t = \omega_i \Delta_i$$

$$l_1 = g(\delta_i, \omega_i) \Delta_i = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \Delta_i = \frac{\pi f}{H} (P_m - r_2 P_{mak} \sin \delta_i) \Delta_i$$

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

$$l_2 = g\left(\delta_i + \frac{1}{2}k_1, \omega_i + \frac{1}{2}l_1\right)\Delta t = \frac{\pi f}{H}\left(P_m - r_2 P_{mak} \sin\left(\delta_i + \frac{1}{2}k_1\right)\right)\Delta t,$$

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

$$l_3 = g\left(\delta_i + \frac{1}{2}k_2, \omega_i + \frac{1}{2}l_2\right)\Delta t = \frac{\pi f}{H}\left(P_m - r_2 P_{mak} \sin\left(\delta_i + \frac{1}{2}k_2\right)\right)\Delta t,$$

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

$$l_4 = g(\delta_i + k_3, \omega_i + l_3)\Delta t = \frac{\pi f}{H}(P_m - r_2 P_{mak} \sin(\delta_i + k_3))\Delta t,$$

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

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

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

3.5.2 Pengujian

- a) Bila waktu pemutusan (breaker terbuka) dengan nilai sudut clearing (*clearing angle*) sama dengan atau lebih kecil dari nilai sudut pemutus kritis ($\delta_p \leq \delta_k$) akan didapat kestabilan kembali dalam sistem tenaga listrik.
- b) Bila waktu pemutusan (breaker terbuka) dengan nilai sudut clearing (*clearing angle*) lebih besar dari nilai sudut pemutus kritis ($\delta_p > \delta_k$) tidak akan didapatkan kestabilan sistem tenaga listrik.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan analisis stabilitas sistem tenaga listrik PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA dengan metode runge-kutta orde 4 dengan model sistem tenaga listrik yang diambil dari *single line* yang ada di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA sampai ke PLTU Sicanang, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Metode runge-kutta orde 4 dapat digunakan untuk menentukan besar waktu pemutusan kritis (*Critical Clearing time*), bila dalam penelitian ini waktu pemutusan (breaker terbuka) dengan nilai sudut clearing (*clearing angle*) adalah sama dengan atau lebih kecil dari nilai sudut pemutus kritis ($\delta_p \leq \delta_k$) akan didapat kestabilan pada sistem tenaga listrik dan sebaliknya bila waktu pemutusan (breaker terbuka) dengan nilai sudut clearing (*clearing angle*) adalah lebih besar dari nilai sudut pemutus kritis ($\delta_p > \delta_k$) tidak akan didapatkan kestabilan pada sistem tenaga listrik.
2. Dari pengujian dan analisis dengan metode runge-kutta orde 4 menggunakan program matlab didapatkan :
 - a) Pemutusan pada detik 0.25 menunjukkan sistem stabil karena grafik menunjukkan terjadinya ayunan. Besar sudut pemutusan kurang dari sudut pemutusan kritis ($\delta_p < \delta_k$) dengan nilai $60,623^0$ dibawah atau sama dengan $97,7832^0$.

- b) Pemutusan pada detik 0.35 menunjukkan sistem stabil karena grafik menunjukkan terjadinya ayunan. Besar sudut pemutusan kurang dari sudut pemutusan kritis ($\delta_p < \delta_k$) dengan nilai 93.301^0 dibawah atau sama dengan $97,7832^0$
- c) Pemutusan pada detik 0.40 menunjukkan sistem tidak stabil karena grafik tidak menunjukkan terjadinya ayunan. Besar sudut sudut pemutusan melebihi dari sudut pemutusan kritis ($\delta_p > \delta_k$) dengan nilai 111.377^0 yang mestinya dibawah atau sama dengan $97,7832^0$.
- d) Pemutusan pada detik 0.60 menunjukkan sistem tidak stabil karena grafik tidak menunjukkan terjadinya ayunan. Besar sudut pemutusan melebihi dari sudut pemutusan kritis ($\delta_p > \delta_k$) dengan nilai 207.250^0 yang mestinya dibawah atau sama dengan $97,7832^0$.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian yang dilakukan di PLTD PT BERKAT BIMA SENTANA disarankan mensetting breaker terbuka dengan sudut clearing (*Clearing Angle*) lebih kecil atau sama dengan sudut kritis ($\delta_p \leq \delta_k$) karena pada saat terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik yang mendadak dan besar akan didapatkan kestabilan sistem kembali normal masih ada.

Diharapkan nantinya ada studi pengembangan lebih lanjut tentang masalah kestabilan sistem tenaga listrik pada mesin majemuk (multi mesin) terutama di pembangkit-pembangkit listrik yang ada di kota medan.

DAFTAR PUSTAKA

- Cekdin Cekmas, 2006, "*Sistem Tenaga Listrik*", Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Dibyو H. L., 2008, "*Studi Kestabilan Transient Sistem Tenaga Listrik Multimesin (Model IEEE 9 Bus 3 Mesin*", Penelitian Teknik No.30 Vol.1 Thn. XV November 2008, Andalas.
- Dibyو H. L., dan Suri A., 2012, "*Studi Kestabilan Peralihan dengan Metoda Kriteria Sama Luas*", Penelitian Teknik Vol.19 No.1 April 2012, Andalas.
- Gross C.A., 1979, "*Power System Analysis*", John Wiley & Sons, New York.
- Hanselman, D., dan B. Littlefield, 2000, "*Matlab Bahasa Komputasi Teknis*", Penerbit Andi, Yogyakarta.
- L Bijang Nathaniel, 2012, "*Analisa Waktu Pemutusan Suatu Sistem Kelistrikan*", Penelitian Ilmiah Sains Vol.12 No.2 Oktober 2012, Politeknik Negeri Manado.
- Ontosena Penangsang dan Sabar Setya Widayat. 2001. "*Alalisa Stabilitas Transient Multimesin Dengan Metode Extended Equal Area Criterion*", PPs ITS Surabaya.
- Pratama H., Priyadi A., dan Soeprijanto A., 2012, "*Studi Perhitungan CCT Menggunakan Metode EEAC (Extended Equal Area Criterion) Dan Trajektori Kritis/ Critical Trajectory Untuk Kestabilan Transien*", Penelitian Teknik POMITS Vol.1 No.1 2012 PP 1-6, ITS Surabaya.
- Priyadi A., Arjana G., dan Penangsang O., 2012, "*Analisis Stabilitas Transient Pada Sistem Tenaga Listrik dengan Mempertimbangkan Beban Non-Linear*", Penelitian Teknik POMITS Vol.1 No.1 2012 PP 1-6, ITS Surabaya.
- Saadat Hadi, 1999, "*Power System Analysis*", Mc Graw Hill, New York.
- Scheid Francis, 1992, "*Analisis Numerik Teori dan Soal-Soal*", Erlangga, Jakarta.
- Seriawan Arif, 2013, "*Studi Penentuan Sudut Pemutus Kritis Dan Waktu Pemutus Kritis Dengan Metode Kriteria Sama Luas Dan Metode Runge Kutta Orde 4 Menggunakan Matlab PLTU Sicanang Belawan*. Penelitian, UMSU, Medan.
- Stevenson W.D., 1996, "*Analisis Sistem Tenaga Listrik*", Erlangga, Jakarta.

- Sudibya Bambang, 2009, "*Penentuan Sudut Kritis Dan Waktu Kritis Pada Pembangkit Dengan Dua Generator*", Penelitian Litek Volume 6 Nomor 2, September 2009, Jakarta.
- Sugiharto Aris, 2006, "*Pemrograman GUI dengan Matlab*", Penerbit Ar Yogyakarta.
- Ulum Misbahul, 2007, "*Studi Stabilitas Transient Sistem Tenaga Listrik Dengan Metode Kriteria Luas Sama Menggunakan Matlab*", Penelitian, ITS Surabaya.

