

**ANALISIS KESTABILAN SUDUT ROTOR SISTEM SULBAGSEL
MEMPERHATIKAN LEPASNYA SALAH SATU PUSAT PEMBANGKIT**



TUGAS AKHIR

*Disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan
Program Strata Satu Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik*

Universitas Hasanuddin

Makassar

Oleh:

AIDIL FUDHAIL MUMTAZ

D411 16 007

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2020

HALAMAN JUDUL

ANALISIS KESTABILAN SUDUT ROTOR SISTEM SULBAGSEL

MEMPERHATIKAN LEPASNYA SALAH SATU PUSAT PEMBANGKIT

Oleh:

AIDIL FUDHAIL MUMTAZ

D411 16 007

TUGAS AKHIR

Disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan

Program Strata Satu Departemen Teknik Elektro

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2020

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**ANALISIS KESTABILAN SUDUT ROTOR SISTEM SULBAGSEL
MEMPERHATIKAN LEPASNYA SALAH SATU PUSAT PEMBANGKIT**

Disusun Oleh:

AIDIL FUDHAIL MUMTAZ
D411 16 007

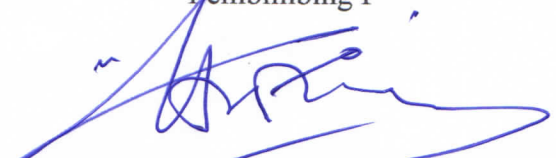
Disusun dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Pernyataan untuk Menyelesaikan
Program Strata-1 pada Sub-Program Teknik Energi Listrik

Departemen Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

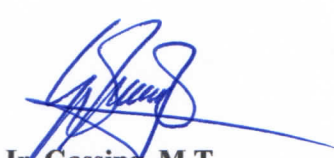
Makassar, 26 November 2020

Disahkan Oleh:

Pembimbing I



Ir. Muh. Bachtiar Nappu, ST., MT., M.Phil., Ph.D.
NIP: 19760406 200312 1 002


Pembimbing II


Ir. Gassing, M.T.
NIP: 19600720 198702 1 001

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin


Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.
NIP: 19691026 199412 2 001



LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini, nama Aidil Fudhail Mumtaz, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul “Analisis Kestabilan Sudut Rotor Sistem Sulbagsel Memperhatikan Lepasnya Salah Satu Pusat Pembangkit”, adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis dan semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain yang telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kemaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggung jawabkan segala resiko

Gowa, 26 November 2020

Yang membuat pernyataan



Aidil Fudhail Mumtaz

NIM : D411 16 007

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkat rahmat serta kasih-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul : “Analisis Kestabilan Sudut Rotor Sistem Sulbagsel Memperhatikan Lepasnya Salah Satu Pusat Pembangkit”.

Tujuan penulisan skripsi ini untuk memenuhi sebagian syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) bagi mahasiswa program S-1 diprogram Studi Teknik Elektro Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini.

Terselesainya skripsi ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun materil baik langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini hingga selesai. Maka, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang tulus kepada :

1. Keluarga saya yang sangat saya cintai, mereka yang tak putus – putusnya mendoakan, memberikan motivasi, dan pengorbanannya baik dari segi moril, maupun materi kepada saya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, MT Ketua Departemen Teknik Elektro.
3. Bapak M. Bachtiar Nappu, ST., MT., Ph.D dan Bapak Ir. Gassing, MT selaku dosen pembimbing skripsi saya yang telah memberikan kritik dan

saran bimbingan maupun arahan yang sangat berguna dalam penyusunan skripsi.

4. Ibu Ardiaty Arief, ST., MTM., Ph.D dan Bapak Prof. Dr. Ir. Nadjamuddin Harun, M.Si selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat berguna dalam penyusunan skripsi.
5. Bapak/Ibu dosen dan staff di lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin khususnya program studi Teknik Elektro yang telah banyak membantu saya selama menjalani masa studi.
6. Seluruh pihak PT. PLN (Persero) UPB Makassar.
7. Kepada teman-teman Nandemonai (Adul, Kiki, Reyhan, Riang, Adnan, Wira, Ari, Arya, Julian, Gafur, dan Piud).
8. Kepada Furnaningsi yang selalu memotivasi saya saat mengerjakan skripsi.
9. Kepada teman-teman Kumpul Positif (Ansar, Amal, Tio, Icul, dan yang lainnya) yang sering mengajak kumpul walaupun saya kerja skripsi.
10. Kepada teman-teman EXCITER16 terima kasih kebersamaan dan kekompakannya.
11. Kepada semua pihak yang terlibat dan tidak dapat saya sebut satu persatu, terima kasih yang tak terhingga atas semua dukungan dan bantuannya.

Akhir kata semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua, aamiin.

Makassar, 26 November 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xii
BAB I: PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Metodologi	5
1.6 Sistematika Penulisan	6
BAB II: TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Kestabilan Sistem Tenaga	8
2.2 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	10
2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor	11
2.2.2 Kestabilan Frekuensi	12
2.2.3 Kestabilan Tegangan	12
2.3 Klasifikasi Kestabilan Sudut Rotor [12]	13
2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan [7]	17
2.5 Metode Mempertahankan Kestabilan Sudut Rotor [13]	22
2.6 <i>DIgSILENT PowerFactory</i>	24
BAB III: METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1 Judul Penelitian	26
3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian	26
3.3 Teknik Pengambilan Data	26
3.4 Metode Analisa Data	27

3.5	Langkah Penelitian Tugas Akhir	27
3.5.1	Studi Literatur	28
3.5.2	Pengambilan Data Sistem Sulbagsel	29
3.5.3	Membuat pemodelan single line diagram Sulbagsel.....	29
3.5.4	Analisis kestabilan sudut rotor ketika beban puncak siang dan malam saat salah satu pusat pembangkit hilang.....	30
3.5.5	Analisis solusi untuk mempertahankan kestabilan sudut rotor	30
3.5.6	Penulisan Hasil.....	31
BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN		32
4.1	Skenario Simulasi.....	32
4.2	Data Sistem Sulbagsel	32
4.3	Hasil Simulasi.....	35
4.3.1	Simulasi PLTU Jenenponto Ekspansi Lepas.....	35
4.3.2	Simulasi PLTA Poso Lepas	40
4.3.3	Simulasi Metode Mempertahankan Kestabilan Sudut Rotor	45
4.3.4	Simulasi Pengaruh penggunaan PLTB pada sistem 14 bus IEEE...	62
BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN.....		68
5.1	Kesimpulan	68
5.2	Saran.....	68
DAFTAR PUSTAKA		70
LAMPIRAN.....		72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik [11].....	11
Gambar 2.2 (a) Contoh ayunan pertama untuk sistem stabil, (b) contoh ayunan pertama untuk sistem tidak stabil [11].....	16
Gambar 2.3 Representasi daya mekanik dan daya listrik pada sebuah generator [7]	17
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	28
Gambar 4.1 <i>Single Line</i> Diagram Sistem Kelistrikan Sulbagsel.....	34
Gambar 4.2 Respon sudut rotor saat PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 lepas pada beban puncak siang	36
Gambar 4.3 Respon sudut rotor saat PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 lepas pada beban puncak malam	37
Gambar 4.4 Respon sudut rotor saat PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 dan unit 2 lepas pada beban puncak siang	38
Gambar 4.5 Respon sudut rotor saat PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 dan unit 2 lepas pada beban puncak malam.....	39
Gambar 4.6 Respon sudut rotor saat PLTA Poso 2 unit 2 lepas pada beban puncak siang	41
Gambar 4.7 Respon sudut rotor saat PLTA Poso 2 unit 2 lepas pada beban puncak malam.....	41
Gambar 4.8 Respon sudut rotor saat PLTA Poso 2 unit 2 dan 3 lepas pada beban puncak siang	43
Gambar 4.9 Respon sudut rotor saat PLTA Poso 2 unit 2 dan 3 lepas pada beban puncak malam.....	43
Gambar 4.10 Respon sudut rotor dengan nilai konstanta inersia yang berbeda: PLTMG Nitayasa 1 saat PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 lepas	46
Gambar 4.11 Respon sudut rotor dengan nilai konstanta inersia yang berbeda: PLTMG Nitayasa 1 saat PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 dan unit 2 lepas	46
Gambar 4.12 Respon sudut rotor dengan nilai konstanta inersia yang berbeda: PLTMG Nitayasa 1 saat PLTA Poso 2 unit 2 lepas	47

Gambar 4.13 Respon sudut rotor dengan nilai konstanta inersia yang berbeda: PLTMG Nitanasa 1 saat PLTA Poso 2 unit 2 dan unit 3 lepas	47
Gambar 4.14 Respon sudut rotor PLTMG Nitanasa 1 dengan penggunaan tap changer yang berbeda saat PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 lepas .	48
Gambar 4.15 Respon sudut rotor PLTMG Nitanasa 1 dengan penggunaan tap changer yang berbeda pada kondisi PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 dan unit 2 lepas	49
Gambar 4.16 Respon sudut rotor PLTMG Nitanasa 1 dengan penggunaan tap changer yang berbeda pada kondisi PLTA Poso 2 unit 2 lepas.....	49
Gambar 4.17 Respon sudut rotor PLTMG Nitanasa 1 dengan penggunaan tap changer yang berbeda pada kondisi PLTA Poso 2 unit 2 dan unit 3 lepas	50
Gambar 4.18 Respon sudut rotor dengan posisi tap 10 dari trafo PLTMG Nitanasa 1, PLTU Nitanasa unit 1 dan unit 3 pada kondisi PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 dan 2 lepas	51
Gambar 4.19 Respon sudut rotor dengan posisi tap 10 dari trafo PLTMG Nitanasa 1, PLTU Nitanasa unit 1 dan unit 3 pada kondisi PLTA Poso 2 unit 2 dan unit 3 lepas	52
Gambar 4.20 Respon sudut rotor dengan penggunaan high speed recloser saat PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 lepas	53
Gambar 4.21 Respon sudut rotor dengan penggunaan high speed recloser saat PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 dan unit 2 lepas	54
Gambar 4.22 Respon sudut rotor dengan penggunaan high speed recloser saat PLTA Poso 2 unit 2 lepas	54
Gambar 4.23 Respon sudut rotor dengan penggunaan high speed recloser saat PLTA Poso 2 unit 3 dan unit 2 lepas	55
Gambar 4.24 Respon sudut rotor dengan kompensasi saluran sebesar 50% saat PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 lepas	57
Gambar 4.25 Respon sudut rotor dengan kompensasi saluran sebesar 50% saat PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 dan unit 2 lepas	57

Gambar 4.26 Respon sudut rotor dengan kompensasi saluran sebesar 50% saat PLTA Poso 2 unit 2 lepas	58
Gambar 4.27 Respon sudut rotor dengan kompensasi saluran sebesar 50% saat PLTA Poso 2 unit 2 dan unit 3 lepas	58
Gambar 4.28 Respon sudut rotor dengan penambahan jumlah saluran transmisi saat PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 lepas	59
Gambar 4.29 Respon sudut rotor dengan penambahan jumlah saluran transmisi saat PLTU Jeneponto ekspansi unit 1 dan unit 2 lepas	60
Gambar 4.30 Respon sudut rotor dengan penambahan jumlah saluran transmisi saat PLTA Poso 2 unit 2 lepas	60
Gambar 4.31 Respon sudut rotor dengan penambahan jumlah saluran transmisi saat PLTA Poso 2 unit 2 dan unit 3 lepas	61
Gambar 4.32 Single line sistem 14 bus IEEE	62
Gambar 4.33 Respon sudut rotor saat pembangkit thermal 1 lepas	63
Gambar 4.34 Respon sudut rotor saat PLTB lepas	63
Gambar 4.35 Respon sudut rotor pembangkit 2 dengan nilai konstanta inersia yang berbeda.....	65
Gambar 4.36 Respon sudut rotor Pembangkit 2 dengan tegangan yang berbeda.	66
Gambar 4.37 Respon sudut rotor dengan jumlah saluran yang berbeda.....	67

ABSTRAK

Aidil Fudhail Mumtaz, Analisis Kestabilan Sudut Rotor Sistem Sulbagsel Memperhatikan Lepasnya Salah Satu Pusat Pembangkit(dibimbing oleh Muhammad Bachtiar Nappu dan Gassing).

Penyedia listrik harus memikirkan secara matang akan pasokan listrik yang tersedia agar kebutuhan energi listrik dapat dipenuhi secara menyeluruh. Di Sulawesi Selatan Khususnya sistem Sulbagsel telah menggunakan energi terbarukan maupun energi fosil yang saling terinterkoneksi. Pada sistem terinterkoneksi dapat terjadi lepasnya salah satu pembangkit yang ada. Kondisi tersebut dapat mempengaruhi kestabilan sistem interkoneksi Sulbagsel yang berakibat pada perubahan sudut rotor dari generator sinkron yang digunakan. Pada tugas akhir ini data yang digunakan diperoleh dari PLN yang kemudian data tersebut dimasukkan pada Software DigSilent lalu dibuat menjadi sistem Sulbagsel. Simulasi yang dilakukan yaitu simulasi aliran daya dan kestabilan transient untuk melihat respon sudut rotor pada sistem kelistrikan Sulbagsel ketika terjadi hilangnya salah satu pembangkit di sistem Sulbagsel. Ada beberapa skenario simulasi yang dilakukan, yaitu dimulai dari simulasi ketika salah satu pusat pembangkitan lepas dari sistem interkoneksi Sulbagsel pada saat kondisi beban puncak malam dan beban puncak siang. simulasi juga dilakukan dengan sistem 14 bus dari IEEE untuk membandingkan respon sistem saat penggunaan PLTB. Hasil simulasi menunjukkan bahwa gangguan hanya terjadi pada kondisi beban puncak siang. Kemudian dilakukan simulasi untuk mempertahankan kestabilan sudut rotor pada kondisi yang mengalami gangguan dengan metode menaikkan konstanta inersia generator, menaikkan tegangan generator, menggunakan high speed recloser dan menurunkan reaktansi saluran. Dari keempat metode yang digunakan, solusi untuk mempertahankan kestabilan sudut rotor adalah dengan menggunakan Peralatan Pemutus Rangkaian Yang Cepat (High Speed Recloser), Menaikkan tegangan dan menurunkan reaktansi saluran. Selain itu, penggunaan PLTB untuk menggantikan pembangkit thermal tidak memberikan perubahan signifikan pada kestabilan dari sudut rotor.

Kata Kunci: *Kestabilan sudut rotor, Pembangkit Listrik Tenaga Bayu, kapasitor seri, tap changer, lepas sinkron.*

ABSTRACT

Aidil Fudhail Mumtaz, Rotor Angle Stability Analysis of Sulbagsel System in Concern of a Disconnected Power Plant(supervised by Muhammad Bachtiar Nappu and Gassing).

The electricity provider must concern about the available electricity supply so that electrical demands can be supplied completely. In South Sulawesi, especially the Sulbagsel system has used interconnected renewable energy and fossil energy. In an interconnected system, one of the existing power plant might be disconnected unexpectedly. This condition can affect the stability of the Sulbagsel interconnection system which results in changes in the rotor angle of the synchronous generator used. In this final project, the data used were obtained from PLN, which entered into the DigSilent software and then made it into the Sulbagsel system. Power flow and transient stability simulations are carried out to see the response of the rotor angle to the Sulbagsel electrical system when a power plant is disconnected in the Sulbagsel system. There are several simulation scenarios done, started from the simulation when one of the power plants disconnected from the Sulbagsel interconnection system during the peak load conditions at night and peak loads during the day. The 14 bus system from IEEE is also simulated to compare the system response when the wind turbines operate. The simulation result shows that the interference only occurs in the peak load conditions during the day. Simulations are needed in order to maintain the stability of the rotor angle in interfered conditions by increasing the generator inertia constant, increasing the generator voltage, using a high-speed recloser, and decreasing the line reactance. Of the four methods used, the solution to maintain the stability of the rotor angle is to use a High-Speed Recloser, increase the voltage, and reduce the line reactance. In addition, the use of wind turbines to replace the thermal generator does not provide a significant change in the stability of the rotor angle

Keywords: *Rotor Angle Stability, Wind Turbine, Series Capacitor, tap changer, unsynchronized.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus menerus meningkat, energi listrik telah menjadi bagian tak terpisahkan dari kebutuhan hidup masyarakat sehari-hari seiring dengan pesatnya peningkatan pembangunan di bidang teknologi, industri dan informasi. Dengan meningkatnya kebutuhan listrik dari tahun ke tahun, maka penyedia listrik harus memikirkan secara matang akan pasokan listrik yang tersedia agar kebutuhan energi listrik dapat dipenuhi secara menyeluruh. Ketersediaan energi listrik harus terus di ditingkatkan seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik, Energi listrik di Indonesia mayoritas dibangkitkan dari bahan bakar fosil yaitu minyak bumi, gas dan batu bara. Bahan bakar fosil merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui, sehingga penggunaannya untuk membangkitkan energi listrik tidak dapat terus diandalkan akibat dari persediaan dari bahan bakar fosil yang terus menerus kian menipis. Di samping itu pembangkitan energi listrik dari bahan bakar fosil memiliki banyak dampak negatif bagi lingkungan.

Sejak tahun 2004, Indonesia telah menjadi negara pengimpor minyak netto (net oil importer). Hal tersebut disebabkan karena kebutuhan minyak yang terus meningkat sementara produksinya terus menurun [1]. Artinya impor minyak Indonesia lebih besar dari eksportnya. Pembangkit yang menggunakan energi primer dari fosil menghasilkan daya besar dan keberlangsungan pasokannya cukup panjang. Sedangkan pembangkit dengan bahan bakar jenis non-fosil mempunyai

kapasitas daya yang rendah dan mempunyai sifat *intermittent* [2], sehingga pemakaian pembangkit dengan bahan bakar fosil masih lebih banyak digunakan.

Indonesia dikaruniai kekayaan alam yang berlimpah ruah yang tersebar dibelasan ribu pulau, baik yang tersimpan diatas daratan, di dalam lautan, maupun di bawah kulit bumi [3]. Diantara kekayaan alam tersebut terdapat sumber-sumber energi terbarukan dengan potensi yang cukup besar antara lain air, sinar matahari, angin, panas bumi, bioenergi, serta gerakan dan perbedaan suhu lapisan laut energi gelombang laut. Di Sulawesi Selatan khususnya telah menggunakan energi terbarukan untuk membangkitkan energi, tercatat kapasitas terpasang pembangkit listrik PLN tahun 2018 yaitu 513,50 MW PLTA, 1,62 MW PLTM, 42,23 MW PLTMH, 142,05 MW PLTB, 17,20 MW PLTBm, dan 5,29 MWp PLTS [4]. Diantara pembangkit listrik dengan energi terbarukan, pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) merupakan salah satu upaya untuk meningkatkan ketersediaan listrik di Indonesia.

PLTB Sidrap I merupakan pembangkit bertenaga angin skala komersial pertama di Indonesia. Penyelesaian pembangunan proyek ini dilakukan dalam waktu 2,5 tahun (Agustus 2015 s.d. Maret 2018). Sebanyak 30 kincir angin dengan tinggi tower 80 meter dan panjang baling-baling 57 meter, masing-masing menggerakkan turbin berkapasitas 2,5 MW. PLTB Sidrap I telah beroperasi akhir Maret 2018 lalu dan dapat mengaliri lebih dari 70.000 pelanggan listrik dengan daya 900 VA. Tingkat komponen dalam negeri (TKDN) PLTB Sidrap I ini mencapai 40% [5]. PLTB Tolo yang dikelola oleh pengembang listrik swasta (Independent Power Producer/IPP) ini memiliki Tingkat Komponen Dalam Negeri

(TKDN) yang mencapai sekitar 40%. Dengan tinggi 133 meter (m) dan panjang baling-baling 63 m, 20 turbin yang terpasang masing-masing mampu mengalirkan listrik sebesar 3,6 MW, sehingga kapasitas totalnya mencapai 72 MW. Kehadiran PLTB ini mampu melistriki setara 300.000 rumah tangga pelanggan 900 VA [6].

Interkoneksi dua PLTB tersebut di jaringan interkoneksi Sulawesi bagian selatan tentunya akan mempengaruhi kestabilan dari sistem tenaga listrik. Kestabilan sistem tenaga listrik merupakan karakteristik sistem tenaga yang memungkinkan mesin bergerak serempak dalam sistem pada operasi normal dan dapat kembali dalam keadaan seimbang setelah terjadi gangguan. Generator sinkron merupakan komponen yang sangat vital dalam sistem tenaga listrik. Sistem yang terinterkoneksi terdiri dari beberapa generator yang bekerja secara paralel untuk mencatu daya. Dalam sistem interkoneksi terdapat beberapa kondisi yang dapat menyebabkan sebuah generator kehilangan sinkronisasi atau kestabilannya. Generator yang tidak stabil akan dilepas dari sistem dan pelepasan ini dapat berpengaruh terhadap kestabilan sistem secara keseluruhan. Lepasnya generator yang mencatu sebagian besar daya sistem dapat mengakibatkan pemadaman total (blackout) [7].

Pada PLTB energi angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik bergantung pada kondisi alam sehingga mempunyai kondisi yang bervariasi dan tidak selalu konstan. Kondisi ini dapat mempengaruhi kestabilan sistem interkoneksi Sulbagsel yang berakibat pada perubahan sudut rotor dari generator sinkron yang digunakan, Oleh karena itu, penulis tertarik untuk meneliti kestabilan sudut rotor pada sistem kelistrikan Sulbagsel dengan memperhatikan lepasnya salah

satu pusat pembangkit. Adapun judul penelitian yang akan diangkat adalah “Analisis Kestabilan Sudut Rotor Sistem Sulbagsel Memperhatikan Lepasnya Salah Satu Pusat Pembangkit”. Pada penelitian ini, analisis kestabilan Sudut Rotor dari Sulbagsel akan disimulasikan dengan menggunakan *software* DIgSILENT *PowerFactory (Digital Simulation and Electrical Network)*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang maka rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana kestabilan sudut rotor sistem Sulbagsel ketika beban puncak siang dan beban puncak malam apabila salah satu pusat pembangkit hilang?
2. Bagaimana solusi untuk mempertahankan kestabilan sudut rotor apabila terjadi ketidakstabilan?
3. Bagaimana pengaruh dari penggunaan PLTB dibandingkan dengan pembangkit thermal terhadap kestabilan sudut rotor ketika salah satu pembangkit hilang?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini berdasarkan rumusan masalah yang dijabarkan sebagai berikut:

1. Untuk menganalisis kestabilan sudut rotor sistem Sulbagsel ketika beban puncak siang dan beban puncak malam apabila salah satu pusat pembangkit hilang.

2. Untuk menganalisis solusi untuk mempertahankan kestabilan sudut rotor apabila terjadi ketidakstabilan.
3. Untuk menganalisis pengaruh dari penggunaan PLTB dibandingkan dengan pembangkit thermal terhadap kestabilan sudut rotor ketika salah satu pembangkit hilang.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah penelitian analisis kestabilan sudut rotor sistem subbagel memperhatikan lepasnya salah satu pusat pembangkit antara lain:

1. Sistem kelistrikan yang dianalisis adalah sistem kelistrikan Sulbagesel dan sistem 14 bus IEEE.
2. Kestabilan yang dibahas hanya pada kestabilan sudut rotor.
3. PLTB yang diteliti hanya pada daya output yang dihasilkan.
4. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* DIgSILENT.

1.5 Metodologi

Tahap pengerjaan dalam menyelesaikan proposal ini adalah:

1. Studi Literatur

Studi literatur untuk mengumpulkan dan mencari referensi bahan melalui buku, jurnal ilmiah (*paper*), dan melalui media internet yang berhubungan dengan judul penelitian untuk menunjang pengumpulan data sehingga bisa dipelajari dalam pengerjaan dan penelitian tugas akhir..

2. Pengambilan Data

Berupa pengambilan data yang penting dan untuk diolah dalam penelitian ini.

3. Pemodelan

Pemodelan ini akan menggunakan *software* simulasi DIGSILENT. Dalam tugas akhir ini dilakukan pemodelan *single line diagram* pada *software* simulator untuk sistem Sulbagsel.

4. Simulasi dan Pengolahan Data

Dilakukan simulasi yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik profil tegangan dan sudut rotor pada sistem kelistrikan

5. Analisa Data

Dilakukan analisis data hasil dari simulasi dan menganalisis kestabilan sudut rotor dengan berbagai kondisi yang berbeda.

6. Penarikan Kesimpulan

Diperoleh setelah dilakukan korelasi antara hasil pengolahan dengan permasalahan yang diteliti. Simpulan ini merupakan hasil akhir dari semua masalah yang dibahas

1.6 Sistematika Penulisan

Penyusunan tugas akhir ini memiliki sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori penunjang dan literatur/referensi lain terkait kestabilan sudut rotor.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini berisi tentang waktu dan tempat penelitian, metode pengambilan data, analisa data, dan langkah-langkah penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi hasil simulasi dan pembahasan berdasarkan rumusan masalah.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi kesimpulan dan saran berdasarkan tujuan penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kestabilan Sistem Tenaga

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus memenuhi beberapa syarat, seperti: “*Reliability, Quality dan Stability*” [8].

- ✓ *Reliability* adalah kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus.
- ✓ *Quality* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
- ✓ *Stability* adalah kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan.

Dalam sistem tenaga listrik yang baik maka ketiga syarat tersebut harus dipenuhi yaitu sistem harus mampu memberi pasokan listrik secara terus menerus dengan standar besaran untuk tegangan dan frekuensi sesuai dengan aturan yang berlaku dan harus segera kembali normal bila sistem terkena gangguan.

Untuk jaringan yang sangat kompleks dimana beberapa pembangkit saling terkoneksi satu sama lain maka keluaran daya elektris berupa besaran seperti tegangan dan frekuensi haruslah diperhatikan agar tidak ada pembangkit yang kelebihan beban dan pembangkit yang lain bebannya kecil.

Sistem tenaga listrik mempunyai variasi beban yang sangat dinamis dimana setiap detik akan berubah-ubah, dengan adanya perubahan ini pasokan daya listrik tetap dan harus disuplai dengan besaran daya yang sesuai, bila pada

saat tertentu terjadi lonjakan atau penurunan beban yang tidak terduga maka perubahan ini sudah dapat dikategorikan ke dalam gangguan pada sistem tenaga listrik yakni kondisi tidak seimbang antara pasokan listrik dan permintaan energi listrik akibat adanya gangguan, baik pada pembangkit ataupun pada sistem transmisi sehingga mengakibatkan kerja dari pembangkit yang lain menjadi lebih berat.

Kestabilan suatu sistem tenaga listrik adalah kemampuan dari sistem itu untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan. Sebaliknya ketidakstabilan suatu sistem adalah kehilangan sinkron dari sistem itu. Jadi masalah kestabilan terkait dengan penilaian mesin sinkron setelah gangguan. Untuk mempermudah analisis, masalah kestabilan secara umum dibagi dalam dua kategori utama, yaitu kestabilan *steady state* (keadaan tunak) dan kestabilan *transient*. Kestabilan *steady state* dipandang sebagai kemampuan dari sistem tenaga untuk memperoleh kembali kesinkronan setelah terjadi gangguan kecil. Perluasan dari kestabilan *steady state* dikenal sebagai kestabilan dinamik. Kestabilan dinamik adalah suatu kestabilan yang difokuskan setelah terjadi gangguan kecil untuk waktu yang lama dengan memasukkan komponen kontrol otomatis. Kestabilan transien dipandang pada gangguan yang mendadak seperti halnya pemutusan saluran yang mendadak, penambahan beban yang mendadak atau perubahan beban [9].

Pada keadaan operasional yang stabil dari sistem tenaga membutuhkan keseimbangan antara daya input mekanis pada penggerak mula (*prime mover*) dengan daya output listrik pada sistem. Jika input mekanis tidak sesuai dengan beban listrik, maka kecepatan sistem (frekuensi) dan tegangan akan menyimpang

dari normal. Kondisi yang lebih parah jika ketika terjadi masalah pada sistem, seperti gangguan pada saluran transmisi atau hilangnya generator pada beban besar. Fungsi peralatan kontrol, seperti governor, generator, regulator tegangan, dan peralatan kontrol frekuensi beban adalah untuk merasakan penyimpangan dari normal dan bertindak untuk menyimpan frekuensi dan tegangan normal. Namun, perangkat kontrol tidak sempurna dan biasanya mengizinkan osilasi terjadi (variasi periodik) di sekitar kondisi yang diinginkan [10].

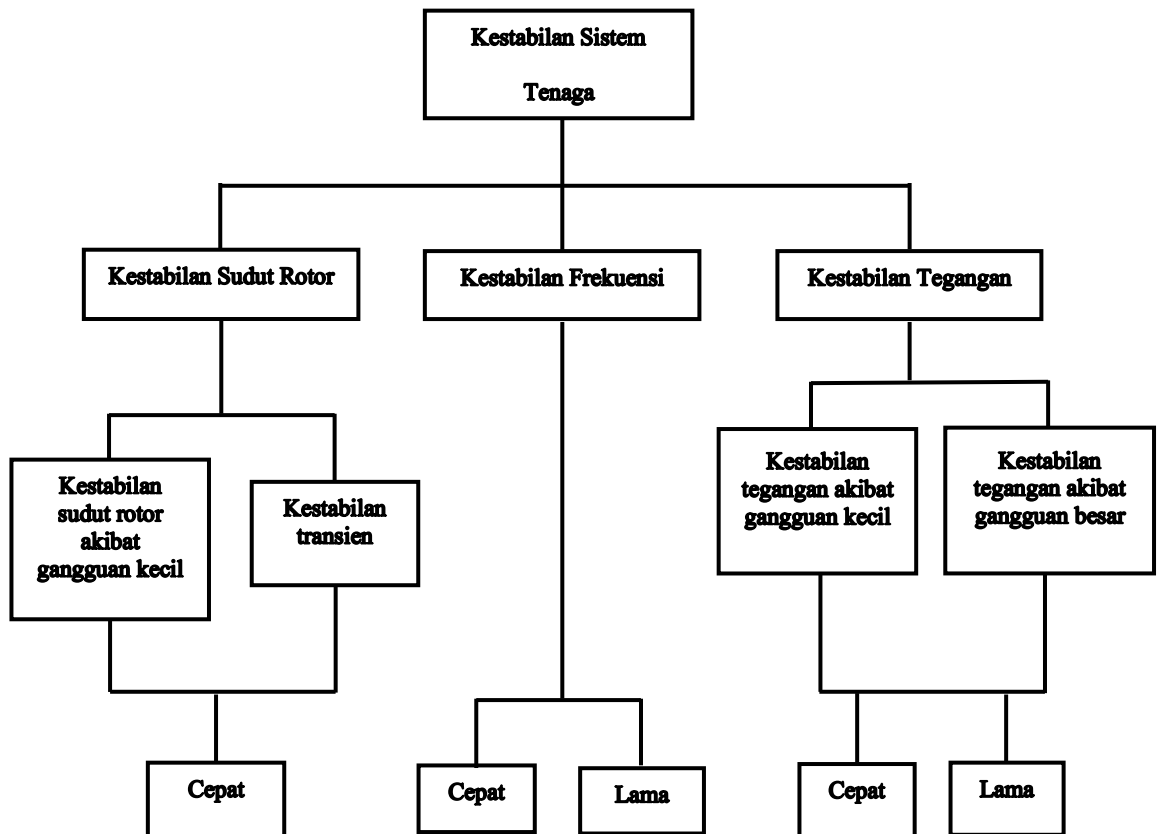
2.2 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik diklasifikasikan berdasarkan beberapa hal di bawah ini [11]:

- a. Sifat alami dari ketidakstabilan yang dihasilkan terkait dengan parameter sistem utama dimana ketidakstabilan bisa diamati.
- b. Ukuran gangguan dianggap menunjukkan metode perhitungan dan prediksi ketidakstabilan yang paling sesuai.
- c. Divais, proses dan rentang waktu yang harus diambil untuk menjadi pertimbangan dalam menentukan kestabilan

Secara umum permasalahan kestabilan sistem tenaga listrik terkait dengan kestabilan sudut rotor (*Rotor Angle Stability*), kestabilan tegangan (*Voltage Stability*) dan kestabilan frekuensi (*Frequency Stability*). Klasifikasi ini berdasarkan rentang waktu dan mekanisme terjadinya ketidakstabilan. Kestabilan sudut rotor diklasifikasikan 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 serempaknya torsi dan diawali dengan gangguan-gangguan besar [11].



Gambar 2.1 Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik [11]

Gambar diatas menunjukkan gambaran menyeluruh tentang masalah kestabilan sistem tenaga listrik yang diidentifikasi berdasarkan kategori dan sub kategorinya.

2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor berkaitan dengan kemampuan mempertahankan keadaan sinkron di bawah kondisi operasi setelah mengalami gangguan oleh mesin sinkron yang terinterkoneksi dalam sebuah sistem tenaga listrik. Hal ini bergantung pada kemampuan untuk mempertahankan atau mengembalikan

kesetimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik masing-masing mesin sinkron pada sistem. Ketidakstabilan dapat menyebabkan terjadinya kenaikan sudut ayunan beberapa generator menuju kehilangan sinkronisasinya dengan generator lain. Kehilangan sinkronisasi dapat terjadi antara satu mesin dengan sistem atau antara beberapa kelompok mesin, antara sinkronisasi yang dipertahankan dengan masing-masing kelompok setelah pemisahan satu sama lain. Untuk tetap mempertahankan kestabilan dari sinkronisasi sistem perbedaan sudut rotor antar generator tidak boleh melebihi dari batas kestabilan sudut rotor sebesar 90° [11]. Kestabilan sudut rotor dibagi menjadi dua kategori, yaitu kestabilan gangguan kecil (keadaan tunak) dan kestabilan gangguan besar (keadaan transien) [12].

2.2.2 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi terkait dengan kemampuan sebuah sistem tenaga listrik untuk mempertahankan frekuensi tunak dengan kisaran nominal mengikuti beberapa gangguan sistem yang menghasilkan ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkitan dan beban. Hal ini bergantung pada kemampuan untuk mengembalikan keseimbangan antara beban dan pembangkitan dengan meminimalisasi pelepasan unit dan atau kehilangan beban [12].

2.2.3 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan mengacu pada kemampuan sistem daya untuk mempertahankan tegangan stabil di semua bus dalam sistem setelah dikenakan gangguan dari kondisi operasi awal yang diberikan. Itu tergantung pada kemampuan mempertahankan/mengembalikan keseimbangan antara memuat

permintaan dan pasokan beban dari sistem tenaga. Ketidakstabilan yang mungkin terjadi dalam bentuk jatuhnya atau naiknya tegangan beberapa bus. Kemungkinan hasil ketidakstabilan tegangan adalah hilangnya beban di suatu area, atau tersandung transmisi garis-garis dan elemen-elemen lain oleh sistem pelindung mereka yang mengarah ke gangguan aliran listrik. Hilangnya sinkronisme beberapa generator dapat dihasilkan dari pemadaman ini atau dari kondisi operasi itu melanggar batas arus [12].

2.3 Klasifikasi Kestabilan Sudut Rotor [12]

Kestabilan sudut rotor dibagi menjadi dua kategori, yaitu kestabilan gangguan kecil (keadaan tunak) dan kestabilan gangguan besar (keadaan transien).

a. Kestabilan gangguan kecil (keadaan tunak)

Kestabilan gangguan kecil (atau sinyal kecil) terkait dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi di bawah gangguan kecil. Gangguan dianggap cukup kecil sehingga linierisasi persamaan sistem dapat diterima untuk keperluan analisis.

Kestabilan Gangguan kecil tergantung pada kondisi pengoperasian awal sistem. Ketidakstabilan yang mungkin terjadi dapat dari dua bentuk: i) peningkatan sudut rotor karena kurangnya torsi sinkronisasi, atau ii) osilasi rotor dari peningkatan amplitudo karena kurangnya torsi redaman yang cukup.

Dalam sistem daya saat ini, masalah kestabilan sudut rotor gangguan kecil biasanya terkait dengan redaman osilasi yang tidak memadai. Masalah ketidakstabilan aperiodik sebagian besar telah dihilangkan dengan menggunakan

regulator tegangan generator yang bekerja terus menerus; Namun, masalah ini masih dapat terjadi ketika generator beroperasi dengan eksitasi konstan ketika dikenakan tindakan pembatas eksitasi (pembatas arus medan).

Masalah gangguan kestabilan sudut rotor kecil dapat bersifat lokal atau global. Masalah lokal melibatkan sebagian kecil dari sistem tenaga listrik, dan biasanya dikaitkan dengan osilasi sudut rotor dari pembangkit listrik tunggal terhadap sistem tenaga lainnya. Osilasi semacam itu disebut osilasi mode instalasi lokal. Kestabilan (redaman) dari osilasi ini tergantung pada kekuatan sistem transmisi seperti yang terlihat oleh pembangkit listrik, sistem kontrol eksitasi generator dan output pabrik.

Masalah global disebabkan oleh interaksi di antara kelompok-kelompok besar generator dan memiliki efek samping yang lebih besar. Mereka melibatkan getaran dari kelompok generator di area yang berayun melawan sekelompok generator di area lain. Osilasi semacam itu disebut osilasi mode inter-area. Karakteristiknya sangat kompleks dan berbeda secara signifikan dengan karakteristik mode instalasi lokal. Karakteristik beban, khususnya, memiliki efek besar pada kestabilan mode inter-area.

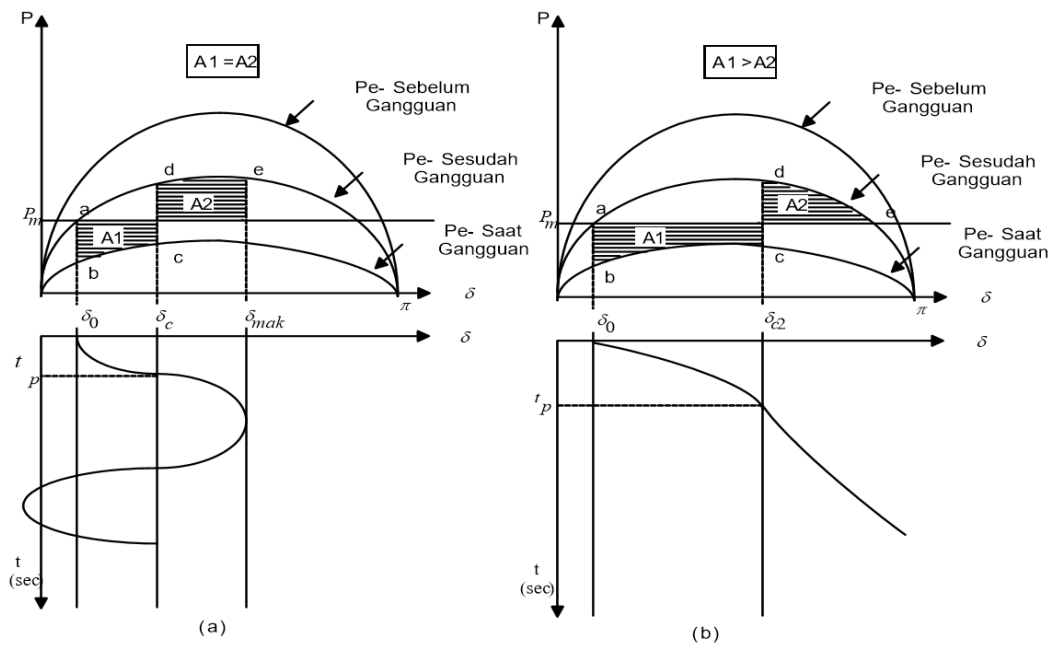
b. Kestabilan gangguan besar (keadaan transien)

Kestabilan gangguan besar atau kestabilan transien, seperti yang biasa disebut, berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi ketika mengalami gangguan yang besar, seperti short-circuit pada

saluran transmisi. Respons sistem yang dihasilkan melibatkan perubahan besar sudut rotor generator dan dipengaruhi oleh hubungan sudut daya nonlinier.

Kestabilan sementara tergantung pada status pengoperasian awal sistem dan tingkat gangguan dari gangguan. Ketidakstabilan biasanya dalam bentuk pemisahan sudut aperiodik karena torsi sinkronisasi yang tidak memadai, sebagai ketidakstabilan ayunan pertama. Namun, dalam sistem daya besar, ketidakstabilan sementara tidak selalu terjadi karena ketidakstabilan ayunan pertama yang terkait dengan mode tunggal; itu bisa merupakan hasil dari superposisi dari mode inter-area swing lambat dan mode local swing.

Selain melihat kondisi kestabilan sistem, studi kestabilan transien juga bertujuan untuk menentukan berapa besar waktu pemutusan kritis atau batas maksimum gangguan dihilangkan. Menurut Stevenson (1984) studi kestabilan transien lebih lanjut dapat dibagi ke kedalam kestabilan ayunan pertama (first swing) dan ayunan majemuk (multiswing). Kestabilan ayunan pertama generator dimodelkan sederhana yaitu tanpa memasukkan sistem-sistem pengaturannya [7]. Periode waktu yang diselidiki adalah detik pertama setelah timbulnya gangguan pada sistem seperti yang terlihat pada Gambar 2.2. Jika generator-generator pada sistem tetap berada dalam keadaan serempak sebelum berakhirnya detik pertama maka sistem dikatakan dalam keadaan stabil. Namun umumnya lama studi kestabilan digunakan 2 sampai dengan 3 detik agar bentuk kurva ayunan sudut rotor jelas terlihat [11]. Untuk kestabilan ayunan majemuk meliputi periode yang lebih lama karena itu, pengaruh dari sistem-sistem pengaturan generator sudah dipertimbangkan, seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 (a) Contoh ayunan pertama untuk sistem stabil, (b) contoh ayunan pertama untuk sistem tidak stabil [11].

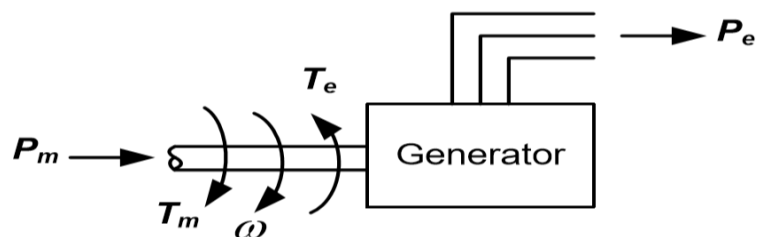
Semua studi-studi kesatabilan dibuat dalam tiga asumsi yang mendasar untuk memudahkan dalam perhitungan yaitu :

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

2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan [7]

Penggerak mula (primover) sebuah mesin sinkron akan memberikan besarnya momen putar mekanis T_m pada poros mesin dan momen putar listrik T_e pada mesin sinkron. Pada Gambar 2.3 arah momen putar mekanis dan momen putar listrik akan saling berlawanan. Jika sebagai akibat dari gangguan, torsi mekanis lebih besar daripada torsi elektromagnetis atau sebaliknya maka rotor akan mengalami momen percepatan bersih yang besarnya diberikan oleh : tenaga untuk bertahan dari gangguan yang mempengaruhi kestabilan transien system yang bersangkutan. Adapun metode tersebut adalah sebagai berikut :

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



Gambar 2.3 Representasi daya mekanik dan daya listrik pada sebuah generator [7]

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

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

dengan :

J = Momen kelembanan total dari massa rotor dalam kg-m²

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

t = Waktu, dalam detik

T_a = Momen putar percepatan bersih, dalam Nm

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

T_e = Momen putar listrik atau elektromagnetis bersih, dalam Nm

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

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

dengan :

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

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

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

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

dan percepatan rotor adalah :

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

dengan :

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

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

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

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

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

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

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

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

dengan :

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

P_e = Daya listrik pada celah udaranya dalam Watt.

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

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

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

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

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

atau,

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$H = \frac{\text{Daya kinetis yang disimpan dalam mega joule pada kecepatan sinkron}}{\text{Rating dalam MVA}}$$

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_{sm}^2}{S_b} = \frac{\frac{1}{2}M\omega_{sm}}{S_b} = \frac{W_k}{S_b} \quad \text{MJ/MVA} \quad (16)$$

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

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

Kecepatan sinkron pada persamaan (17) jika dituliskan dalam satuan-satuan listrik listrik maka diperoleh,

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

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

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

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

Bila δ dinyatakan dalam derajat listrik,

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

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

Penggunaan konstanta kelembanan M jarang digunakan dalam praktek, sedangkan yang lebih sering digunakan adalah bentuk-bentuk persamaan ayunan yang menggunakan konstanta H . Hal tersebut dikarenakan nilai M banyak sekali berubah-ubah menurut besar dan jenis mesin, sedangkan nilai H sedikit sekali berubahnya. Adapun nilai-nilai konstanta H dari beberapa jenis mesin diperlihatkan dalam Tabel nilai momen inersia dari beberapa jenis mesin listrik terlampir pada lampiran 1.

2.5 Metode Mempertahankan Kestabilan Sudut Rotor [13]

Terdapat beberapa metode yang dapat dilakukan untuk memperbaiki kemampuan sistem tenaga untuk bertahan dari gangguan yang mempengaruhi kestabilan transien sistem yang bersangkutan. Adapun metode tersebut adalah sebagai berikut :

a) Menaikkan Konstanta Inersia Generator

Menaikkan konstanta inersia mesin akan mengurangi penambahan perubahan sudut δ dalam interval waktu tertentu, sehingga circuit breaker mempunyai waktu yang lebih lama untuk memutuskan rangkaian sebelum mesin melampaui sudut kritisnya. Semakin besar konstanta inersia mesin, maka semakin stabil suatu sistem. Tetapi dengan memperbesar konstanta inersia mesin, ukuran-

ukuran mesin akan semakin besar pula, yang berarti memerlukan biaya yang besar sehingga tidak ekonomis dalam prakteknya.

b) Menaikkan Tegangan Generator

Apabila pada kondisi sebelum terjadi gangguan generator sedang mensuplai daya tertentu dengan sudut δO , dengan menaikkan nilai tegangan generator yang terhubung dengan sistem, maka akan memperbesar daya yang disalurkan generator, yang berarti akan memperkecil sudut δO . Dengan semakin kecilnya sudut δO , apabila terjadi gangguan, generator dapat berayun lebih lama sebelum sudut kritis kestabilan tercapai. Dengan menaikkan nilai tegangan generator, berarti harus memperhitungkan isolasi untuk generator, yang berarti penambahan biaya untuk instalasi generator tersebut, sehingga cara ini relatif kurang ekonomis dalam prakteknya.

c) Menggunakan Peralatan Pemutus Rangkaian Yang Cepat (High Speed Recloser)

Semakin cepat gangguan yang terjadi pada sistem diisolir, maka kestabilan sistem semakin baik. Sesuai kriteria luas sama, sistem hanya akan stabil jika luasan daerah peredaman (A2) lebih besar atau sama dengan luas daerah percepatan (A1), dan yang menentukan besarnya masing-masing luasan ini adalah waktu pemutusan saluran yang mengalami gangguan. Semakin cepat waktu pemutusan, maka luasan daerah A1 akan semakin kecil, sehingga syarat suatu sistem untuk tetap stabil setelah mengalami gangguan akan terpenuhi.

d) Menurunkan Reaktansi Seri Saluran

Dengan menurunkan reaktansi seri saluran, dapat memperbesar daya yang disalurkan oleh generator, sehingga dapat meningkatkan kestabilan transien sistem. Perbaikan kestabilan transien dengan menggunakan kompensasi seri, dalam hal ini kapasitor seri. Jika saluran terkompensasi 50 %, maka akan mengurangi reaktansi saluran sebesar setengah kali dari harga asalnya, dan akan menghasilkan transfer daya dua kali lipat dengan selisih sudut tegangan yang sama. Atau dengan kata lain, saluran mampu menghasilkan transfer daya yang sama dengan selisih sudut tegangan yang lebih kecil, sehingga akan mengurangi resiko terjadinya ketidakstabilan pada sistem jika terjadi gangguan. Dalam prakteknya kompensasi dari saluran tidak pernah lebih dari 80% dikarenakan semakin besar kompensasi dari saluran berakibat pada tingginya kemungkinan terjadi subsynchronous resonance. Nilai kompensasi yang sering digunakan adalah 20% sampai 70%. Pemilihan lokasi dari kompensasi seri biasanya berada pada tengah dari saluran, di kedua ujung saluran dan di $1/3$ atau $1/4$ dari saluran. Peletakan kompensasi seri ditengah saluran memiliki keuntungan dimana peralatan proteksi yang lebih sederhana dan arus short-circuit yang rendah, tetapi akses keamanan, monitoring dan maintenance yang sulit. Sedangkan peletakan kompensasi seri pada kedua ujung saluran memiliki keuntungan dimana akses keamanan, monitoring dan maintenance lebih mudah, tetapi arus short circuit lebih besar dan peralatan proteksi yang kompleks.

2.6 *DIgSILENT PowerFactory*

Pada penelitian ini, dilakukan analisis dan simulasi dari sistem kelistrikan sulselbar dalam Program *PowerFactory*. Program *PowerFactory* atau biasa disebut

DIgSILENT merupakan *engineering tool* untuk melakukan analisis jaringan tenaga listrik, transmisi, dan distribusi. Nama DIgSILENT merupakan kepanjangan “*DIGital SIMuLation and Electrical NeTwork calculation program*”.

Berikut merupakan simulasi yang terdapat pada PowerFactory:

- *Load Flow Analysis*
- *Short Circuit Analys*
- *Contingency Analysis*
- *Quasi-Dynamic Simulation*
- *RMS/EMT Simulation*
- *Modal Analysis*
- *Harmonics/Power Quality*
- *Realibility Analysis*
- *Optimal Power Restoration*
- *Generation Adequacy Analysis*
- *Distribution Network Tools*
- *Optimal Capacitor Placement*
- *Protection*

Simulasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah *Load Flow Analysis* dan *RMS/EMT Simulation*. Metode yang digunakan pada *Load Flow Analysis* adalah Newton Rhapson. Ada dua pilihan yang bisa digunakan:

- a) *Classical Newton Rhapson* dengan *Power Equation*, pilihan ini digunakan untuk menganalisa sistem transmisi, terutama sistem dengan beban yang besar.
- b) *Newton Rhapson* dengan *Current Equation*, pilihan ini digunakan untuk menganalisa sistem distribusi yang tidak seimbang [14].

Sedangkan pada *RMS/EMT Simulation*, metode yang digunakan adalah metode trapezoidal.